U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

Metodologia para a Integração de Sistemas Solares Ativos na Envolvente de Edifícios

Luís Emanuel Melo Leite

Mestre em Reabilitação do Património Edificado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação do grau de Doutor em Engenharia Civil

---

Orientador: Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa

Junho de 2016

POPH PROGRAMA OPERACIONAL POTENCIAL HUMANO

QREN QUADRO DE REFERÊNCIA ESTRATÉGICO NACIONAL PORTUGAL 2007.2013

UNIÃO EUROPEIA Fundo Social Europeu

AGRADECIMENTOS

A presente Tese tornou-se possível mediante o contributo de várias pessoas, a diferentes níveis. A todos aqueles que deram o seu apoio, manifesto o meu agradecimento.

Em particular, um reconhecimento especial à inestimável disponibilidade, orientação e apoio crítico do Prof. Hipólito de Sousa, fundamentais neste percurso de aprendizagem.

À EDP, na pessoa do Eng. João Hormigo, pela pronta disponibilidade e pelas informações cedidas, as quais se revelaram estruturantes na conclusão deste processo.

Finalmente, à Ana, à Sara e aos meus pais, pelo constante e imprescindível apoio que permitiu ultrapassar os desafios dos últimos anos, assim como aos colegas e amigos pelas pertinentes manifestações de encorajamento e diligente cooperação.

O autor contou com o apoio financeiro da Fundação Ciência e Tecnologia, através de uma bolsa de investigação com a referência SFRH/BD/46289/2008, no âmbito do QREN - POPH - Tipologia 4.1 - Formação Avançada, comparticipado pelo Fundo Social Europeu e por fundos nacionais do Ministério da Educação e Ciência.

RESUMO

A crescente ambição de melhoria do desempenho energético dos edifícios, patente na regulamentação existente e no objetivo futuro de balanço energético quase nulo, assim como a promoção de novas formas de gerar energia a partir de fontes renováveis, a nível político, económico e social, deram origem à proliferação de sistemas solares ativos – coletores térmicos e módulos fotovoltaicos – no ambiente edificado. No entanto, esta intenção de provocar uma mudança célere ao nível do desempenho energético dos edifícios, visando a redução do impacto gerado pelo consumo de recursos fósseis, não é acompanhada pela atividade de projeto de uma forma abrangente. Relativamente aos sistemas solares ativos, na maioria das vezes, estes apenas são considerados em fases finais de projeto e, consequentemente, adicionados ao edifício pré-concebido, resultando numa instalação técnica dissonante do conjunto edificado. Neste sentido, apesar do contributo como fonte de energia renovável, a sua utilização gera constrangimentos em termos funcionais, construtivos e formais.

A integração dos sistemas solares ativos como produtos de construção pode contribuir para atenuar estes constrangimentos, uma vez que implica a sua previsão no início da conceção, permitindo explorar a sua multifuncionalidade. Verifica-se assim a pertinência de uma metodologia para a integração dos sistemas solares ativos na envolvente de edifícios, que permita analisar o potencial destes sistemas como produtos de construção e incrementar a sustentabilidade das soluções construtivas. Deste modo, a presente Tese de Investigação tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão na fase de conceção, através da verificação das opções de integração - funcional, construtiva e formal - no desempenho relativo às várias dimensões da sustentabilidade - ambiental, económica e social - ao longo de todo o ciclo de vida do edifício.

De forma a atingir este objetivo, procedeu-se a um exercício de síntese crítica das questões de integração e de sustentabilidade associadas aos sistemas solares ativos, enquanto produtos da construção, e ao desempenho da envolvente. Este exercício deu origem a uma lista de requisitos e a um conjunto de parâmetros e indicadores que permitem orientar e avaliar a integração de sistemas solares ativos na envolvente. A metodologia foi posteriormente aplicada a casos de estudo e, como resultado, verificou-se que o processo proposto possibilita a ponderação de uma série de questões que na prática corrente não são frequentemente equacionadas. Consequentemente é possível realizar uma integração dos sistemas solares ativos abrangente e multifuncional, obtendo vantagens ao nível do desempenho do edifício, assim como em termos ambientais e sociais, e alcançando a repercussão destas vantagens na avaliação económica. Confirmou-se assim que a integração dos sistemas solares ativos em fases iniciais de projeto proporciona uma utilização sinergética destes sistemas. Estes são aspetos relevantes e determinantes uma vez que as questões de geração de energia renovável, de eficiência energética e de sustentabilidade terão inevitavelmente um peso cada vez maior nas decisões de projeto.

Palavras-chave: Sistemas solares ativos, envolvente, integração, sustentabilidade, projeto.

ABSTRACT

There is an increasing ambition to improve the energy performance of buildings, displayed in the existing regulation and in the future goal for nearly-zero energy buildings; on the other hand, the promotion of new ways to generate energy from renewable sources, at the political, economic and social levels, gave rise to a proliferation of active solar systems – thermal collectors and photovoltaic modules – in the built environment. However, this intention to induce a quick change in what regards the energy performance of buildings, aimed at reducing the impact generated by the consumption of fossil resources, is not followed by architectural design in a comprehensive manner. In most cases, active solar systems are only taken into account during the final design stages and, consequently, added to a pre-designed building, resulting in a technical installation that is not consistent with the building as a whole. In this context, despite its contribution as a renewable energy source, its use gives rise to functional, construction-related and formal constraints.

The integration of active solar systems as construction products may contribute to mitigate these constraints, as their use must be considered at the early design stages, allowing design teams to explore their multifunctionality. Therefore, it is important to use a methodology for integrating active solar systems in the building envelope, in order to be able to analyze the potential that these systems have as construction products and to increase the sustainability of the building solutions. So, the main goal of this Research Thesis is to develop a methodology to support the decision-making process in early design stages, based on an assessment of the various – functional, construction-related and formal – integration options considering their performance at different – environmental, economic and social – sustainability levels throughout the building's entire life cycle.

In order to achieve that goal, the methodology was defined based on a critical synthesis that covered the issues of integration and sustainability related to the solar active systems as construction products and to the building envelope performance. This synthesis originated a list of requirements and a set of parameters and indicators that allow guiding and assessing the integration of active solar systems in the building envelope. The methodology was then applied to case studies and, as a result, we were able to verify that it allows considering a series of issues that are usually not addressed. This enables the integration of these systems in a comprehensive and multifunctional manner, while achieving building performance benefits, as well as environmental and social advantages, which may have a positive effect on the economic appraisal. Hence, it was confirmed that exploring the integration of active solar systems during early design stages enables a synergetic use of these systems. These are relevant and decisive aspects, given that the issues related to renewable energy generation, energy efficiency and sustainability will have a growing weight within the scope of design-related decisions.

Keywords: Solar active systems, building envelope, integration, sustainability, project design.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos III
Resumo V
Abstract VII
Índice de figuras XIII
Índice de tabelas XXI
Símbolos, acrónimos e abreviaturas XXV

1 Introdução

1.1 Introdução 1
1.2 Identificação do problema científico 1
1.3 Enquadramento e justificação 4
1.3.1 O consumo energético dos edifícios 4
1.3.2 O recurso solar e os edifícios 11
1.3.3 Política energética, legislação e incentivos 15
1.3.3.1 Solar térmico 16
1.3.3.2 Fotovoltaico 17
1.3.4 Aumento do repertório tecnológico da envolvente 19
1.3.5 Sustentabilidade e ciclo de vida 21
1.3.6 Síntese justificativa 23
1.4 Objetivos do trabalho 24
1.5 Metodologia da investigação 25
1.6 Organização do documento 26

2 Sistemas solares ativos

2.1 Introdução 29
2.2 Coletores térmicos 29
2.2.1 Princípio de funcionamento 29
2.2.2 Constituição, formas de apresentação, aplicações e eficiência 30
2.2.2.1 Coletores de ar 32
2.2.2.2 Placa absorsora 34
2.2.2.3 Coletores planos 37
2.2.2.4 Coletores concentradores parabólicos 41
2.2.2.5 Tubos de vácuo 42

2.2.3 Mercado e indústria 44
2.3 Módulos fotovoltaicos 46
2.3.1 Princípio de funcionamento 46
2.3.2 Constituição, formas de apresentação, aplicações e eficiência 46
2.3.2.1 Módulos cristalinos 53
2.3.2.2 Filmes finos 61
2.3.2.3 Outras tecnologias 64
2.3.3 Mercado e indústria 67
2.4 Sistemas híbridos 69
2.5 Síntese 75

3 A integração de sistemas solares ativos na envolvente dos edifícios – Estado da arte

3.1 Introdução 77
3.2 BIPV, BIST e sustentabilidade – enquadramento geral 77
3.3 Metodologias para a integração arquitetónica de SSA 83
3.3.1 "General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment" 83
3.3.2 "BIPV evaluation benchmark model" 88
3.3.3 "Design methodology for building integration of photovoltaics" 90
3.3.4 "Sistema di valutazione del livello di integrazione fotovoltaica (BIPV.tool)" 93
3.3.5 "Holistic evaluation system for BIPV facades" 95
3.3.6 Síntese 97

4 A integração "vitruviana"

4.1 Introdução 101
4.2 A integração de sistemas solares ativos na envolvente 101
4.2.1 O conceito de integração 101
4.2.2 O subsistema envolvente e os SSA 102
4.3 Critérios para a integração "vitruviana" 108
4.4 Integração energética 110
4.5 Integração multifuncional 114
4.6 Integração construtiva 118
4.6.1 Grau de integração 118
4.6.2 Suporte 121
4.6.3 Controlo 122

4.6.3.1 Proteção climática ... 122
4.6.3.2 Segurança contra incêndio ... 123
4.6.3.3 Higiene e saúde ... 123
4.6.3.4 Segurança ... 124
4.6.3.5 Proteção contra o ruído ... 125
4.6.4 Distribuição ... 126
4.7 Integração formal ... 128
4.8 Síntese dos requisitos e parâmetros de integração "vitruviana" ... 133

5 A integração na perspetiva da sustentabilidade
5.1 Introdução ... 137
5.2 Sustentabilidade ambiental, social e económica ... 137
5.3 Desempenho social ... 139
5.3.1 Acessibilidade ... 140
5.3.2 Adaptabilidade ... 140
5.3.2.1 Estratégias e princípios de avaliação da adaptabilidade em edifícios ... 143
5.3.2.2 Estratégias e parâmetros de avaliação da adaptabilidade na integração de SSA ... 148
5.3.3 Saúde e conforto ... 150
5.3.4 Pressões na vizinhança ... 151
5.3.5 Manutenção ... 152
5.3.6 Segurança e proteção ... 153
5.4 Desempenho ambiental ... 156
5.5 Desempenho económico ... 163
5.6 Síntese dos requisitos e parâmetros de sustentabilidade ... 165

6 Metodologia para a integração de SSA na envolvente de edifícios
6.1 Introdução ... 169
6.2 Categorias e parâmetros de integração ... 169
6.2.1 Síntese dos parâmetros de integração e sustentabilidade ... 169
6.2.2 A relatividade entre parâmetros ... 178
6.3 Processo metodológico ... 179
6.3.1 Objetivo, objeto e fronteira da metodologia ... 179
6.3.2 Faseamento ... 180

6.3.2.1 Determinação da viabilidade da integração dos sistemas (Programa Preliminar) ... 182
6.3.2.2 Geração de variantes e cenários (Programa Base) ... 183
6.3.2.3 Restantes fases ... 185

7 Casos de estudo

7.1 Introdução ... 187
7.2 Caso de estudo 1 – Edifício de serviços ... 187
7.2.1 Caracterização da envolvente ... 188
7.2.2 Caracterização do consumo energético ... 190
7.2.3 Medidas de melhoria da eficiência energética ... 192
7.2.4 Aplicação da metodologia ... 193
7.2.4.1 Determinação da viabilidade da integração dos SSA (Programa Preliminar) ... 193
7.2.4.2 Geração de variantes (Programa Base e Estudo Prévio) ... 197
7.2.4.3 Avaliação das variantes ... 204
7.3 Caso de estudo 2 – Habitação unifamiliar ... 207
7.3.1 Caracterização da envolvente ... 209
7.3.2 Caracterização do consumo energético ... 210
7.3.3 Aplicação da metodologia ... 210
7.3.3.1 Determinação da viabilidade da integração dos SSA (Programa preliminar) ... 210
7.3.3.2 Geração de variantes (Programa Base e Estudo Prévio) ... 212
7.3.3.3 Avaliação das variantes ... 213
7.4 Considerações finais ... 216

8 Conclusão

8.1 Considerações gerais ... 219
8.2 Implicações dos resultados obtidos ... 221
8.3 Desenvolvimentos futuros ... 222

Referências bibliográficas ... 225

Anexo A - Categorias de integração ... i
Anexo B - Caso de estudo 1 - Plantas, cortes e alçados ... xiii
Anexo C - Soluções construtivas correntes e aspetos de integração ... xxi

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Coletor solar térmico adicionado (à esquerda) e integrado (à direita) (Hegger et al., 2008). Na primeira situação, para além do sistema ser dissonante da arquitetura, é necessário recorrer a uma estrutura adicional e ter atenção a certos aspetos tais como a ação do vento ou a impermeabilização da cobertura. 2
Figura 1.2 – Consumo total por tipo combustível (Mtep), a nível mundial, entre 1971 e 2013 (OECD/IEA, 2015b)....4
Figura 1.3 – Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética (à esquerda), e do consumo final de eletricidade (à direita), a nível mundial, por sector de atividade e referente ao ano de 2013 (OECD/IEA, 2015a) 5
Figura 1.4 – Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética, a nível mundial, por sector de atividade económica, entre 1971 e 2013 (OECD/IEA, 2015a)....6
Figura 1.5 - Quota do consumo final de eletricidade a nível mundial, por sector de atividade económica, entre 1971 e 2013 (OECD/IEA, 2015a)....6
Figura 1.6 - Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética (à esquerda), e do consumo final de eletricidade (à direita), na UE-28, por sector de atividade económica e referente ao ano de 2013 (EUROSTAT, 2015b, a)....7
Figura 1.7 - Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética, na UE-28, por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (EUROSTAT, 2015a) 7
Figura 1.8 – Quota do consumo final de eletricidade na UE-28, por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (EUROSTAT, 2015b)....8
Figura 1.9 - Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética (à esquerda) (DGEG, 2015a), e quota do consumo final de eletricidade (à direita) (EUROSTAT, 2015b), em Portugal, por sector de atividade económica e referente ao ano de 2013 8
Figura 1.10 – Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética, em Portugal por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (DGEG, 2015a)....9
Figura 1.11 - Quota do consumo final de eletricidade em Portugal, por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (EUROSTAT, 2015b)....9
Figura 1.12 – Consumo final de energia (tep) em Portugal (DGEG, 2015a)....10
Figura 1.13 – Consumo de eletricidade (ktep) em Portugal (EUROSTAT, 2015b) 10
Figura 1.14 – Radiação solar e potencial de geração de eletricidade na Europa: (A) Radiação global anual incidente numa superfície orientada a sul e com inclinação otimizada; (B) eletricidade gerada anualmente por um sistema fotovoltaico ($1kW_p$) com inclinação otimizada e desempenho de 0.75 (Huld, Müller e Gambardella, 2012)....12
Figura 1.15 – (A) Radiação global anual e (B) eletricidade anual gerada por um sistema fotovoltaico ($1kW_p$) com desempenho de 0.75, no plano horizontal (à esquerda), e com inclinação otimizada (à direita) em Portugal (Huld, Müller e Gambardella, 2012)....13
Figura 1.16 – Superfície equivalente ao consumo nacional de energia primária em 2013 em termos de radiação global anual (à esquerda) e da área necessária à conversão fotovoltaica (à direita) 13
Figura 1.17 – Evolução anual da área (m^2) instalada de coletores solares térmicos em Portugal (DGEG, 2015c)....16

Figura 1.18 – Evolução da potência instalada anualmente (MW) em micro e miniprodução fotovoltaica 18
Figura 1.19 – Variação regional da chaminé: os volumes maciços das chaminés em Alter do Chão, Alentejo (à esquerda) e as formas de coroamento decorativas cilíndricas ou prismáticas no Algarve (Antunes et al., 1998) 19
Figura 1.20 – Incompatibilidade construtiva e formal entre os sistemas solares ativos e o edifício 20
Figura 1.21 – Relação entre as dimensões da integração e da sustentabilidade 22
Figura 1.22 - Processo metodológico de investigação 26
Figura 1.23 – Organização do documento 27
Figura 2.1 – Publicidade do primeiro coletor solar comercializado nos finais do séc. XIX, na Califórnia (EUA) (à esquerda) (UMA Solar, 2013), e ao modelo seguinte comercializado no início do séc. XX (à direita) (Inspectapedia, 2015) 30
Figura 2.2 – Aspeto dos diferentes coletores correntes no mercado e secção esquemática tipo. Da esquerda para a direita: coletor de ar; placa absorsora; coletor plano; coletores concentradores parabólicos compostos (CPC); e tubos de vácuo. 30
Figura 2.3 - Eficiência e tipos de aplicação dos coletores solares térmicos em relação às temperaturas de funcionamento, adaptado de (ADENE et al., 2004, Probst, 2009) 31
Figura 2.4 – Coletor plano adicionado à cobertura com sistema termossifão (à esquerda) e integrado na fachada com circulação forçada (à direita) (Unterrainer, n. d.) 32
Figura 2.5 – Coletor de ar com cobertura em vidro (Solar Home, 2015) 33
Figura 2.6 – Coletor de ar com cobertura em placas de policarbonato (Enerconcept Distribution, n. d.) 33
Figura 2.7 – Esquema do sistema Solarwall numa parede de alvenaria (à esquerda) e exemplo de aplicação no hangar de autocarros Calgary Transit, em Alberta, no Canadá (à direita) (Conserval Engineering, 2015) 33
Figura 2.8 – Esquema da utilização de coletores de ar para aquecimento do ar (à esquerda) e pré-aquecimento do ar num sistema de AVAC (à direita) (Conserval Engineering, 2015). 34
Figura 2.9 – Placa absorsora como revestimento de fachada, edifício CeRN (Centro de serviços das estradas nacionais), em Bursins, na Suiça. Pormenor da fachada, onde é visível a compatibilização do coletor com o circuito solar e os restantes materiais (ISSF, n. d., Service immeubles, n. d.) 34
Figura 2.10 – Sistema de fachada WAF (WAF Fassadensysteme, n. d.) 35
Figura 2.11 – Coletor Eco-Nok integrado como remate de cumeeira (Inventum, 2004) 35
Figura 2.12 – Exemplo de integração do circuito solar num sistema de construção tradicional (Rheinzink, n. d.-b) 36
Figura 2.13 – Coletor solar (absorsor) que também funciona como proteção solar (Farkas et al., 2013) 36
Figura 2.14 – Coletor térmico de baixa temperatura, composto por um circuito solar embebido no acabamento de um isolamento térmico pelo exterior (PSE e iD, 2011) 37
Figura 2.15 – Edifício de habitação e comércio em Zurique, na Suíça, com coletores planos na fachada (Hill, 2015, Kämpfen für architektur, 2011) 37
Figura 2.16 – Centro Operacional da Brisa, Carcavelos (Carrilho da Graça Arquitetos, n. d.) 38
Figura 2.17 – Coletor solar térmico polímero integrado em fachada, conjunto residencial Bjornveien, em Oslo, na Noruega (Archdaily, 2010) 38

Figura 2.18 – Coletor composto por revestimento final de telhas de vidro (SolTech Energy, 2016)....39
Figura 2.19 – Coletores RobinSun com permeabilidade à luz utilizados na fachada num edifício de habitação social em Paris, França (Philippon Kalt, n. d.)....39
Figura 2.20 – Vidros coloridos Kromatix sobre coletores planos como revestimento de fachada na sede do fabricante de coletores Doma (Schweizer, 2016)....39
Figura 2.21 – Coletores semitransparentes (Hermann, Kuhn e Rommel, 2008, Maurer et al., 2012)....40
Figura 2.22 – Diferentes configurações do circuito solar integrado em lamelas de sombreamento (Palmero-Marrero e Oliveira, 2006) 40
Figura 2.23 – Variações da forma dos coletores e do circuito solar e proposta de aplicação (Visa, Comsit e Duta, 2014)....41
Figura 2.24 - A utilização do sistema Sunaitec numa pérgula e como guarda-corpos em varandas (Sunaitec, 2014) 41
Figura 2.25 - Corte esquemático tipo de coletor CPC adaptado a fachada (Carbajal e Pereira, 2008)....42
Figura 2.26 – Vista e esquema do sistema de concentração Fresnel e recetor (elemento azul), e integração na fachada (Chemisana et al., 2013) 42
Figura 2.27 – A utilização de tubos de vácuo como guarda-corpos (Schweizer Energie, 2014)....43
Figura 2.28 - Sistema de fachada com integração de tubos de vácuo (Behling e Volz, n. d.) 44
Figura 2.29 – Esquemas dos painéis de revestimento com tubos de vácuo e a simulação da sua integração num edifício (Caponetto et al., 2013)....44
Figura 2.30 - Células fotovoltaicas (Hegger et al., 2008) 48
Figura 2.31 – Eficiência de células fotovoltaicas em laboratório ao longo do tempo (NREL, 2016)....48
Figura 2.32 - Módulos fotovoltaicos correntes 49
Figura 2.33 - Encapsulamento de módulos cristalinos....49
Figura 2.34 – Efeito de alteração da coloração de células policristalinas através da variação da espessura da camada antirreflexo (Sunways, n. d.) 51
Figura 2.35 – Relação entre a forma da célula e o padrão formado....52
Figura 2.36 – Diferentes padrões definidos pelas células na conformação do módulo (à esquerda) (Weller et al., 2010), módulos personalizados da fachada Green Pix Zero-Energy Media Wall (à direita) (ARUP, 2015)....52
Figura 2.37 – Variação do aspeto das células pelo tipo e localização (frontal ou posterior) dos contactos (SUPSI e ISAAC, 2013) 52
Figura 2.38 – No edifício Platine, na Cité du Design em Saint-Étienne, França, a forma triangular dos módulos fotovoltaicos é idêntica à do revestimento geral da envolvente e de outros elementos técnicos, como grelhas (LIN, 2009) 52
Figura 2.39 - Telhado integrado BIPV (à esquerda), o sistema inclui os remates dos limites da cobertura e de elementos pontuais, como a chaminé, é compatível com coletores térmicos e vãos, possui elementos decorativos com o mesmo acabamento para zonas sem exposição solar, e pode ser utilizado para a cobertura de alpendres através de módulos vidro/vidro (semitransparentes) (EVO, 2012), e telha cerâmica com módulo acoplado (à direita)....53
Figura 2.40 – Cobertura da Umwelt Arena Spreitenbach, revestimento composto por módulos fotovoltaicos cristalinos e coletores térmicos Meyer Burger (Detail, 2012) 54

Figura 2.41 – Exemplo de aplicação de módulos fotovoltaicos como filtragem de luz numa renovação de um edifício de escritórios de 1973 (Phileas, n. d.) 54
Figura 2.42 – Sistemas de proteção solar através de módulos fotovoltaicos (Colt, 2016) 55
Figura 2.43 – Módulos vidro/vido dispostos de forma alternada como proteção solar sobre fachada envidraçada, B.O.C. Bonneshof Office Center, Düsseldorf, Alemanha (Schüco, 2014) 55
Figura 2.44 - Proteção solar da fachada envidraçada da EWE Arena, em Oldenburg, na Alemanha, realizada através de um painel fotovoltaico de grandes dimensões, composto por módulos vidro/vidro, e que segue o movimento do sol (Colt, n.d.) 55
Figura 2.45- Sede da Q-Cells, Bitterfeld, Alemanha, proteção solar através de módulos vidro/vidro e portadas de correr em metal expandido (Colt, n. d.) 56
Figura 2.46 – A integração dos sistemas fotovoltaicos na California Academy of Sciences, em São Francisco, nos EUA, é efetuada na cobertura da galeria perimetral do edifício, recorrendo a células monocristalinas, laminadas em 720 módulos vidro/vidro (ocupam 920 m^2 e produzem 230 000 kWh/ano), os vidros adjacentes repetem o mesmo padrão das células a branco como elemento decorativo (Renzo Piano Building Workshop, n. d.) 56
Figura 2.47 – Telhado revestido com o sistema Sunstyle, em Zweisimmen, na Suiça (à esquerda) e esquema do sistema (à direita) (Sunstyle, n. d.) 57
Figura 2.48 – Cobertura de pavilhões (70 000 m^2) em Perpignan, França, com o sistema Sunstyle, em substituição de um revestimento que continha amianto (Sunstyle, n. d.) 57
Figura 2.49 – Sistema Solesia, módulos fotovoltaicos adaptados às dimensões e encaixes de diversos tipos de telhas, neste caso um revestimento de cobertura da Eternit (ETERNIT, 2015) 58
Figura 2.50 – Telhas de pequena dimensão com células fotovoltaicas acopladas (Industrie Cotto Possagno, n. d.) 58
Figura 2.51 – Sistema "Quick Step Solar PV" da Rheinzink (Rheinzink, 2010) 58
Figura 2.52 – Janela fotovoltaica PVGU desenvolvida por Pythagoras Solar e Guardian Industries (Guardian Industries, 2012). 59
Figura 2.53 – Vidro com padrões gráficos para revestimento final de módulos fotovoltaicos (Nigg, 2015) 59
Figura 2.54 – Células Sphelar (Sphelar, 2016) 60
Figura 2.55 – Concentrador solar transparente que redireciona a radiação solar não visível para os captadores fotovoltaicos laterais (Mourant, 2014) 60
Figura 2.56 – Laminagem de um módulo convencional (à esquerda), montagem de um módulo com contactos posteriores e células PUM (ao centro) e célula convencional "padrão H" e célula PUM (à direita) (Jong, 2008) 61
Figura 2.57 – Estudo de otimização topológica dos elétrodos frontais em diferentes formas de célula (Gupta et al., 2016) 61
Figura 2.58 – Cobertura inclinada de uma água totalmente revestida com módulos fotovoltaicos de filme fino, num edifício de serviços, sede da Marché, em Kemptthal, na Suiça (Schittich, 2009) 62
Figura 2.59 – Sistema de fachada ventilada com módulos de filme fino CIS (Soltecture, n. d.) 62
Figura 2.60 – A transparência dos filmes finos de silício amorfo e a sua utilização numa fachada cortina (Schott, 2013) 62

Figura 2.61 – Revestimento metálico de cobertura e fachada (à esquerda) e tela de impermeabilização (à direta) com filmes finos de silício amorfo acoplados (Rheinzink, n. d.-a) 63
Figura 2.62 - A SRS Energy Solé Power Tile consiste numa telha polimérica que incorpora um módulo fotovoltaico com células silício amorfo (Beachside Solar Technologies, 2016) 63
Figura 2.63 – Protótipo do módulo ""BIPV a-Si through façade", da esquerda para a direita: ligação visual para ângulos inferiores; ligação visual horizontal; ligação visual para ângulos elevados bloqueada (ângulo de incidência do sol nas células de silício amorfo) (Frontini, 2010) 64
Figura 2.64 - SwissTech Convention Center (Richter Dahl Rocha & Associés architectes, n. d.) 64
Figura 2.65 – Projeto Dyscrete, o betão como sistema fotovoltaico (Aden et al., 2015) 65
Figura 2.66 – As "árvores solares" do Pavilhão da Alemanha na Expo Milão 2015 consistiam em estruturas de sombreamento com células orgânicas integradas (Schmidhuber, 2014) 65
Figura 2.67 – Solar Ivy (SMIT, n .d.). 66
Figura 2.68 – Soft House (Kennedy and Violich Architecture, 2013) 66
Figura 2.69 – A fachada do Greenpix Zero Energy Media Wall é composta por módulos quadrados, de vidro e fotovoltaicos vidro/vidro, atrás de cada módulo há um ponto de luz LED, que permite a interação multimédia. A energia utilizada nesta "Media Wall" é fornecida pelo sistema fotovoltaico (Etherington, 2008) 67
Figura 2.70 – Preço dos módulos fotovoltaicos – silício cristalino (c-Si) e filme fino CdTe (IRENA, 2012). 68
Figura 2.71 – Secções longitudinais típicas de coletores PV/T de ar (à esquerda) (Hussain et al., 2013), e módulo PV/T hidráulico (à direita) (Minimize Group, 2015) 69
Figura 2.72 - Aplicação sinergética dos módulos fotovoltaicos na fachada sul do edifício Solar XXI 71
Figura 2.73 – Fachada dupla da biblioteca em Mataró (Roberts e Guariento, 2009) 72
Figura 2.74 - Imagem virtual do *New York Fashion Institute of Technology Student Center* (à esquerda), e instalação piloto no *Syracuse Center of Excellence in Environmental and Energy Systems* (à direita) (CASE, 2016) 73
Figura 2.75 - A "Janela Solar" possui células fotovoltaicas inseridas em lamelas refletoras móveis e refrigeradas por um circuito hidráulico (à esquerda), aplicação experimental da "Janela Solar" em Solgården (à direita) (Davidsson, Perers e Karlsson, 2012) 74
Figura 2.76 – Ilustração esquemática do sistema de cobertura PV/T proposto (á esquerda), vista de uma cobertura de uma água BIPV/T (Yin et al., 2013) 74
Figura 2.77 – Esquema da configuração do sistema e vistas do protótipo (Aelenei, Pereira, Gonçalves, et al., 2014) 75
Figura 3.1 - MIT Solar House I (1939), III (1949) e IV (1959) (MIT Solar Decathlon Team, n. d.) 78
Figura 3.2 – Conjunto residencial em Munique, na Alemanha, com painéis fotovoltaicos e tubos de vácuo integrados na envolvente (1979-1982) (Krippner, 2005, Schoof, 2013) 78
Figura 3.3 – "RhOME for denCity", casa vencedora do Solar Decathlon 2014, entre as várias estratégias adotadas, possuía um dispositivo de sombreamento composto por

módulos fotovoltaicos que permitia a proteção solar de um pátio e respetivas fachadas (Battista et al., 2015, Mitchell, 2014) 79
Figura 3.4 – Edifício de habitação "Aktiv-Stadthaus" em Frankfurt, Alemanha, vencedor do European Solar Prize 2015, na categoria "Arquitetura solar e planeamento urbano", no qual a totalidade da cobertura é composta por módulos fotovoltaicos, assim como grande parte da fachada sul, sendo a energia gerada armazenada em baterias distribuídas pelas várias frações (HHS, n. d.)..... 79
Figura 3.5 – Esquema do processo metodológico (Golić, Kosorić e Furundžić, 2011). 84
Figura 3.6 – Fluxo do processo de projeto 92
Figura 4.1 – Localização para integração dos SSA: cobertura; fachada; e elementos exteriores à envolvente 104
Figura 4.2 - Relação entre os aspetos de integração "vitruviana" e os requisitos básicos da construção (de acordo com a diretiva dos produtos de construção) 110
Figura 4.3 – Módulos fotovoltaicos integrados na fachada inclinada do Albergue Monte Rosa, em Zermatt, na Suiça (à esquerda), e cobertura inclinada que compatibiliza módulos fotovoltaicos, coletores térmicos e iluminação natural na casa Sunlight, em Pressbaum, na Áustria (à direita)..... 111
Figura 4.4 – Pormenor da integração de módulos fotovoltaicos na fachada cortina do edifício da Federação das Indústrias Coreanas, em Seul, na Coreia do Sul..... 111
Figura 4.5 – Radiação solar anual em cobertura (45°) e fachada (90°) e as necessidades de AQS (Matuska e Sourek, 2006)..... 112
Figura 4.6 – Efeito no consumo de energia da integração de sistemas fotovoltaicos semitransparentes em edifícios tropicais (Ng, Mithraratne e Kua, 2013)..... 113
Figura 4.7 – Exemplo de não conformidade na acessibilidade aos sistemas de controlo, patente na localização do registo de ventilação superior no edifício Solar XXI, por este se situar a uma altura superior a 1,20 m (medida entre o nível do piso e o eixo do comando), de acordo com a secção "4.2 Alcance" (Decreto-Lei n.º 163/2006)..... 117
Figura 4.8 – Segregação, incorporação e amálgama. 118
Figura 4.9 – Da esquerda para a direita: coletor plano adicionado à cobertura - segregação; coletor plano incorporado na fachada - incorporação (Hegger et al., 2008); e fachada cortina preenchida por módulos fotovoltaicos cristalinos vidro/vidro – amálgama 118
Figura 4.10 – Sistemas independentes, sistemas sobrepostos e sistemas complementares, segundo (Bonomo, 2012)..... 119
Figura 4.11 – Telhas cerâmicas com células fotovoltaicas acopladas, apesar de garantir a coordenação modular e manter o método construtivo da cobertura, o resultado não possui continuidade formal (Eldridge, 2013) 120
Figura 4.12 – Desempenho acústico de vidros laminados com e sem células cristalinas (Ertex-Solar, n. d.) 126
Figura 4.13 – Na fachada sudoeste do edifício Paul Horn Arena, em Tübingen, na Alemanha, foram utilizadas módulos fotovoltaicos personalizados de modo a integrar cromaticamente a fachada com o relvado adjacente, para tal foi utilizado um substrato branco e células policristalinas de cor verde (SUPSI e ISSAC, 2013)..... 129
Figura 4.14 – Painel informativo no Castelo de San Giorgio em La Spezia, na Itália, composto por quatro módulos fotovoltaicos de filme fino que alimentam a sua iluminação noturna, através do tipo célula e das suas características foi possível integrar uma nova tecnologia num contexto histórico protegido (PVACCEPT, n. d.)..... 130

Figura 4.15 – Esquema de instalação parcial correta no que respeita à continuidade e disposição geométrica dos elementos de cobertura (GSE Gestore dei Servizi Energetici, 2012) 131
Figura 4.16 – Matriz de seis níveis para a integração de sistemas fotovoltaicos permeáveis à luz (Baum, 2011) 132
Figura 5.1 – Plantas com diferentes configurações para a mesma área, vista e alçado do bloco de habitação no Weissenhofsiedlung (Kirsch, 2013) 144
Figura 5.2 – Conjunto residencial Lohbach, vista geral e pormenor da fachada (em cima), planta do piso tipo (em baixo, à esquerda) e com os elementos estruturais assinalados (em baixo, à direita) - o edifício possui os acessos no centro, as instalações (cozinhas e quartos de banho) formam um 1º anel ao seu redor, as salas e os quartos um 2º anel, e a fachada um 3º anel (no qual as portadas uniformizam o exterior do conjunto) - esta configuração permite facilmente reconfigurar os apartamentos, ou reconverter o edifício, pela concentração dos elementos estruturais, das instalações e dos acessos (Baumschlager Eberle, 2000, Nextroom, 2003) 144
Figura 5.3 - O enquadramento da adaptabilidade nas questões de durabilidade, adaptado de Nielsen (2010) 145
Figura 5.4 - Os subsistemas no sector imobiliário de edifícios de escritórios (Duffy, 1998) 147
Figura 5.5 – Custo acumulado das mudanças num edifício de escritórios num período de 50 anos (Brand, 1994) 147
Figura 5.6 – *Payback* energético (EPBT) de sistemas fotovoltaicos em cobertura, estimado a partir de Inventários de Ciclo de vida em termos de produção e instalação na Europa, considerando uma irradiação de 1700 kWh/m^2/ano e um desempenho de 0.75 (Frischknecht et al., 2015a) 159
Figura 5.7 – *Payback* energético (EPBT) de sistemas fotovoltaicos em cobertura, estimado a partir de informação de Inventários de Ciclo de vida (LCI) não disponíveis publicamente para a produção e instalação europeia, baseado numa irradiação de 1700 kWh/m^2/ano e um desempenho de 0.75 (Frischknecht et al., 2015a) 159
Figura 5.8 – Módulos cristalinos com células feitas a partir de desperdício de silício integrados na fachada do edifício "Solaire", em Nova Iorque, nos EUA (Epstein, 2008) 160
Figura 6.1 – Relação entre as dimensões de integração "vitruviana", os "requisitos básicos das obras de construção" e a "sustentabilidade das obras de construção" 170
Figura 6.2 – Relação das categorias de integração com os indicadores 176
Figura 6.3 – Fases iniciais da integração de SSA na envolvente do edifício 181
Figura 7.1 – Vista aérea da implantação do edifício (Google, 2016) 188
Figura 7.2 – Vista da fachada poente (Corpo A) e gaveto de ligação ao Corpo B (sul) 189
Figura 7.3 – Vista do topo norte e fachada poente (à esquerda) e vista do remate a nordeste com o edifício adjacente (à direita) 189
Figura 7.4 – Vista do interior do quarteirão, alçado norte/noroeste (à esquerda), e alçado nascente (à direita) 190
Figura 7.5 – Instalação fotovoltaica existente 192
Figura 7.6 – Superfícies e elementos da envolvente com potencial de integração de SSA (identificados a amarelo) 196
Figura 7.7 - Possibilidade de integração de SSA na cobertura através da adição de um elemento arquitetónico (fotomontagem) 197
Figura 7.8 – Proposta A (fotomontagem) 199

Figura 7.9 – Proposta B (fotomontagem) 200
Figura 7.10 – Proposta C (fotomontagem) 200
Figura 7.11 – Proposta A - corte zona opaca e vãos (escala 1/50) 201
Figura 7.12 – Proposta B - corte zona opaca e vãos (escala 1/50) 202
Figura 7.13 - Proposta C corte zona opaca e vãos (escala 1/50) 203
Figura 7.14 – Relação entre os indicadores de integração das 3 variantes 207
Figura 7.15 – Vista da frente de rua (imagem virtual) 208
Figura 7.16 – Evolução da tipologia T3 para T4 através da ocupação do terraço 208
Figura 7.17 – Axonometrias, plantas e cortes das 3 tipologias 209
Figura 7.18 – Superfície da cobertura inclinada existente SSA (identificada a amarelo) 212
Figura 7.19 – Relação entre os indicadores de integração das 3 variantes (a Proposta A e a Proposta B são coincidentes) 216
Figura C.1 - Módulos fotovoltaicos inseridos em fachada cortina montante-travessa, da esquerda para a direita: filme fino translúcido, filme fino (revestimento opaco); células cristalinas afastadas entre si permitindo a passagem de luz; e células cristalinas (revestimento opaco)……..……..……..……xxvi

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Média mensal da radiação global (Wh/m^2/dia) em localizações específicas e diferentes inclinações, com orientação sul (JRC-IET, 2015).....14
Tabela 2.1 – Aplicações típicas dos coletores solares térmicos correntes, adaptado de (ADENE et al., 2004, Probst, 2009) 31
Tabela 2.2 – Tipos e características das células fotovoltaicas correntes, adaptado de (DGS, 2004, IEA-ETSAP e IRENA, 2013).....47
Tabela 2.3 – Possibilidades de classificação dos SSA em relação à integração na envolvente, adaptado de Zhang et al. (2015).....76
Tabela 3.1 – Conjunto de critérios para a avaliação do "Potencial do edifício" 85
Tabela 3.2 – Critérios para a avaliação das variações da integração de coletores térmicos.....87
Tabela 3.3 – Indicadores e fatores de avaliação da integração de sistemas fotovoltaicos (Yu et al., 2009). 89
Tabela 3.4 – Pontuação dos diferentes níveis (BI) e (PVI). 89
Tabela 3.5 – Modo de cálculo dos indicadores 90
Tabela 3.6 – Critérios e respetiva valorização 91
Tabela 3.7 – Classes de integrabilidade e respetivos critérios 93
Tabela 3.8 – Requisitos de valoração de um critério da "Classe de Integrabilidade morfológico-figurativa" 94
Tabela 3.9 – Critérios principais e individuais.....95
Tabela 3.10 – *Checklist* do critério individual "Referência a outros componentes do edifício".....96
Tabela 3.11 – Determinação dos valores para a avaliação da fachada.....97
Tabela 3.12 - Categorias a que pertencem os critérios das metodologias analisadas.....98
Tabela 4.1 - Subsistemas do edifício, adaptado da norma ISO 6241 "Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered" (ISO, 1984).....103
Tabela 4.2 - Influência da inclinação e orientação do edifício e a radiação solar, valores anuais 104
Tabela 4.3 - Subcategorias funcionais da envolvente (2006).....106
Tabela 4.4 - Diferenças entre coletores térmicos e módulos fotovoltaicos, adaptado de Probst (2009).....107
Tabela 4.5 – Integração energética.....114
Tabela 4.6 – Algumas possibilidades multifuncionais dos SSA na envolvente.....115
Tabela 4.7 – Integração multifuncional.....116
Tabela 4.8 – Requisitos de acessibilidade na utilização.....117
Tabela 4.9 – Grau de integração.....121
Tabela 4.10 – Integração construtiva – suporte (resistência mecânica e estabilidade) 122
Tabela 4.11 – Proteção climática 122
Tabela 4.12 – Segurança contra incêndio.....123
Tabela 4.13 – Higiene e saúde 124
Tabela 4.14 – Segurança 125
Tabela 4.15 – Proteção acústica 125
Tabela 4.16 – Integração construtiva - distribuição 127
Tabela 4.17 – Componentes dos sistemas fotovoltaicos e térmicos, adaptado parcialmente de Bonomo (2012).....127
Tabela 4.18 – Características SSA, adaptado parcialmente de Bonomo (2012) 131

Tabela 4.19 – Integração formal 133
Tabela 4.20 – Lista de requisitos para a integração de SSA na envolvente 134
Tabela 4.21 – Categorias e parâmetros de integração dos SSA na envolvente 135
Tabela 5.1 – Informação de ciclo de vida do edifício 138
Tabela 5.2 – Valores indicativos do tempo de vida útil do projeto (IPQ, 2009a) 142
Tabela 5.3 – Vida útil dos produtos da construção em função da vida útil da construção (EOTA, 1999) 142
Tabela 5.4 – Vidas úteis mínimas de componentes para vidas úteis dos edifícios baseadas na sua acessibilidade para manutenção (ISO, 2000) 143
Tabela 5.5 – Os subsistemas e a sua vida útil no sector imobiliário de edifícios de escritórios 146
Tabela 5.6 – Parâmetros de avaliação de adaptabilidade 150
Tabela 5.7 – Saúde e conforto 151
Tabela 5.8 – Pressões na vizinhança 152
Tabela 5.9 - Manutenção 153
Tabela 5.10 – Parâmetros na integração de SSA 155
Tabela 5.11 – Indicadores ambientais 156
Tabela 5.12 – Aspetos relacionados com os SSA ao longo do ciclo de vida 157
Tabela 5.13 – Requisitos ambientais de integração de SSA 162
Tabela 5.14 – Parâmetros ambientais de integração de SSA 162
Tabela 5.15 – Desempenho económico ao longo do ciclo de vida 163
Tabela 5.16 – Parâmetros económicos na integração de SSA 164
Tabela 5.17 – Síntese dos requisitos da sustentabilidade das obras de construção 165
Tabela 5.18 – Síntese dos parâmetros da sustentabilidade das obras de construção 166
Tabela 6.1 – Cruzamento dos parâmetros de integração "vitruviana" e de sustentabilidade 170
Tabela 6.2 – Categorias de integração e respetivos parâmetros (descrição detalhada no Anexo A) 173
Tabela 6.3 – Indicadores de integração e as categorias e os parâmetros que os definem 176
Tabela 6.4 – Requisitos para a integração de SSA na envolvente 177
Tabela 6.5 – Exemplo do tipo de informação preliminar 182
Tabela 6.6 – Modo de avaliação das soluções com base nos parâmetros de integração 184
Tabela 6.7 – Fases de projeto e etapas 185
Tabela 7.1 – Consumo de energia (kWh) 191
Tabela 7.2 – Custo e impacto das medidas propostas 193
Tabela 7.3 – Programa funcional do edifício 194
Tabela 7.4 – Características do local 194
Tabela 7.5 – Radiação global mensal no local do edifício, 40°11'42''Norte, 8°25'15 Oeste, com défice de irradiação anual devido ao sombreamento (horizontal) de 0,1% (PVGIS, 2010) 195
Tabela 7.6 – Condicionantes regulamentares 195
Tabela 7.7 – Superfícies e elementos existentes disponíveis 196
Tabela 7.8 – Possibilidade da integração através de novos elementos arquitetónicos 197
Tabela 7.9 - Potencial de integração de SSA e estimativas brutas de produção energética (período anual) 198
Tabela 7.10 – Resultados da avaliação das propostas (avaliação detalhada no Desdobrável 1) 204
Tabela 7.11 – Resultado dos indicadores de integração para cada variante 206
Tabela 7.12 – Programa funcional do edifício 211
Tabela 7.13 – Características do local 211

Tabela 7.14 – Condicionantes regulamentares.....211
Tabela 7.15 – Superfície da cobertura inclinada existente.....212
Tabela 7.16 - Potencial de integração de SSA e estimativas brutas de produção energética (período anual).....212
Tabela 7.17 – Resultados da avaliação das propostas (avaliação detalhada no Desdobrável 2).....213
Tabela 7.18 – Resultado dos indicadores de integração para cada variante.....215
Tabela 8.1 - Categorias a que pertencem os critérios das metodologias analisadas no Capítulo 3 e da metodologia proposta.....220
Tabela C.1 – Soluções construtivas correntes com integração de SSA…….xxi

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AQS	Águas quentes sanitárias
a-Si	Silício amorfo (células fotovoltaicas de filme fino)
BAPV	*Building-added Photovoltaics* – Sistemas fotovoltaicos adicionados ao edifício
BAST	*Building-added Solar Thermal* – Sistemas térmicos adicionados ao edifício
BIPV	*Building-integrated Photovoltaics* – Sistemas fotovoltaicos integrados no edifício
BIPV/T	*Building-integrated Photovoltaic and Thermal* – Sistemas híbridos integrados no edifício
BIST	*Building-integrated Solar Thermal* - Sistemas térmicos integrados no edifício
BOS	*Balance of System* – conjunto de todos os componentes de um sistema fotovoltaico
CdTe	Telureto de Cádmio (células fotovoltaicas de filme fino)
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio (células fotovoltaicas de filme fino)
CPC	Coletores térmicos concentradores parabólicos compostos
c-Si	Silício cristalino (células fotovoltaicas mono e policristalinas)
DAP	Declaração Ambiental de Produto
EPBT	*Energy Payback Time* – Período de retorno de energia
ERF	*Energy Return Factor* – Fator de retorno de energia
FER	Fontes de Energia Renovável
IEA	*International Energy Agency* – Agência Internacional de Energia
NZEB	*Nearly Zero Energy Building* – Edifício de balanço energético quase nulo
OECD	*Organisation for Economic Co-operation and Development* - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCM	*Phase-Change Material* – Materiais de mudança de fase
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PV	*Photovoltaics* – Sistemas fotovoltaicos
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SSA	Sistemas Solares Ativos
ST	*Solar-Thermal* – Sistemas solares térmicos
EU 28	Os 28 países que compõem a União Europeia

CO_2 equiv	Equivalência em dióxido de carbono - medida internacional que expressa a quantidade de gases de efeito estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono, é usada para comparar as emissões de diversos gases de efeito estufa baseado na quantidade de dióxido de carbono que teria o mesmo potencial de aquecimento global (PAG), medido em um período de tempo especificado (geralmente 100 anos).
tep	Tonelada equivalente de petróleo - unidade de energia definida como o calor libertado na combustão de uma tonelada de petróleo cru, aproximadamente 42 gigajoules. Como o valor calórico do petróleo cru depende de sua exata composição química, que admite bastante variação, o valor exato da *tep* deve ser definido por convenção, a IEA/OECD define 1 tep como 41,868 GJ ou 11,630 MWh.
Wh	Watt-hora - quantidade de energia utilizada para alimentar uma carga com potência de um watt pelo período de uma hora (1 Wh é equivalente a 3,6×103 J =3,6 kJ =3600 J).
Wp	Watt-pico - medida de potência energética. Como as condições de produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos dependem de fatores externos, o valor de referência é dado em kWp e obtido em condições de teste standard (uma irradiação de 1000 W/m², à temperatura de 25 °C e uma massa de ar AM 1,5).
W_{th}	Watt-térmico - o watt térmico refere-se à energia térmica produzida.

1
INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo visa a identificação do problema científico, o enquadramento e justificação da sua pertinência, a descrição dos objetivos e dos métodos utilizados para os atingir e, finalmente, uma síntese do modo como se traduziu este processo na organização do documento.

1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA CIENTÍFICO

No mundo ocidental contemporâneo, o crescimento acelerado da consciência relativa à utilização de fontes de energia renovável (FER) e às questões de eficiência energética dos edifícios, assim como a sua tradução na regulamentação aplicável ao edificado, implicam, direta e indiretamente, a utilização de sistemas solares ativos (SSA) – módulos fotovoltaicos e coletores solares térmicos – de modo a cumprir os requisitos e objetivos estabelecidos. Este cenário verifica-se na regulamentação atual, nomeadamente no Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) (Decreto-Lei n.º 118/2013), de forma direta, através da imposição generalizada de sistemas solares térmicos para o aquecimento de águas sanitárias e, de forma indireta, através do objetivo futuro de balanço energético nulo dos edifícios. Paralelamente a esta "pressão" regulamentar, alguns países, entre os quais Portugal, também disponibilizam meios de incentivo à aplicação deste tipo de sistemas. No entanto, esta intenção de provocar uma mudança célere ao nível do desempenho energético dos edifícios não é acompanhada pela atividade de projeto de uma forma abrangente. Relativamente aos SSA, na maioria das vezes, estes apenas são considerados em fases finais de projeto e, consequentemente, adicionados ao edifício pré-concebido cumprindo unicamente uma função: a geração de energia. Neste sentido, apesar do contributo como fonte de energia renovável, a sua utilização gera constrangimentos em termos funcionais, construtivos e formais. A integração dos sistemas solares ativos como componentes de construção pode contribuir para atenuar estes constrangimentos, pois implica a previsão dos sistemas no início da conceção, explorando a sua multifuncionalidade, em detrimento da simples aplicação tardia sobre o edifício previamente definido (Figura 1.1).

Neste contexto, nos últimos anos tem-se assistido a uma dedicação cada vez maior da comunidade científica à investigação da integração multifuncional dos SSA em edifícios, e mais recentemente na avaliação dessa integração no âmbito da sustentabilidade. Todavia, verifica-se que as avaliações de sustentabilidade são orientadas para a vida útil[1] dos sistemas e não para a vida útil do edifício. Verifica-se também que, apesar da crescente divulgação das estratégias de integração destes sistemas

[1] Período de tempo após a instalação durante o qual um edifício ou as suas partes satisfazem ou excedem os requisitos de desempenho, segundo definição apresentada na "Norma ISO 15686 Planeamento da vida útil" (ISO, 2000).

nos edifícios, não existe uma relação entre as estratégias e os indicadores de sustentabilidade que sirva de orientação à conceção, o que faria sentido pela importância que a geração de energia renovável geralmente assume numa avaliação de sustentabilidade.

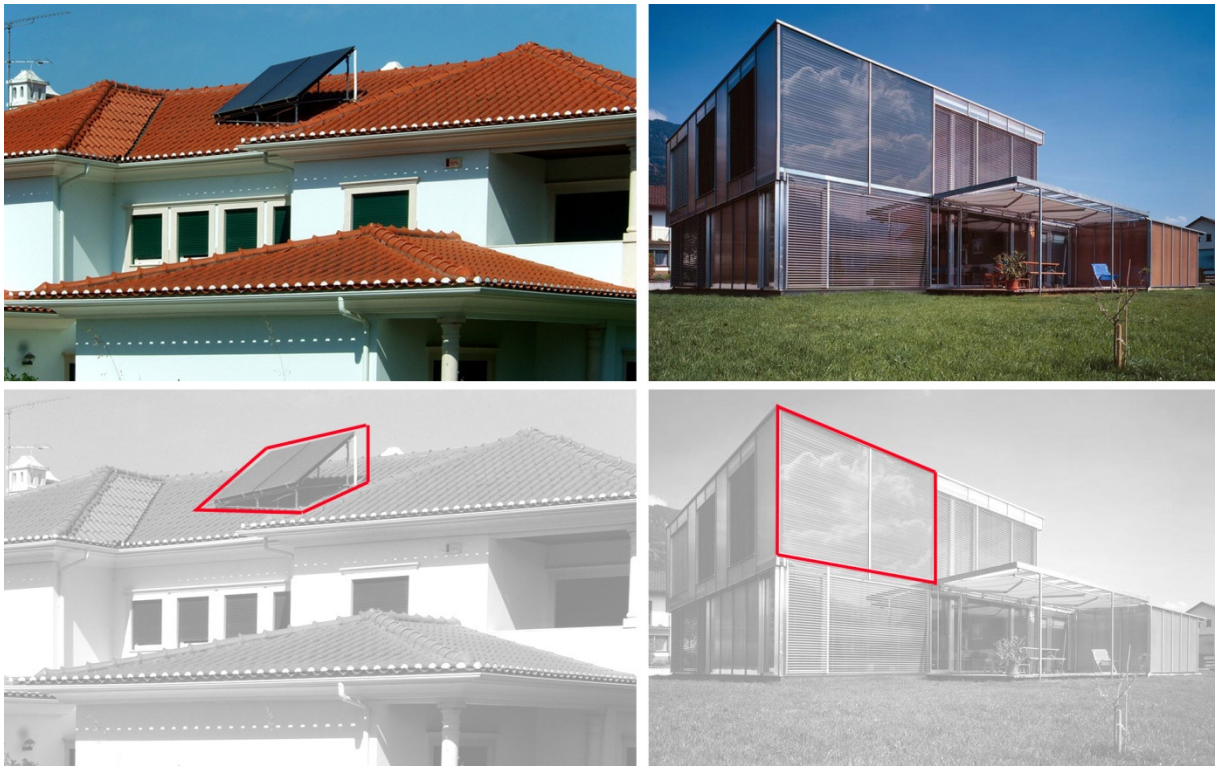


Figura 1.1 – Coletor solar térmico adicionado (à esquerda) e integrado (à direita) (Hegger et al., 2008). Na primeira situação, para além do sistema ser dissonante da arquitetura, é necessário recorrer a uma estrutura adicional e ter atenção a certos aspetos tais como a ação do vento ou a impermeabilização da cobertura.

Deste modo, a presente Tese de Investigação tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão na fase de conceção, através da verificação das opções de integração - funcional, construtiva e formal - no desempenho relativo às várias dimensões da sustentabilidade - ambiental, económica e social - ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, destinada à prática de projeto de pequena e média dimensão. Pretende-se assim centrar a questão da integração na atividade de projeto e na vida útil do edifício através da perspetiva de sustentabilidade e dos domínios em que esta se repercute. Face a este enunciado, apresentam-se e delimitam-se os conceitos base pertinentes para a Tese, designadamente: sistemas solares ativos; integração; e sustentabilidade.

a) Sistemas solares ativos

Consideram-se como sistemas solares ativos os componentes construtivos não tradicionais que possuem a capacidade de gerar energia através da radiação solar. Denominam-se ativos por oposição aos sistemas passivos, devido à necessidade da utilização de dispositivos eletrónicos ou mecânicos na captação, armazenamento e distribuição da radiação solar. Os sistemas solares ativos dividem-se em dois grandes grupos: sistemas fotovoltaicos e sistemas térmicos. Os sistemas fotovoltaicos geram eletricidade a partir da radiação solar através de semicondutores. Os sistemas solares térmicos absorvem a radiação solar e convertem-na em calor, através de um absorsor que se comporta como um corpo negro. A sua aplicação mais comum é no aquecimento de águas sanitárias, sendo também

utilizados para aquecimento, arrefecimento e calor de processo industrial. Existem também sistemas híbridos onde as características dos dois sistemas, fotovoltaicos e térmicos, são usadas de forma complementar na produção dos dois tipos de energia: elétrica e térmica. No âmbito do presente trabalho, os sistemas solares ativos são abordados no contexto da potencial utilização e integração em edifícios. Neste sentido, são excluídas as tecnologias solares ativas que não permitem essa utilização, como os sistemas destinados a centrais térmicas ou fotovoltaicas de grande escala.

b) Integração

A integração é entendida como a inclusão de elementos na formação de um sistema. Possui como qualidades os princípios de Vitrúvio (2009): *utilitas, firmitas* e *venustas*. Ou seja, a integração consiste na inclusão de elementos ou componentes num sistema, cumprindo requisitos funcionais, construtivos e formais. A integração é tida como uma mais-valia na procura de sinergias entre os vários subsistemas e componentes que compõem um sistema, otimizando as relações, evitando redundância e resultando em algo maior que a soma das partes. Na literatura, as dimensões construtiva e formal surgem muitas vezes traduzidas de diferentes formas. Para efeitos do presente trabalho, opta-se pelo termo "integração construtiva" em detrimento de "integração técnica", uma vez que a construção consiste na execução de um projeto previamente elaborado e, como tal, contempla a técnica, entendida como o domínio de um procedimento ou conjunto de procedimentos para obter um determinado resultado. Também se opta por "formal" em detrimento de "estética" ou "visual", uma vez que o termo refere-se à forma, ou seja, à aparência independente do conteúdo (remetendo para a definição em Lógica, na qual o termo "formal" diz respeito às relações estruturais entre elementos, independentemente do conteúdo), enquanto a "estética" apesar de também ser aplicada à harmonia das formas e cores, é um ramo da filosofia cujo objeto é o juízo de valores referente à distinção entre o belo e o feio. Deste modo, da dimensão estética, apenas interessam os aspetos formais ou técnico-formais, sendo excluídas a dimensão simbólica e a contextualização da forma na história da arquitetura. A integração "vitruviana" é balizada através dos "Requisitos básicos das obras de construção", de acordo com o "Regulamento europeu dos produtos de construção" (Regulamento UE N.º 305/2011).

c) Sustentabilidade

Nas últimas décadas tem vindo a tornar-se progressivamente inquestionável que a construção e o desempenho dos edifícios devem ser avaliados em termos de sustentabilidade. As avaliações de sustentabilidade têm ganho cada vez mais importância, a par de uma contínua melhoria da sua validade, como é exemplo a consideração de todo o ciclo de vida do edifício em detrimento de uma análise parcial, limitada à fase de utilização. A abordagem à sustentabilidade é assim efetuada em função da normalização europeia relativa à "Sustentabilidade das obras de construção" (CEN, 2010a), elaborada pela comissão técnica "CEN/TC 350 - *Sustainability of construction works*", que tem por base a normalização internacional. Parte-se da normalização, por oposição a outros sistemas de avaliação de sustentabilidade, uma vez que esta visa um grau de ordem internacional e uma utilização comum e repetida. O recurso à normalização da sustentabilidade das obras de construção garante também a avaliação do desempenho de uma forma abrangente, designadamente através das dimensões social, ambiental e económica, assim como a sua contextualização na vida útil do edifício (correntemente, aquando da instalação de sistemas solares ativos num edifício, recorre-se maioritariamente a um balanço económico simples). Salienta-se que o propósito da presente Tese não visa substituir uma avaliação de sustentabilidade. Nesse sentido, não quantifica a fundo a totalidade das questões inerentes à avaliação de sustentabilidade, mas apenas as questões relativas à especificidade da integração de sistemas solares ativos na envolvente dos edifícios.

1.3 ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO

A necessidade de uma abordagem metodológica que vise a integração de sistemas solares ativos em coberturas e fachadas, numa perspetiva de sustentabilidade, deve-se a vários fatores de origem e importância diversas, mas interdependentes. Estes fatores incluem a questão base enunciada previamente, assim como outros aspetos que lhe são transversais. Sintetiza-se e agrupa-se o conjunto destes fatores nos seguintes temas:

- O consumo energético dos edifícios;
- O recurso solar e os edifícios;
- Política energética, legislação e incentivos;
- Aumento do repertório tecnológico da envolvente;
- Sustentabilidade e ciclo de vida.

1.3.1 O CONSUMO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS

Uma das principais razões para a investigação nesta área prende-se com o consumo energético, designadamente com a necessidade da sua redução, da utilização eficiente de energia e da produção de energia a partir de fontes renováveis.

Atualmente, o consumo e a disponibilidade dos recursos energéticos são questões incontornáveis a nível mundial. As necessidades energéticas encontram-se num registo crescente e a sua satisfação assenta maioritariamente em fontes de energia fóssil (Figura 1.2), ou seja, fontes de energia cuja exploração segundo os níveis e padrões de consumo atuais associados às necessidades crescentes das economias emergentes de elevada população, considerados sem alteração num modelo "business as usual", levarão num futuro próximo ao consumo total das reservas conhecidas. Além da questão da disponibilidade dos recursos, a produção e o consumo de energia com origem em fontes fósseis tem consequências ambientais que, apesar do contínuo melhoramento da eficiência destes processos, não as viabiliza como fontes limpas e sustentáveis.

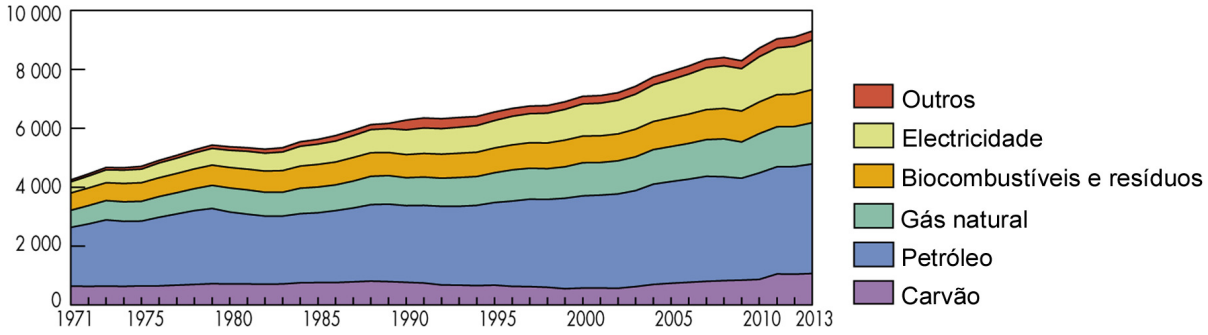


Figura 1.2 – Consumo total por tipo combustível (Mtep), a nível mundial, entre 1971 e 2013 (OECD/IEA, 2015b)

No mundo ocidental a generalidade das necessidades energéticas é assegurada por recursos não renováveis como o petróleo, o carvão e o gás. Em Portugal, estes recursos são escassos, originando uma elevada dependência energética do exterior (80% a 90% do total de energia consumida), nomeadamente da importação de fontes primárias de energia fóssil. Como alternativa, o recurso às

FER e a medidas de eficiência energética tem vindo a tornar-se uma prioridade. Desde 2010 que a dependência energética se situa abaixo dos 80%, tendo representado 73,9% do consumo total de energia em 2013 (DGEG, 2015b). Alguns autores, como Scheer (2005), defendem que a mudança associada à utilização de energia com origem em FER resolverá potencialmente alguns dos problemas políticos, económicos e sociais existentes. Esta visão tem alguma pertinência, sobretudo, ao associar a mudança à independência energética, pois a disponibilidade das FER é generalizada em comparação com as fontes de energia fóssil, cujas reservas conhecidas existem apenas em locais específicos.

Esta é uma transição lenta, em parte porque o presente modelo político, económico e social é fruto do desenvolvimento da sociedade industrial, cuja origem é intrínseca ao início da escalada da exploração, distribuição e consumo de energia com base em fontes de energia fósseis. Por outro lado, uma transição rápida do modelo atual para a utilização generalizada de energia com origem em FER seria inviável, pois implicaria grandes modificações nos sistemas, nas infraestruturas e na gestão da energia, além de que algumas tecnologias para utilizações de grande escala necessitam de amadurecimento e da confiança dos investidores, assim como é necessário conhecer o *mix* ótimo que garanta a disponibilidade e a satisfação da procura energética em conjugação com o contexto económico. Não sendo a rutura um cenário imediato e provável, existem todavia metas concretas e progressivas a atingir. Neste contexto, os edifícios possuem um papel importante, uma vez que são responsáveis por uma parte considerável do consumo de energia ao longo do seu ciclo de vida. Durante a fase de operação, são responsáveis por sensivelmente 1/3 do consumo total de energia (sendo os restantes 2/3 da responsabilidade dos sectores da indústria e dos transportes) e cerca de 50% do consumo total de eletricidade. Adicionalmente são também responsáveis, na fase de construção, por grande parte do consumo de matérias-primas extraídas da Terra, assim como da criação de resíduos de construção/demolição.

A nível mundial, em 2013 (ano referente às últimas estatísticas disponíveis), os edifícios - representados pelos sectores da habitação, comércio e serviços públicos - foram responsáveis por 34% do consumo total final de energia e por 49% do consumo total final de eletricidade (Figura 1.3) (OECD/IEA, 2015a).

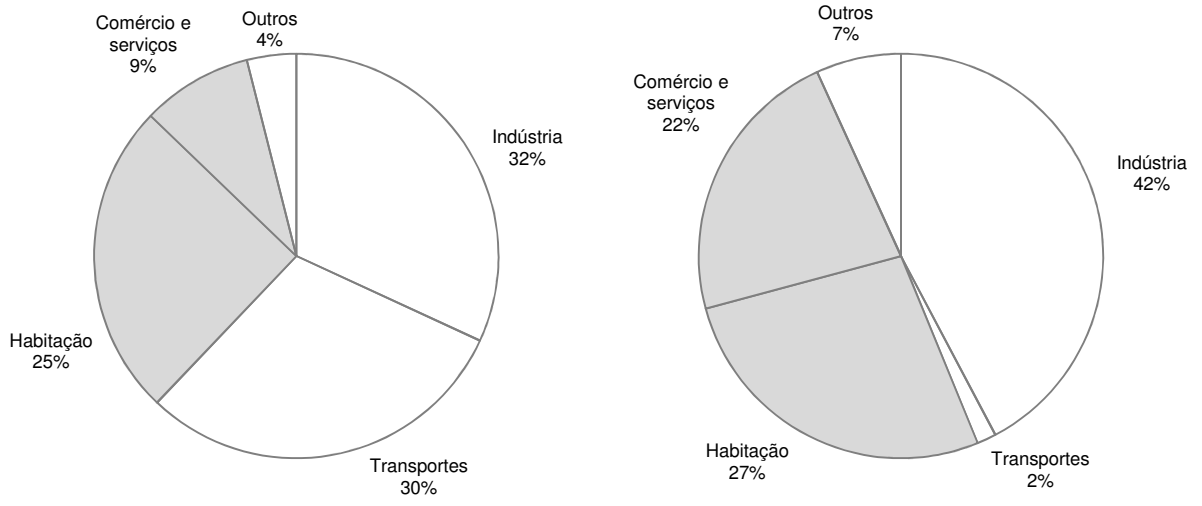


Figura 1.3 – Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética (à esquerda), e do consumo final de eletricidade (à direita), a nível mundial, por sector de atividade e referente ao ano de 2013 (OECD/IEA, 2015a)

Na Figura 1.4 é possível constatar que esta ordem de grandeza (cerca de 1/3 do consumo total de energia) foi sensivelmente constante nos últimos 40 anos, num contexto em que o consumo mundial total de energia permaneceu em constante crescimento (Figura 1.2). No que respeita ao consumo de eletricidade, verifica-se um aumento de 38% para 49% entre 1971 e 2013 (Figura 1.5).

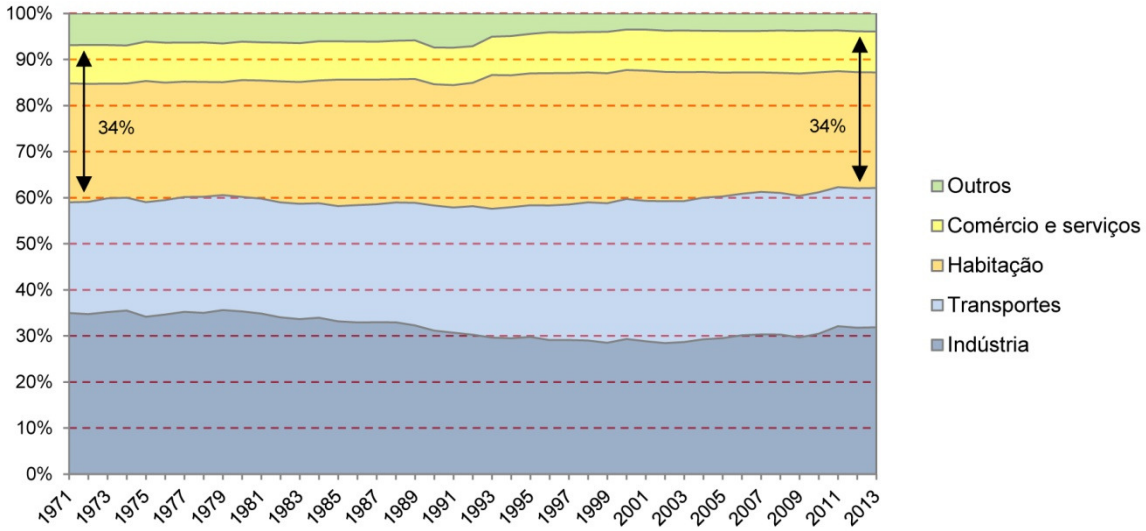


Figura 1.4 – Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética, a nível mundial, por sector de atividade económica, entre 1971 e 2013 (OECD/IEA, 2015a)

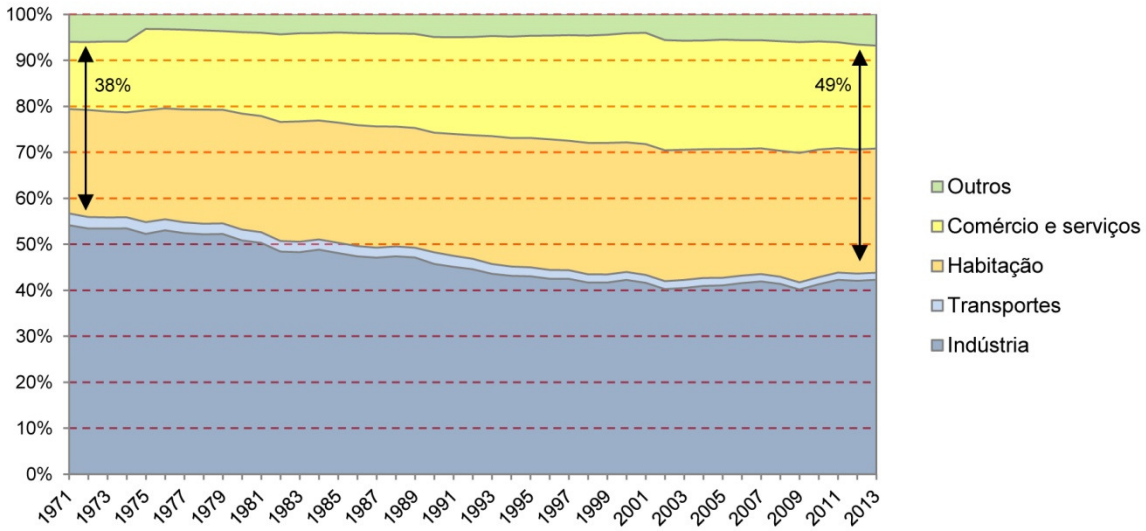


Figura 1.5 - Quota do consumo final de eletricidade a nível mundial, por sector de atividade económica, entre 1971 e 2013 (OECD/IEA, 2015a)

Na União Europeia a 28, o peso relativo dos edifícios é semelhante ao verificado no cenário mundial, correspondendo a 41% do consumo total final de energia e a 60% do consumo total final de eletricidade (Figura 1.6) (EUROSTAT, 2015b, a).

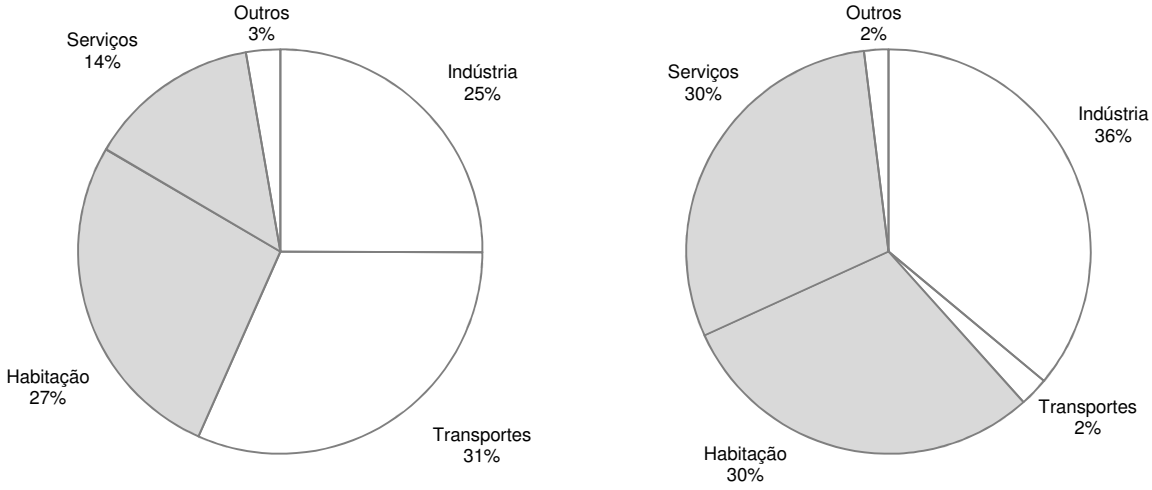


Figura 1.6 - Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética (à esquerda), e do consumo final de eletricidade (à direita), na UE-28, por sector de atividade económica e referente ao ano de 2013 (EUROSTAT, 2015b, a)

Em termos históricos, entre 1990 e 2013, o consumo de energia associado aos edifícios aumentou de 36% para 41%, sendo que parte considerável do crescimento é relativo ao sector dos serviços (Figura 1.7).

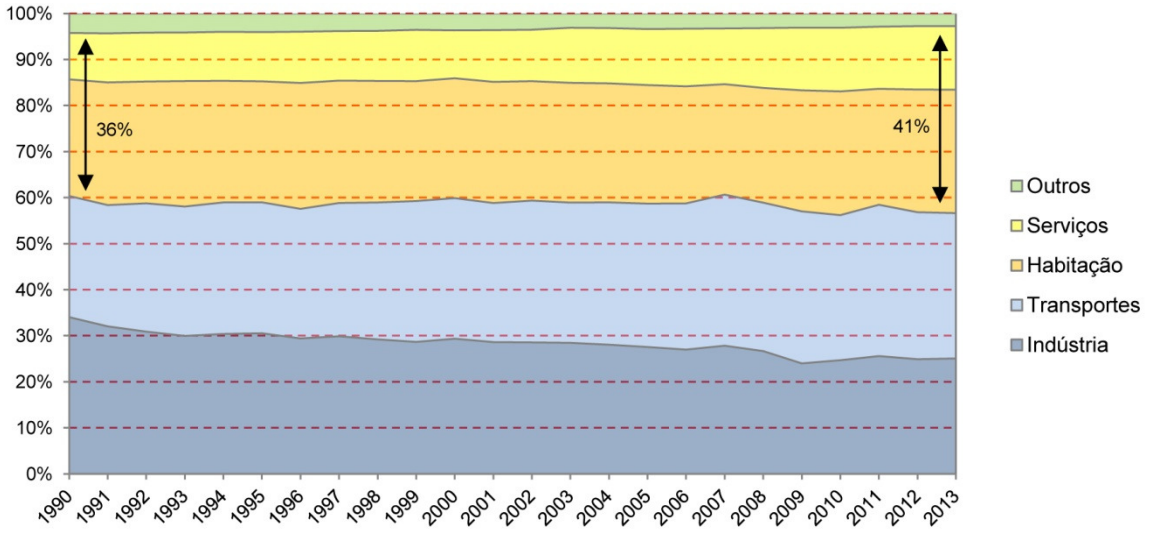


Figura 1.7 - Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética, na UE-28, por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (EUROSTAT, 2015a)

No mesmo período, o consumo de eletricidade também aumentou, de 48% para 60%, com maior destaque no sector dos serviços, que igualou o da habitação (Figura 1.8).

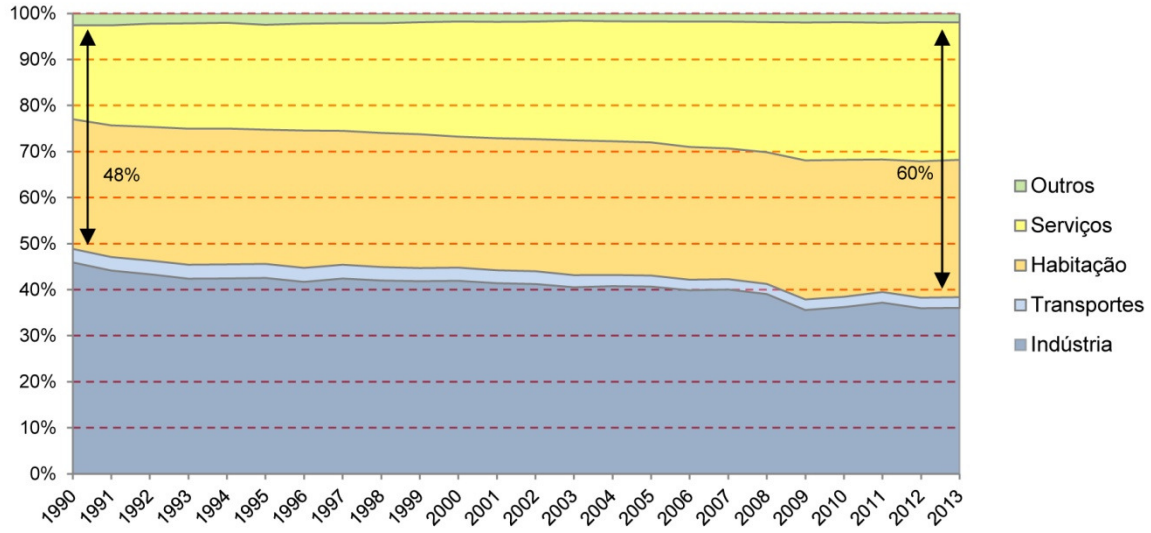


Figura 1.8 – Quota do consumo final de eletricidade na UE-28, por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (EUROSTAT, 2015b)

No entanto, em termos absolutos, e ao contrário da tendência de aumento constante a nível mundial, após um crescimento do consumo total de energia na EU-28, este manteve-se estável entre 2003 e 2008, decresceu em 2009 (em função da crise económica), permaneceu instável nos dois anos consequentes, e estabilizou em queda ligeira em 2012 e 2013 (EUROSTAT, 2015a).

Em Portugal, relativamente ao ano de 2013 (resultados provisórios das últimas estatísticas disponíveis), verifica-se que os edifícios (habitação e serviços) foram responsáveis por 29% do consumo total de energia (DGEG, 2015a) e, no que respeita ao consumo de eletricidade, por 62% do consumo final (Figura 1.9).

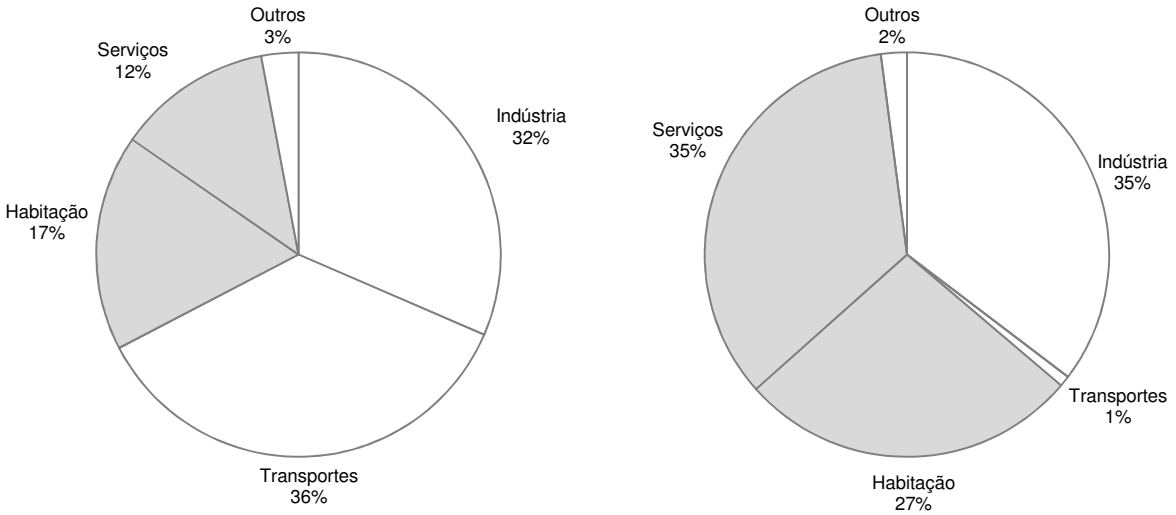


Figura 1.9 - Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética (à esquerda) (DGEG, 2015a), e quota do consumo final de eletricidade (à direita) (EUROSTAT, 2015b), em Portugal, por sector de atividade económica e referente ao ano de 2013

Em termos históricos, o consumo final de energia correspondia a 27% (20% habitação e 7% serviços) em 1990, tendo crescido ligeiramente, em termos relativos, para 29% (17% habitação e 12% serviços) em 2013 (Figura 1.10). No mesmo período, registou-se uma subida mais acentuada do consumo de eletricidade, de 46% para 62% (Figura 1.11).

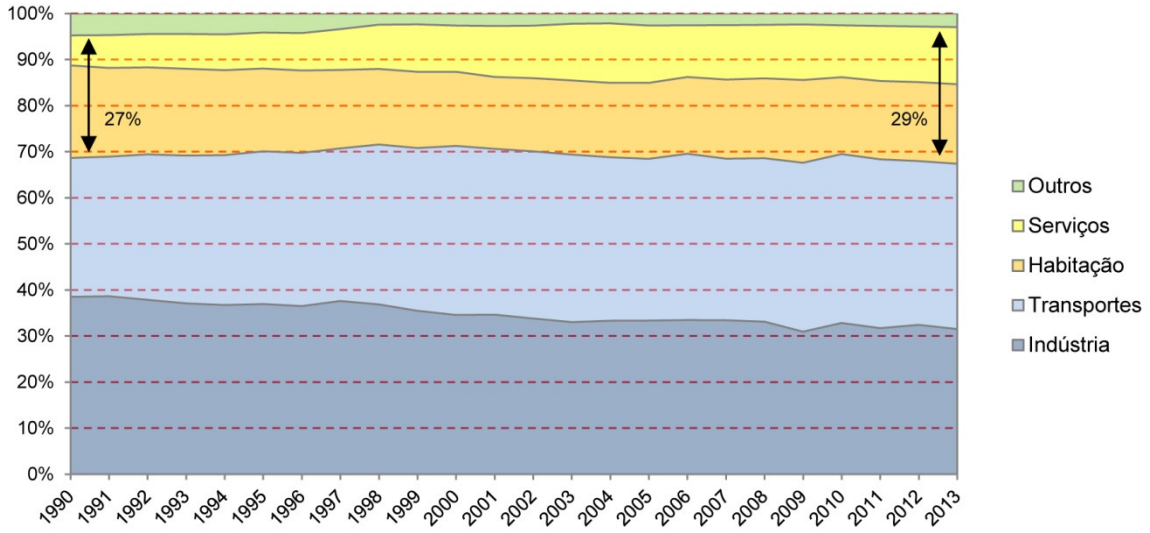


Figura 1.10 – Quota do consumo final de energia, excluindo a utilização não energética, em Portugal por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (DGEG, 2015a)

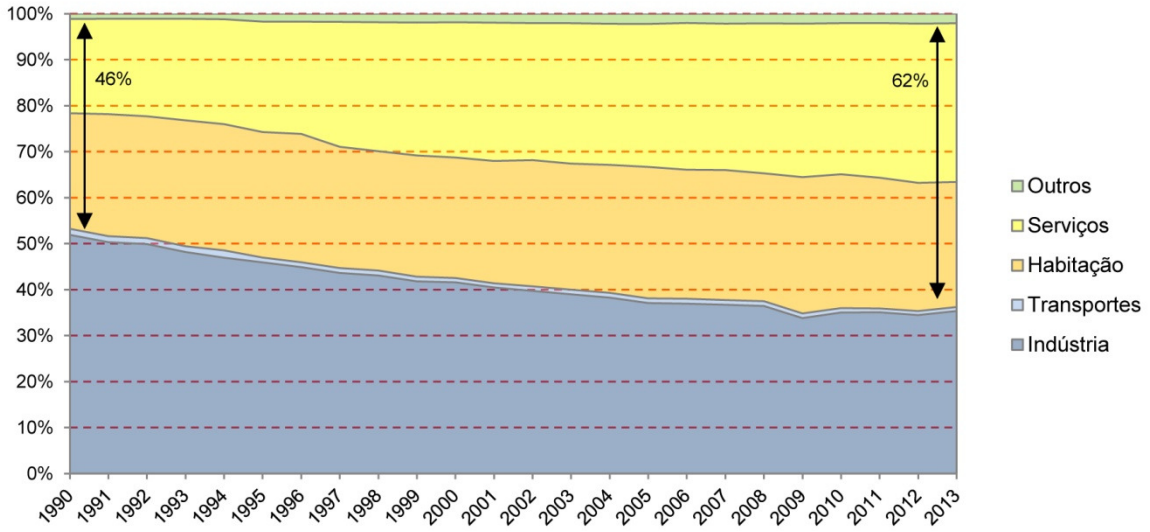


Figura 1.11 - Quota do consumo final de eletricidade em Portugal, por sector de atividade económica, entre 1990 e 2013 (EUROSTAT, 2015b)

O total do consumo final de energia em Portugal aumentou de 12090 ktep em 1990, para 15167 ktep em 2013. No entanto, tal como a nível europeu, e ao contrário da tendência mundial, após um aumento contínuo até 2005 (onde atingiu um pico de 19579 ktep), o consumo tem decrescido continuamente (sendo o consumo do ano de 2013 similar ao de 1997). Este cenário deve-se a questões de política energética e de melhoria da eficiência, mas também a alterações de hábitos de consumo e à crise económico-financeira. No mesmo período, os sectores de serviços e da habitação acompanharam a

tendência do consumo total, apesar de demonstrarem variações específicas, destacando-se o aumento expressivo do consumo no sector dos serviços em relação ao da habitação (Figura 1.12 e Figura 1.13).

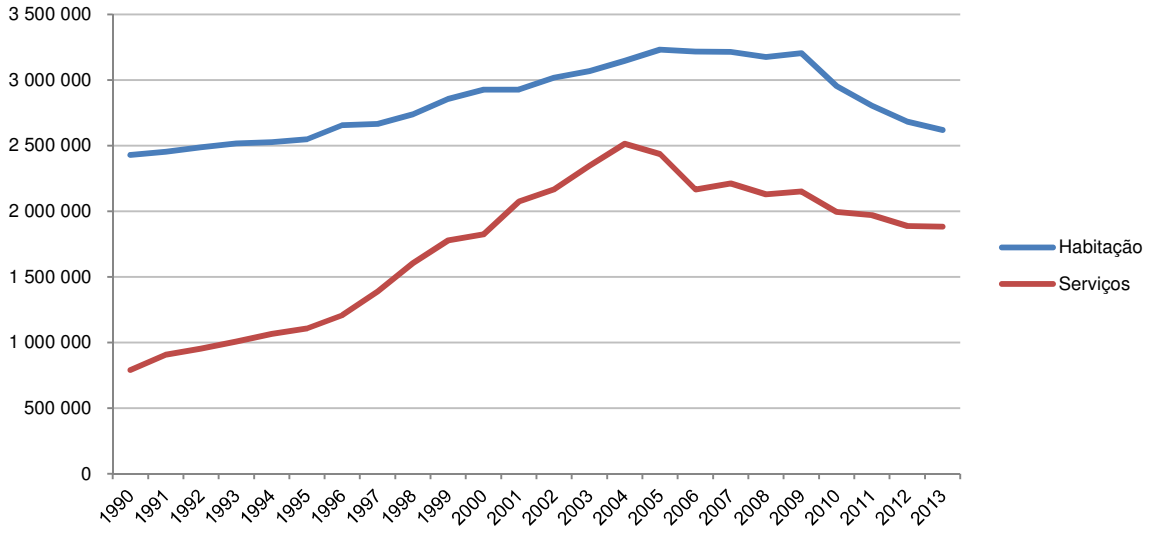


Figura 1.12 – Consumo final de energia (tep) em Portugal (DGEG, 2015a)

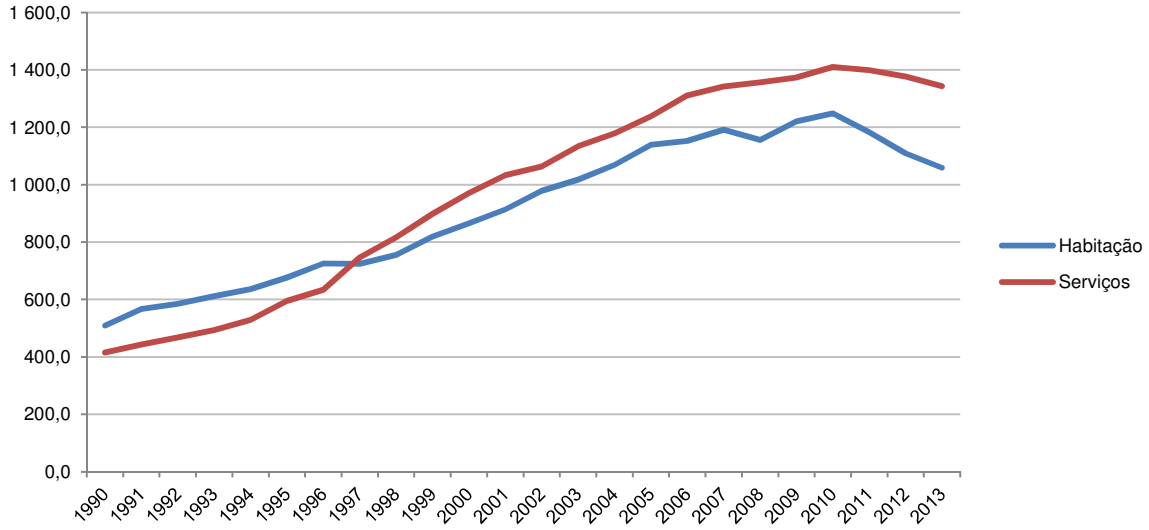


Figura 1.13 – Consumo de eletricidade (ktep) em Portugal (EUROSTAT, 2015b)

Estes dados demonstram o peso energético significativo dos edifícios, e que estes ocupam uma percentagem cada vez maior do consumo total de energia. A tecnologia existente permite reduzir, e até mesmo anular, o consumo de recursos fósseis e a dependência energética dos edifícios, na fase de utilização, recorrendo a medidas de eficiência energética e a fontes de energia renovável. O recurso a sistemas solares ativos confere ao edifício a capacidade de gerar energia, e poderá revelar-se essencial na gestão do consumo e na forma de atingir os objetivos regulamentares futuros, tais como a conceção de edifícios de balanço energético nulo.

Salienta-se que apesar do sector da indústria normalmente não ser considerado na contabilização dos edifícios, este é frequentemente desenvolvido em edifícios que, devido às suas características de localização, dimensão e superfície disponível, constituem áreas consideráveis para a geração de energia de origem fotovoltaica ou térmica, que poderá inclusivamente beneficiar a satisfação de necessidades energéticas de determinadas indústrias. Neste aspeto, existem vários projetos-piloto de geração de calor de processo industrial com base em sistemas solares térmicos a nível europeu e, a nível nacional, foram identificadas medidas específicas em relação a determinados processos no PNAER (Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013), nomeadamente o aquecimento de águas por coletores solares nas indústrias têxtil, de vestuário, calçado e curtumes. Deste modo, considerando a indústria transformadora no potencial total dos edifícios obtém-se um universo correspondente a 57% do consumo final de energia em Portugal (o sector da indústria divide-se nos seguintes grupos e respetivas percentagens no consumo final de energia em 2013: indústria transformadora 28%; indústria extrativa 0,8%; e construção e obras públicas 2,2%).

1.3.2 O RECURSO SOLAR E OS EDIFÍCIOS

O sol é a principal fonte de energia renovável, sendo a água, o vento e a biomassa considerados seus derivados. É uma fonte praticamente inesgotável, repartida e abundante. Anualmente, a superfície da Terra é atingida por uma quantidade de energia solar significativamente superior ao consumo de energia primária no mesmo período e às reservas fósseis e nucleares conhecidas. O valor médio da constante solar no limite superior da atmosfera, incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol, é de 1367 W/m^2. Com o céu limpo a radiação atinge a superfície terrestre com uma potência inferior em cerca de 30%, ou seja, 1000 W/m^2. A disponibilidade da radiação solar é variável, quer diariamente, quer anualmente, sendo fortemente condicionada pelas condições climáticas locais. A radiação solar global divide-se em radiação direta (que atinge diretamente as superfícies), difusa (desviada em diferentes direções pelos componentes da atmosfera) e refletida (com origem na reflexão no solo e objetos circundantes).

Em Portugal, relativamente aos restantes países europeus, a radiação solar é um recurso endógeno abundante (Figura 1.14). A média anual de horas de sol varia entre as 3000 e 2200 (Continente) e 2200 e 1700 (Ilhas). Anualmente, a radiação solar global varia entre os 1400 e 1800 kWh/m^2 (Figura 1.15).

Como referência visual do potencial do recurso solar, comparando a quantidade de energia fornecida pelo sol com as necessidades nacionais, considerando a radiação global anual de 1400 kWh/m^2 e tendo em conta o consumo total de energia primária em 2013 de 21515226 tep (DGEG, 2015a), seria necessária uma área de 179 km^2 para satisfazer essas necessidades (1 tep = 11,63 MWh). Esta área equivale aproximadamente ao Município de Celorico de Basto (181 km^2) e corresponde a 0,2% da área do País. Se a radiação solar fosse captada por módulos fotovoltaicos nessa região[2] a área necessária à satisfação das necessidades nacionais corresponderia a 1169 km^2, o que equivale aproximadamente ao conjunto dos Municípios de Celorico de Basto, Cabeceiras de Basto, Vieira do Minho, Terras do Bouro, Fafe e Vizela (1160 km^2) e corresponde a 1,3% da área do País. Este cálculo rudimentar serve apenas o propósito de demonstrar graficamente o potencial de geração de energia, pois não considera as particularidades dos grandes sistemas de produção fotovoltaica, nem os afastamentos necessários para evitar o autosombreamento, ou outras questões de natureza geográfica. Nesse sentido, e como aproximação a um contexto real, tomando como referência a Central

[2] Considerando a média anual de produção elétrica de 1370 kWh/kWp (JRC-IET, 2015), na zona de Celorico de Basto, através de módulos fotovoltaicos cristalinos de 250 Wp com uma área de 1,6 m^2 (6,4 m^2/kWp), com inclinação (34°) e orientação (-11°) otimizadas e um total de perdas de 25,4% (temperatura, baixa radiação, refletância, cabos e inversores).

Fotovoltaica da Amareleja que produz anualmente cerca de 93000 MWh num espaço de 250 hectares, e extrapolando esses dados, seriam necessários 6726 km^2 para satisfazer as necessidades nacionais, o que equivale aproximadamente ao Baixo Alentejo (6789 km^2, excluindo Ferreira do Alentejo e Serpa) e corresponde a 7,3% da área do País (Figura 1.16).

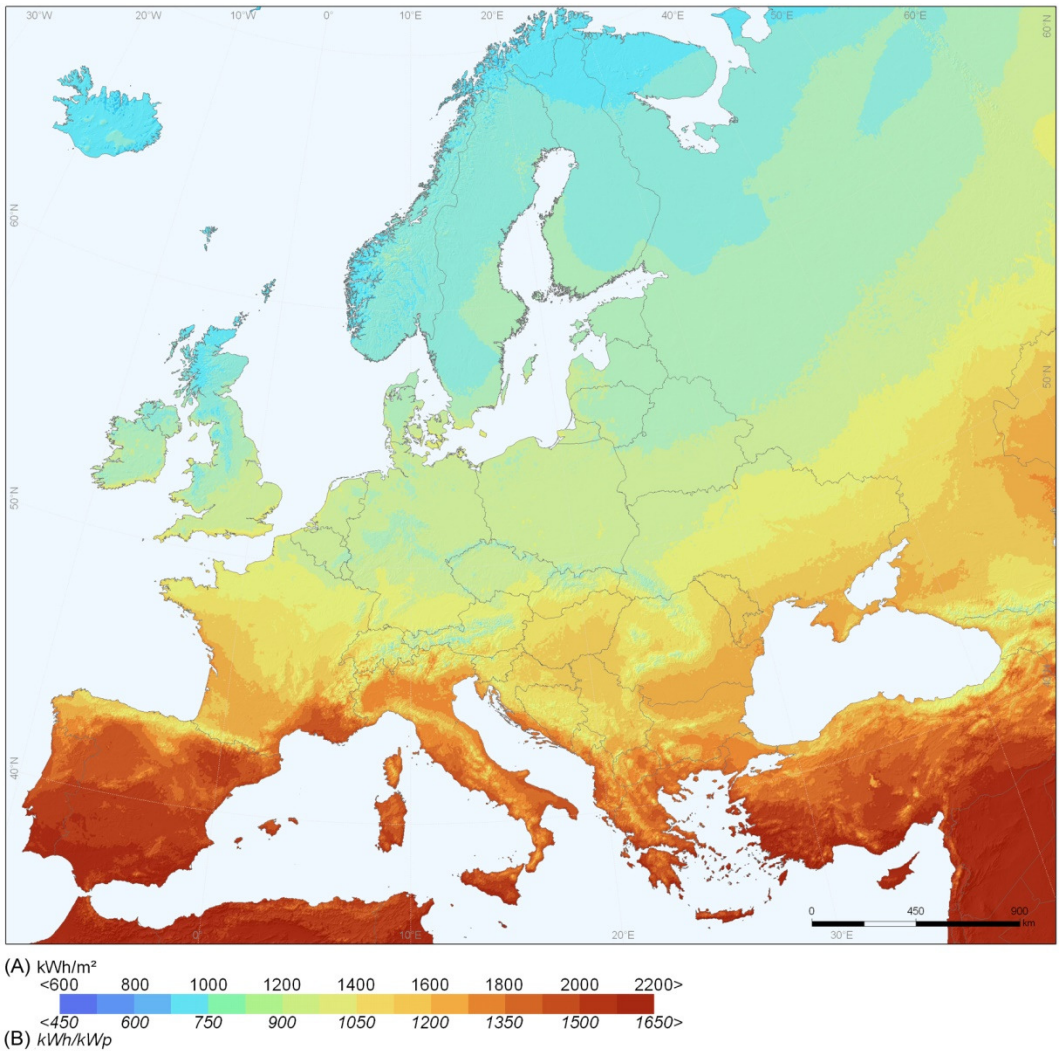


Figura 1.14 – Radiação solar e potencial de geração de eletricidade na Europa: (A) Radiação global anual incidente numa superfície orientada a sul e com inclinação otimizada; (B) eletricidade gerada anualmente por um sistema fotovoltaico (1kW_p) com inclinação otimizada e desempenho de 0.75 (Huld, Müller e Gambardella, 2012)

A disponibilidade do recurso solar é tida em conta nas políticas energéticas, pois no Plano Nacional de Ação para as Energia Renováveis (PNAER) (Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013) é referido, relativamente à eletricidade, que a aposta na energia solar tem um papel importante no sentido de aumentar a produção descentralizada de eletricidade pelo facto do seu ciclo de produção se adequar aos períodos de maior consumo de energia, bem como pelo potencial que Portugal dispõe em termos de recurso solar e de capacidade de investigação e desenvolvimento tecnológico.

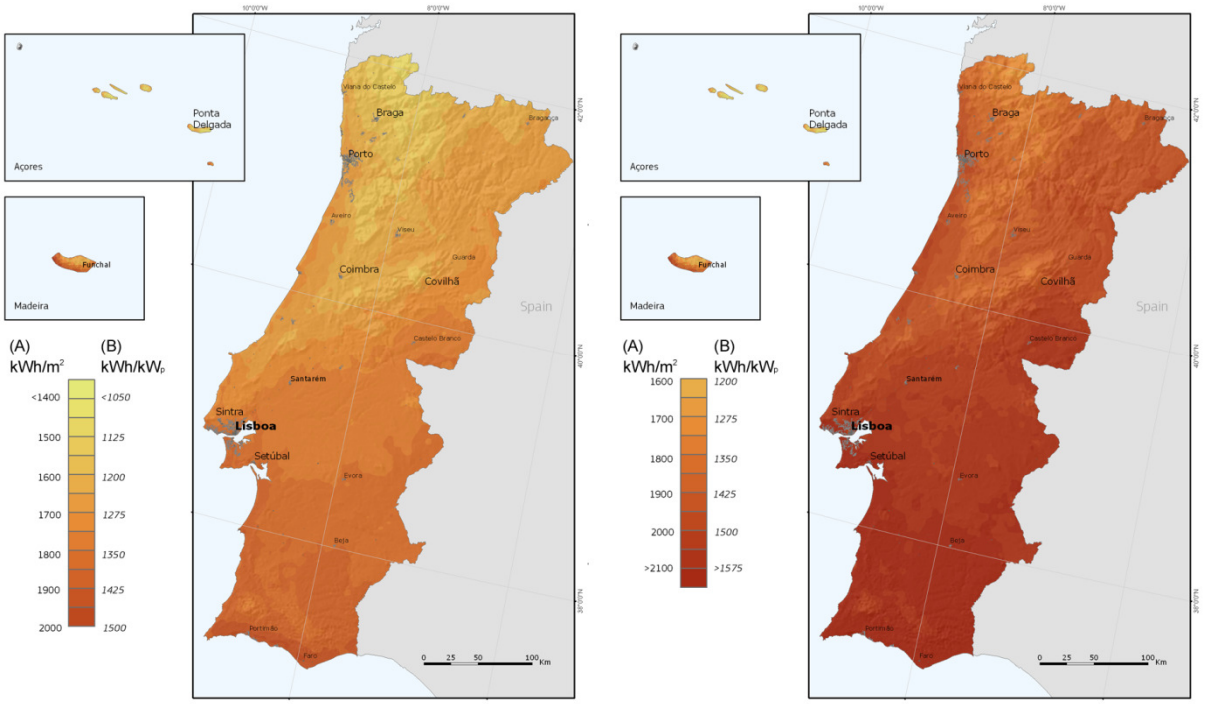


Figura 1.15 – (A) Radiação global anual e (B) eletricidade anual gerada por um sistema fotovoltaico ($1kW_p$) com desempenho de 0.75, no plano horizontal (à esquerda), e com inclinação otimizada (à direita) em Portugal (Huld, Müller e Gambardella, 2012)

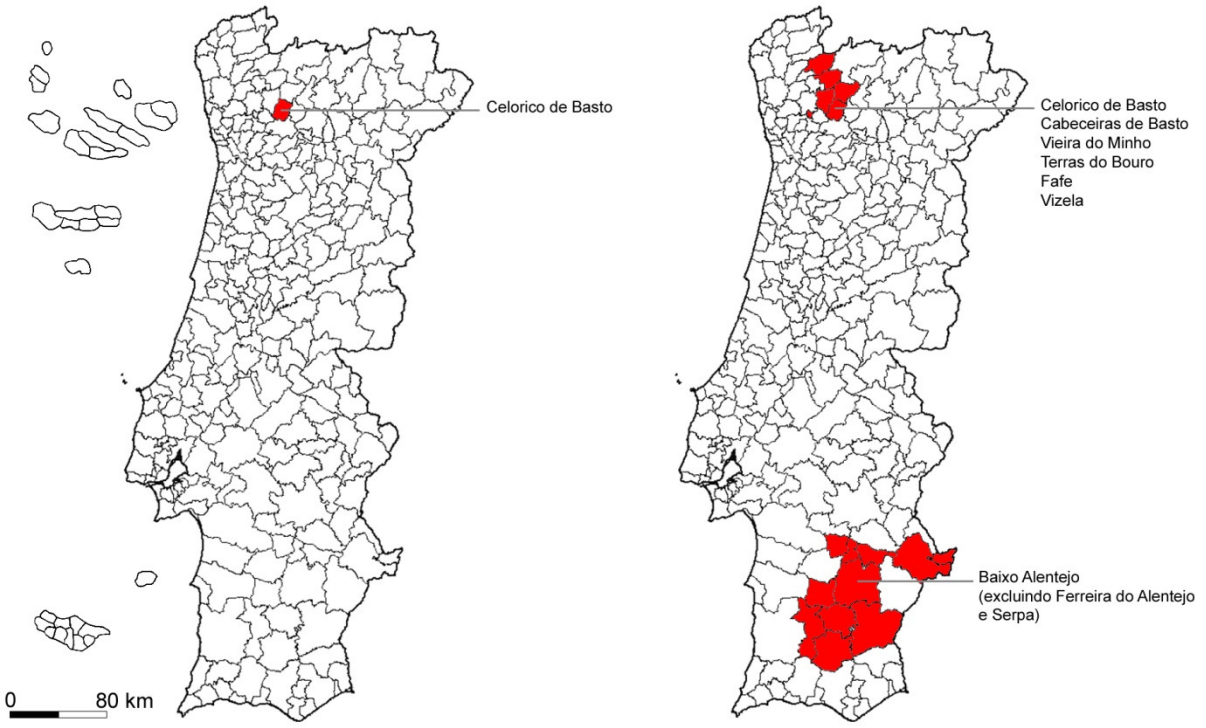


Figura 1.16 – Superfície equivalente ao consumo nacional de energia primária em 2013 em termos de radiação global anual (à esquerda) e da área necessária à conversão fotovoltaica (à direita)

A energia solar é, das fontes de energia renovável, aquela que apresenta maior potencial para a utilização em edifícios. Em ambiente urbano, onde o espaço disponível é reduzido ou inexistente, a envolvente dos edifícios constitui uma localização com características privilegiadas para a coleção da radiação solar. Contribui também para a descentralização da produção, devido à sua proximidade ao local de consumo, minimizando as perdas de distribuição, e evitando nova ocupação de solo. As tecnologias solares ativas são também, dos sistemas de produção de energia renovável, aqueles cujas características modulares e dimensionais mais se adequam à utilização e integração em edifícios. Obviamente, as tecnologias fotovoltaicas e térmicas são compostas por diversos produtos com características específicas e essa diversidade influencia as possibilidades de interação com o edifício. A disponibilidade de radiação solar é um fator determinante no rendimento dos sistemas solares ativos, sendo a exposição à radiação, a orientação e a inclinação, parâmetros fundamentais na definição do seu desempenho, com implicações óbvias na sua integração na envolvente de edifícios. Na Tabela 1.1 compara-se a radiação global anual incidente em superfícies com inclinações diversas (análogas às situações de cobertura e fachada num edifício) em duas cidades portuguesas e duas cidades alemãs. Salienta-se que a Alemanha é um forte investidor no incentivo à eletricidade solar, detendo a maior capacidade fotovoltaica instalada a nível mundial e que, relativamente a 2013, as instalações abaixo de 250kW$_p$ (valor que em Portugal engloba as unidades de pequena produção) representaram 51% da capacidade total instalada na Alemanha (Hildebrandt, 2014).

Tabela 1.1 – Média mensal da radiação global (Wh/m^2/dia) em localizações específicas e diferentes inclinações, com orientação sul (JRC-IET, 2015)

	Horizontal (0°)	**Ótima (variável com a latitude)**	**Vertical (90°)**
Lisboa	4800	5490 (34°)	3460
Porto	4600	5360 (36°)	3510
Frankfurt	2930	3400 (37°)	2400
Berlim	3020	3460 (37°)	2380

Grande parte do avanço das questões relacionadas com a integração de SSA em edifícios, com maior incidência sobre a tecnologia fotovoltaica, são desenvolvidas sobretudo por países do centro e norte da Europa, tais como Alemanha, Suíça, Áustria, Noruega, ou Suécia (mas também países do sul como a Itália e a Espanha), onde o recurso solar tem características diversas e a atividade da construção é desenvolvida com procedimentos, materiais e custos típicos diferentes da especificidade portuguesa, assim como, em geral, do sul da Europa. No sul da Europa a disponibilidade de radiação solar é maior que nos países do centro e norte, onde a radiação difusa é predominante, e a altura do sol é diversa. Estes fatores influenciam a abordagem à tecnologia dos sistemas e às possibilidades de integração. Apesar de Portugal, no contexto europeu, possuir um dos maiores índices de radiação solar, não é dos países com maior investimento no aproveitamento desse potencial, sobretudo em áreas específicas como o contributo possível de sistemas solares passivos e ativos em edifícios. Há, deste modo, a necessidade de enquadrar o conhecimento existente à realidade nacional, no que respeita ao tipo de construção, procedimentos e clima, de forma a aproveitar o recurso endógeno, e potenciar uma utilização multifuncional e sustentável dos SSA.

1.3.3 POLÍTICA ENERGÉTICA, LEGISLAÇÃO E INCENTIVOS

Devido ao contributo expressivo dos edifícios no consumo final de energia, a UE tem vindo a definir, rever e a atualizar as metas e estratégias que visam a redução do consumo e a utilização de FER, através das diretivas relativas ao desempenho energético dos edifícios (Parlamento Europeu, 2010) e à promoção da utilização de FER (Parlamento Europeu, 2009). Seguindo estas orientações, o modelo energético que tem vindo a ser implementado em Portugal conjuga medidas de eficiência energética e a utilização de energia proveniente de fontes endógenas renováveis, como se verifica no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e do PNAER (Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013).

No que respeita aos edifícios, estas questões traduzem-se regulamentarmente no Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) (Decreto-Lei n.º 118/2013) que visa a preservação e a produção de energia, assim como a sua utilização eficiente, e no recente enquadramento legal da produção descentralizada de eletricidade, por intermédio de instalações de pequena potência (Decreto-Lei n.º 153/2014).

O SCE subdivide-se no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Do ponto de vista da utilização de SSA, e da sua potencial integração em edifícios, salienta-se que na última revisão do SCE é introduzido como objetivo de desempenho energético o conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia (que deverá ser aplicado a novas construções a partir de 2020 e a edifícios de entidades públicas a partir de 2018). Destaca-se também a continuidade da obrigatoriedade da utilização de coletores solares térmicos para AQS em edifícios novos ou grandes intervenções, imposta pelo REH, e o benefício em termos de classificação da classe energética, igualmente para edifícios novos e grandes remodelações que utilizem energias renováveis para climatização ou para AQS.

Relativamente à promoção da produção descentralizada de eletricidade em sistemas de pequena dimensão, a energia solar é privilegiada como fonte renovável, assim como a conversão com base em sistemas fotovoltaicos. No enquadramento regulamentar (Decreto-Lei n.º 153/2014) foi definido o regime aplicável ao autoconsumo e revisto o regime de venda à rede elétrica de serviço público. A produção de eletricidade por pequenos produtores passou a dividir-se em Unidades de Pequena Produção (UPP) e Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC). Estes regimes implicam um contrato de consumo de energia e limites de potência na produção (a potência máxima de ligação nunca ultrapassa a potência contratada no consumo, com limites diversos consoante o regime ou tipo de edifício).

As UPP consistem em unidades de produção com potência de ligação igual ou inferior a 250kW, substituindo assim os regimes anteriores de micro e miniprodução, e mantendo a venda da totalidade de energia produzida à rede elétrica de serviço público. A potência a atribuir é segmentada em três categorias, de acordo com as medidas acessórias implementadas: Categoria I – instalação de uma UPP; Categoria II - instalação de tomada elétrica para o carregamento de veículos elétricos no local de consumo associado à UPP; Categoria III - instalação de coletores solares térmicos com um mínimo de 2 m² de área útil de coletor (potenciando a utilização de SSA), ou de caldeira a biomassa no local de consumo associado à UPP. A tarifa a aplicar varia consoante o tipo de energia primária utilizada, sendo determinada mediante a aplicação de uma percentagem à tarifa de referência. A energia solar tem sido financiada a 100%, gerando assim um predomínio da utilização dos sistemas fotovoltaicos. As UPAC, ao contrário dos modelos anteriores, destinam-se ao autoconsumo e permitem a venda de excedente à rede pública. No entanto, são enquadradas de modo ao dimensionamento dos sistemas ser

efetuado em função das necessidades do produtor. O autoconsumo pode ser realizado com base em qualquer *mix* de fontes de energia, renováveis e não renováveis, com ou sem ligação à rede elétrica pública, e cuja potência instalada seja igual ou inferior 1 MW.

De seguida, apresentam-se as medidas de promoção e incentivo que implicam a utilização de SSA e a sua possível articulação com os edifícios, através dos objetivos planeados (PNAEE e PNAER), por tipo de tecnologia (solar térmico e fotovoltaico).

1.3.3.1 Solar térmico

Em 2001, entre as medidas de eficiência energética e aproveitamento das energias renováveis adotadas, foi promovido o recurso a coletores solares térmicos para o aquecimento de água, nos sectores residencial, serviços e indústria, através do programa "Água Quente Solar para Portugal" (ADENE et al., 2003). Este programa tinha como objetivo a instalação de 1 milhão de m^2 de coletores até 2010, mais tarde este prazo foi redefinido para 2020 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008), uma vez que até 2008 apenas se registou a instalação de 390 000 m^2. No entanto, no final de 2012, contabilizavam-se 966 770 m^2 instalados (65% no sector residencial e 35% no sector dos serviços), estando assim a meta para 2020 praticamente cumprida (DGEG, 2015c, APISOLAR, 2012). Para este resultado contribuiu a "Medida Solar Térmico 2009" (Portugal, 2009) e um conjunto de incentivos associados à aquisição de equipamentos para AQS no sector residencial (principalmente habitações usadas, devido à obrigatoriedade em habitações novas, com comparticipação a 50%) e em Instituições Particulares de Solidariedade Social e Associações Desportivas de Utilidade Pública (com comparticipação a 65%). No sector do Estado também foram implementadas as medidas "Solar Térmico Piscinas" e "Solar Térmico Recintos Desportivos", impulsionadas por um regime de incentivos e uma campanha de sensibilização. No entanto, verificou-se um decréscimo de instalações nos anos posteriores aos dos incentivos. A capacidade instalada em 2012 registou sensivelmente os mesmos valores de 2008 (Figura 1.17), o que levou ao desaparecimento de emprego criado, demonstrando os efeitos negativos de medidas pontuais.

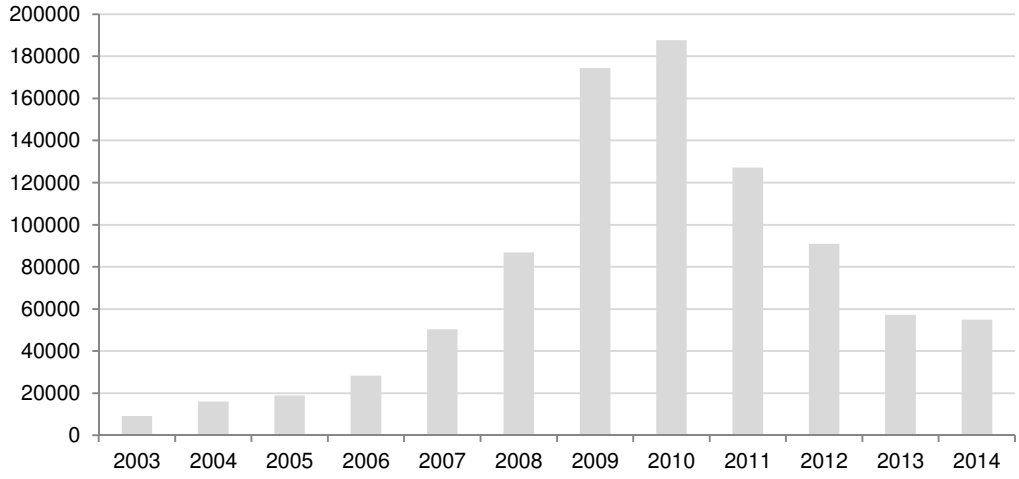


Figura 1.17 – Evolução anual da área (m^2) instalada de coletores solares térmicos em Portugal (DGEG, 2015c)

Em 2014 a capacidade instalada foi de 54 961 m^2 (38 473 kW_{th}) e a capacidade acumulada de 1 133 965 m^2 (793 775kW_{th}). O mercado apresentou um decréscimo de 4% relativamente ao ano de 2013, no qual se registou a instalação de 57 234 m^2 (40 064 kW_{th}). Estes dados demonstram que a

realidade está aquém do planeado, pois previa-se a instalação de 100 000 m^2 de coletores por ano no sector residencial (1,2 milhões de m^2 acumulados em 2020) e 40 000 m^2 de coletores por ano no sector dos serviços (cerca de 500 000 m^2 em 2020), através da medida solar térmico definida no PNAEE (Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013). Neste plano também se previa revitalizar o parque de equipamentos existente, criando condições favoráveis para a substituição e/ou reparação e manutenção especializada. Em relação à indústria, foram identificadas medidas específicas para os processos industriais, como referido no ponto 1.3.1, e na Administração Pública (para os edifícios sujeitos à elaboração de planos de ação de eficiência energética), entre outras medidas, foi prevista a instalação de coletores solares térmicos para produção de AQS em edifícios ou equipamentos com grandes necessidades, como escolas e pavilhões multiusos.

Na revisão do PNAER 2016 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013), que aborda os sectores da eletricidade, do aquecimento e arrefecimento, e dos transportes, destaca-se, no sector de aquecimento e arrefecimento, a expetativa que o maior contributo seja do solar térmico, seguido da biomassa, e prevê-se que até 2020 estejam instalados cerca de 2 214 282 m^2, pela continuidade de obrigatoriedade em construção nova e em remodelações de valor superior a 25% do imóvel, e pela natural substituição de equipamentos e consequente redução do consumo energético. As principais medidas específicas para este sector são a promoção da instalação de sistemas solares térmicos no sector residencial e em piscinas e recintos desportivos, bem como a renovação de sistemas solares térmicos em fim de vida útil.

No que diz respeito à indústria e às grandes instalações consumidoras de energia, são previstos benefícios através do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) em termos de desempenho energético pela utilização de energias renováveis para fins térmicos, constituindo assim um incentivo à utilização de energias renováveis nestas instalações.

1.3.3.2 Fotovoltaico

No que respeita aos sistemas fotovoltaicos, em Portugal predominou o incentivo financeiro para os segmentos de pequena e média dimensão, com processos administrativos simplificados, enquadrado em 2007 pelo regime de microprodução de eletricidade (ou produção combinada de calor e eletricidade) (Decreto-Lei n.º 363/2007), para uma gama de potências até 5,75 kW, e em 2011 pelo regime de miniprodução (Decreto-Lei n.º 34/2011), dirigido essencialmente aos sectores dos serviços (escolas, edifícios públicos e grandes armazéns de distribuição) e indústria, para uma gama de potências até 250 kW (consoante as tecnologias em causa), com o objetivo de instalar cerca de 250 MW até 2020. Os dois enquadramentos contemplavam dois regimes remuneratórios (geral e bonificado), sendo que o programa de microprodução exigia a instalação de coletores solares térmicos para o acesso à tarifa bonificada.

Em 2014 o total da potência instalada em micro e miniprodução foi de 163 MW, consistindo praticamente na sua totalidade em sistemas fotovoltaicos. Com o novo regime (UPP e UPAC) espera-se atingir os 300 MW de potência instalada até 2030. Apesar do contínuo crescimento cumulativo da potência instalada entre 2008 e 2014, o efeito negativo das alterações no esquema de incentivos (associado a um contexto de dificuldade de recurso ao crédito bancário) é visível, sobretudo em 2013 e 2014 (Figura 1.18) no seguimento da suspensão, em 2012 (Decreto-Lei n.º 25/2012), dos pedidos de injeção na rede elétrica não aprovados e de instalações sem ponto de receção atribuído, não obstante a suspensão ter sido levantada nesse mesmo ano (Decreto-Lei n.º 215-B/2012). Nos contratos vigentes de microprodução de energia fotovoltaica (Portaria 431/2012, de 31 de Dezembro) verificou-se um corte em 50% na tarifa, a partir de 1 de Janeiro de 2013 (passando de 32,6 cêntimos por kWh de energia produzida em 2012 para 16,6 cêntimos). Os benefícios fiscais foram suspensos em 2012,

repostos em 2013, porém com redução em relação a 2011, sendo permitido deduzir 30% dos gastos até um limite de €100 com a instalação de equipamentos e melhorias das condições térmicas (até 2011, o limite era de 803 euros) e novamente revogados em 2014.

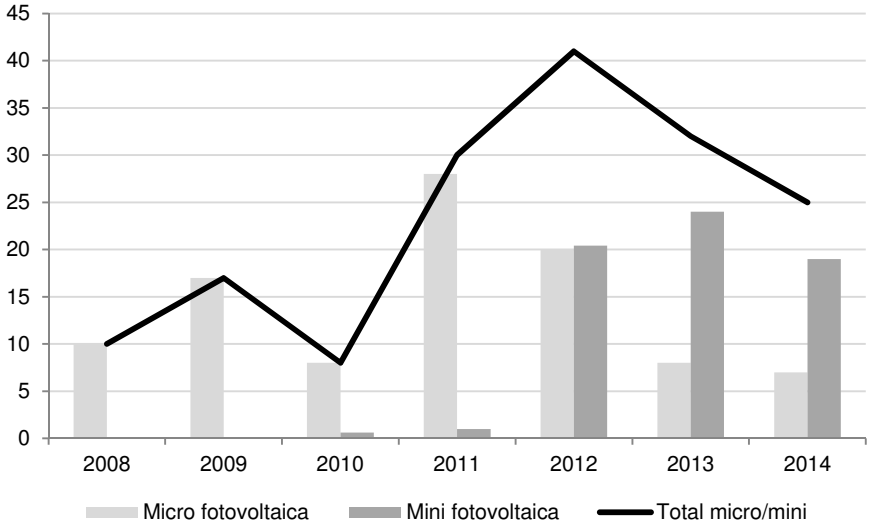


Figura 1.18 – Evolução da potência instalada anualmente (MW) em micro e miniprodução fotovoltaica

Contudo, devido à acentuada descida de preços da tecnologia fotovoltaica e à crescente oferta de sistemas de armazenamento, o mercado do autoconsumo poderá evoluir sem esquemas de apoio. Em países em que a eletricidade tem um custo elevado, o autoconsumo tornou-se uma opção competitiva, sendo visto como a evolução natural do mercado após a aposta nas tarifas subsidiadas (IEA-PVPS, 2015).

Apesar dos regimes que enquadram a atividade de pequena escala de produção descentralizada de eletricidade terem sofrido condicionantes em termos políticos, e os resultados representarem um contributo reduzido face ao consumo de energia total, estes são responsáveis pela proliferação de SSA no ambiente construído. Nesse sentido, possuem um potencial a explorar relativamente à integração dos sistemas fotovoltaicos em edifícios, uma vez que implicam que estes sejam implementados no local de consumo (o que também sucede no caso dos edifícios de balanço energético nulo, nos quais a geração de energia deve situar-se preferencialmente no próprio edifício, na parcela de terreno onde está construído, ou em infraestruturas de uso comum tão próximas do local quanto possível). Adicionalmente, em muitas situações urbanas a superfície de captação disponível corresponde à envolvente do edifício, e estes regimes enquadram unidades de produção compatíveis, em termos de área, com a envolvente.

Os sistemas fotovoltaicos destinados à integração (BIPV – *Building-integrated Photovoltaics*) são ainda identificados como um mercado de nicho, porém com um potencial de crescimento elevado. Neste contexto, um aspeto a salientar, e que contribui para um ambiente edificado controlado, são as políticas energéticas que beneficiam a utilização integrada de sistemas fotovoltaicos nos edifícios (BIPV) através do acesso a tarifas especiais, postas em prática em alguns países, nomeadamente Espanha, França, Alemanha e Itália. Nesses países, no final de 2011, estimava-se que este tipo de aplicação correspondesse a 2% em Espanha, a mais de 50% na França, a cerca de 5% na Alemanha e a 20% na Itália (Agentschap NL, 2011). Outros países como a Suíça, a Áustria ou o Reino Unido e

alguns estados dos EUA também possuem tarifas especiais para sistemas BIPV. Tal não sucede no contexto nacional, contudo como se associa regulamentarmente a adoção de medidas de eficiência energética aos regimes de produção de energia, a utilização integrada de SSA pode ser direcionada para soluções construtivas multifuncionais que beneficiem o desempenho energético.

1.3.4 AUMENTO DO REPERTÓRIO TECNOLÓGICO DA ENVOLVENTE

A envolvente desempenha um papel fundamental como agente regulador no comportamento global do edifício sendo, em termos de balanço energético, o seu subsistema mais importante (Herzog, Krippner e Lang, 2004). Na envolvente repercute-se a formalização das medidas de desempenho energético através da adição de componentes de construção, tais como isolantes térmicos (conservação de energia) e instalações (entre as quais, a produção de energia) com implicações diversas e complexas, por vezes fortes e determinantes, não só no comportamento do edifício, mas também na sua imagem.

Ao longo da história do ambiente construído, os edifícios foram gradualmente incorporando e integrando vários sistemas ou componentes técnicos (as instalações) construtiva e formalmente. Como nos refere Munari Probst (2009), a chaminé é um exemplo deste processo com expressão na envolvente. Através de um sistema de exaustão passou a ser possível a instalação de fornos e lareiras no interior dos edifícios em condições adequadas. Apesar de desempenhar uma função precisa, a sua utilização como parte integrante do conjunto arquitetónico é muitas vezes expressiva, inclusive definindo características regionais (Figura 1.19). O ritmo com que estes sistemas surgiam, assim como o ritmo da construção, permitia a sua incorporação num processo lento de sedimentação, otimizado ao longo do tempo.

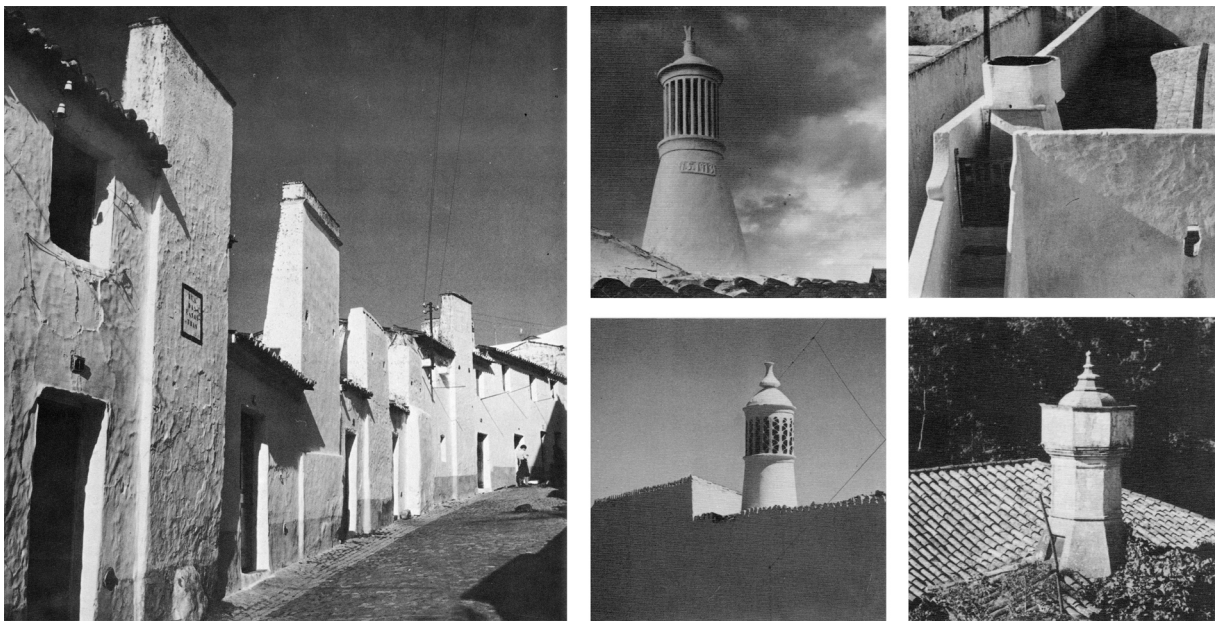


Figura 1.19 – Variação regional da chaminé: os volumes maciços das chaminés em Alter do Chão, Alentejo (à esquerda) e as formas de coroamento decorativas cilíndricas ou prismáticas no Algarve (Antunes et al., 1998)

No mundo ocidental, ao longo do século XX, os edifícios em geral, e a envolvente em particular, registaram mudanças sem precedentes face à história do edificado. Durante o período de um século assistiu-se a uma mudança significativa dos sistemas construtivos, dos materiais utilizados e do

desempenho expectável dos edifícios. Adicionalmente, esta mudança ocorreu associada a um aumento considerável do ritmo e volume da construção, assim como da quantidade e diversidade de instalações, o que se traduz numa considerável expansão semântica do repertório tecnológico de um edifício (Krippner, 2003). Em Portugal, até à segunda metade do século XX, em obras correntes, as instalações possuíam uma diversidade e um conjunto de exigências escassas, tratavam-se sobretudo de eletricidade e canalizações, e, dependendo da localização geográfica, aquecimento. Estas instalações, comparativamente à atualidade, requeriam espaços mínimos. Hoje, na sua generalidade, as instalações ocupam um espaço físico e conceptual crescente na construção e reabilitação de edifícios. Este espaço é determinado não só pelo aumento das exigências regulamentares, mas também pelo aumento das exigências de conforto dos utilizadores, contribuindo inequivocamente para uma maior complexidade de coordenação do projeto e da execução da obra, assim como da operação e manutenção dos edifícios, e para o aumento constante do consumo de energia verificado nas últimas décadas. A dificuldade em criar sinergias entre as instalações e o edificado prende-se, em parte, com estas questões.

Os sistemas solares ativos enquadram-se neste contexto, para além do óbvio contributo energético positivo, a sua implementação a um ritmo elevado, geralmente com um carácter de adição ou sobreposição ao edifício, não é satisfatória. Verifica-se um desfasamento entre a disponibilidade tecnológica/promoção da utilização e o conhecimento generalizado das possibilidades de articulação destes sistemas com o edifício por parte dos projetistas e construtores. Como exemplo, a utilização destes sistemas, na maioria das vezes, apenas cumpre requisitos energéticos, o que resulta, em grande parte das situações, numa incompatibilidade funcional, construtiva e formal entre o conceito global dos edifícios e os componentes solares (Figura 1.20).



Figura 1.20 – Incompatibilidade construtiva e formal entre os sistemas solares ativos e o edifício

Segundo Matuska e Sourek (2006), com a introdução de sistemas solares ativos na envolvente dos edifícios, a envolvente deixa de ser uma zona de perda de energia para se tornar numa zona geradora de energia. Esta mudança constitui uma rutura no modelo de conceção e utilização dos edifícios, com influência no desempenho tradicional da envolvente. A função energética ativa da envolvente, apesar de ser um conceito simples e atraente, impõe novos desafios e uma elevada capacidade de coordenação pluridisciplinar, de forma a não correr riscos, tais como subaproveitar um produto, por vezes, altamente tecnológico, ou alterar o comportamento do edifício de forma negativa. Vários autores (Hestnes, 1999, Hagemann, 1996) são consensuais na afirmação de que a integração arquitetónica destes sistemas, aproveitando o potencial de sinergia que os SSA promovem como componentes de construção, introduz mais-valias no edifício entendido como um todo. Também consideram que através de uma avaliação abrangente, em detrimento de análises parciais (como a consideração da perspetiva económica de forma isolada), incluindo as vantagens como os materiais evitados, a energia produzida, entre outros aspetos, podem-se atingir resultados coerentes e positivos.

Com a possibilidade da integração dos SSA na envolvente constituir uma opção viável, os projetistas necessitam de estar melhor informados sobre as suas características complexas (ao nível construtivo, das possibilidades de projeto, das relações custo-eficiência, entre outros aspetos) à semelhança de qualquer outro produto de construção, de forma a poderem definir as vantagens e desvantagens de determinada utilização (Lopez et al., 2014). Nesse sentido, salienta-se novamente que os SSA como componentes da envolvente podem contribuir para um conjunto de medidas passivas de eficiência energética (como isolamento térmico ou dispositivos de sombreamento), valorizadas nos planos nacionais (PNAEE e PNAER) e no SCE, ao mesmo tempo que geram energia.

1.3.5 SUSTENTABILIDADE E CICLO DE VIDA

Nos últimos anos, a tradução prática das medidas de eficiência energética resultaram em modelos direcionados para a valorização da conservação de energia e para a avaliação do desempenho em fase de operação. Deste ponto de vista existem "standards" (como a "Passivhaus", os edifícios "Net-zero", "Low-Energy", etc.) com exemplos construídos que possuem um desempenho notável. Estes edifícios resultaram da generalização do princípio de que para uma redução expressiva do consumo de energia, deve-se primeiro maximizar o isolamento e reduzir as perdas, seguindo-se a produção de energia, uma vez que devido ao elevado grau de isolamento, as necessidades energéticas seriam reduzidas, e o investimento no campo da geração de energia (mais pesado economicamente) seria menor.

No entanto, em diversas investigações (Stephan, Crawford e de Myttenaere, 2013, Campioli e Lavagna, 2007, Blengini e Di Carlo, 2010) foi demonstrado que ao considerar estes exemplos na perspetiva da sustentabilidade, que inclui a consideração do ciclo de vida, o cenário resultante não é tão otimista. Verificou-se que os componentes que permitem uma elevada eficiência energética em fase de operação, à custa da conservação de energia, não favorecem o balanço energético considerado do "berço ao túmulo" ou do "berço ao berço", em alguns casos até condicionando o seu impacto ambiental, devido ao acréscimo de energia incorporada (presente em sistemas estruturais e tecnológicos mais complexos, isolamentos mais espessos, entre outros fatores). Concluiu-se que a aplicação e validação das medidas aplicadas com base nas diretivas de desempenho energético não podem considerar apenas a sustentabilidade energética, nem restringir a análise do desempenho à fase de operação, mas abranger as várias dimensões da sustentabilidade e todo o ciclo de vida do edifício. Este facto originou mudanças, inclusive em avaliações de sustentabilidade como o LEED. A análise do ciclo de vida passou a ter um papel importante no enquadramento normativo da sustentabilidade, a

nível internacional e europeu, passando a figurar também nos Requisitos básicos das obras de construção (Regulamento UE N.º 305/2011).

Deste modo, apesar do atual destaque relativamente às questões de sustentabilidade energética, estas apenas constituem uma vertente da sustentabilidade que, por sua vez, constitui mais uma condicionante que também deverá ser enquadrada funcional, construtiva e formalmente, no exercício de síntese que é o projeto (Figura 1.21). Nesse sentido, apesar da valorização da produção energética descentralizada e de origem renovável ser tida como positiva à partida, esse contributo deve ser ponderado através de uma avaliação da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida da envolvente e do edifício.

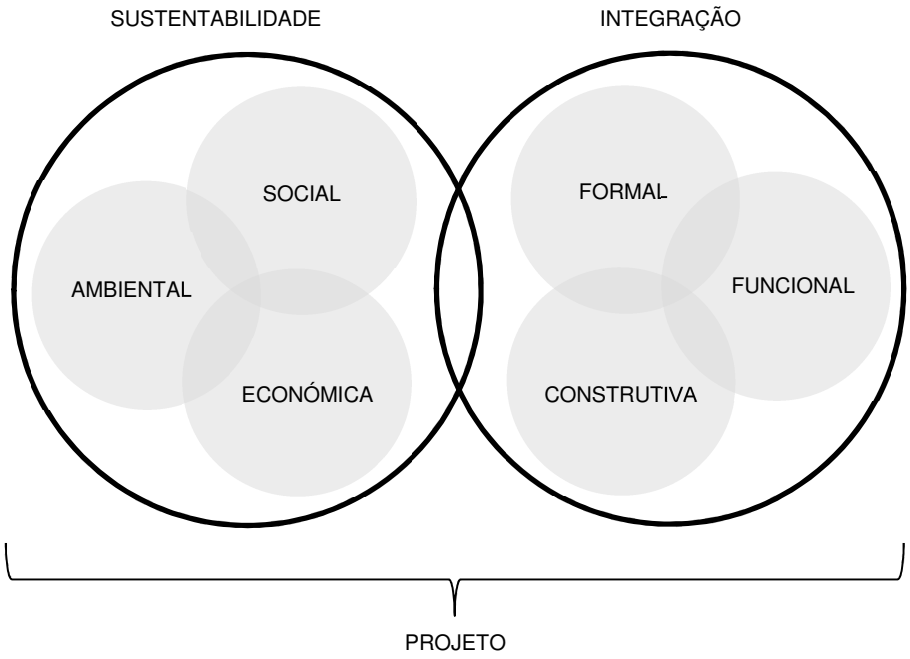


Figura 1.21 – Relação entre as dimensões da integração e da sustentabilidade

A consideração do ciclo de vida é assim um fator essencial na fundamentação da sustentabilidade, através dos desempenhos ambiental, económico e social, e a integração de SSA na envolvente ultrapassa a fase de operação em vários aspetos. Tomando como exemplo os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado, normalmente a sua garantia ronda os 25/30 anos e o seu desempenho reduz com o passar do tempo. Um edifício corrente é projetado para uma vida útil de 50 anos e a sua envolvente eventualmente possuirá um ciclo de vida menor. Apesar dos edifícios e dos sistemas possuírem vidas úteis geralmente maiores que as previstas, a substituição dos módulos fotovoltaicos será provavelmente necessária no período de vida útil do edifício. Essa substituição poderá consistir num componente semelhante ou numa solução totalmente diversa, em função do avanço tecnológico (provavelmente os sistemas fotovoltaicos terão, no futuro, diferentes configurações e desempenhos, que beneficiarão o edifício de outra forma). Face a este cenário, considerando o ciclo de vida de um edifício (projeto, construção, operação e manutenção, reabilitação, demolição, reciclagem), a

integração das instalações e componentes tecnológicos, onde se incluem os sistemas solares ativos, deve ser equacionada no ciclo de vida do edifício e ponderada do ponto de vista da durabilidade[3].

A durabilidade é o fator limite da vida útil, no entanto, a vida útil é frequentemente definida por obsolescência (Aikivuori, 1999). As instalações em geral, e os sistemas tecnológicos em particular, como os sistemas solares ativos, levantam o problema da obsolescência tecnológica. A intervenção por obsolescência é diversa da intervenção motivada por deterioração, onde o uso de um componente, material ou sistema é otimizado até ao final da sua durabilidade. A obsolescência pode surgir por vários motivos - económico, funcional, tecnológico, social, de localização, legal, estético e visual ou ambiental – como exemplo, a mudança de função de um edifício pode significar requisitos de desempenho diversos ou requerer atualizações do nível de desempenho. Deste modo, a vida útil das instalações nem sempre coincide com a prevista ou projetada, mas com a capacidade de se manterem atuais a vários níveis (económico, funcional, estético, entre outros), ou seja, do espaço de tempo até se tornarem obsoletas face ao surgimento de outros produtos que desempenham a mesma função com vantagens adicionais (em termos de eficiência, economia, etc.).

Neste sentido, os módulos fotovoltaicos e os coletores solares térmicos integrados podem ocupar áreas consideráveis da envolvente e desconhece-se qual o tempo que decorrerá até ao seu obsoletismo ou deterioração. Esta é uma questão importante face ao objetivo e necessidade de sustentabilidade e, inerentemente, à influência da integração dos sistemas solares ativos na vida útil da envolvente e na capacidade desta se manter atualizada.

1.3.6 SÍNTESE JUSTIFICATIVA

No quadro da União Europeia, Portugal tem conseguido alcançar metas consideráveis, em termos do peso das FER no consumo final de energia, assim como gerar investimento e criar uma consciência coletiva. No entanto, verifica-se que a política energética nacional depende das oscilações de ciclo económico e político e alguns objetivos têm ficado aquém do potencial realizável, como se apreende pela evolução da geração de eletricidade de pequena escala, apesar da radiação solar disponível no território nacional constituir um recurso endógeno abundante no contexto geográfico europeu.

O carácter inconstante dos condicionalismos de promoção e incentivo da produção de energia (descontinuidade de programas e redução das tarifas), assim como a constante revisão das metas regulamentares, são geradores de incerteza. A própria estratégia de produção de energia *on-site* não é consensual, desconhece-se o modo como a produção de energia será garantida no futuro, se pelo edifício ou paralelamente a este, servindo um conjunto de edifícios, ou ainda de outra forma (Azevedo e Leal, 2010). Comparando a vida útil geral de um edifício com a dos sistemas de produção de energia solar, tendo em consideração a velocidade com que a tecnologia evolui, o grau de incerteza relativamente ao futuro é ainda maior. Nesse sentido, uma metodologia abrangente para a integração dos sistemas solares ativos pode reduzir o risco para o investidor.

Todavia, as imposições regulamentares e incentivos à aplicação de SSA constituíram os principais motivos para a sua proliferação no ambiente construído nos últimos anos. Tal tendência deverá perpetuar-se no futuro, inclusivamente sem recurso a incentivos, uma vez que a regulamentação relativa ao desempenho energético dos edifícios tem sido revista em favor de objetivos cada vez mais ambiciosos, como se verifica no balanço energético nulo dos edifícios, onde a capacidade de produzir energia é vista como uma necessidade. Por outro lado, o ritmo de desenvolvimento e evolução

[3] A durabilidade é a capacidade do edifício ou das suas partes desempenharem as suas funções ao longo de um período específico, sob a influência das ações previsíveis, segundo definição apresentada na "Norma ISO 15686 Planeamento da vida útil" (ISO, 2000).

tecnológica destes sistemas, e da sua implementação face ao planeamento e aos objetivos regulamentares, não é acompanhado por metodologias abrangentes que contemplem e relacionem de forma alargada questões de conceção essenciais - como a integração arquitetónica, a sustentabilidade e o ciclo de vida - sendo os SSA simplesmente adicionados aos edifícios pré-concebidos. Através da sua previsão no início do processo de conceção é possível explorar a multifuncionalidade da sua utilização (incluindo o desempenho energético) e vantagens adicionais (como uma menor utilização de materiais de construção, ou a não ocupação de solo adicional). Nesse sentido, uma metodologia abrangente para a integração dos sistemas solares ativos pode constituir uma ferramenta útil para o projetista.

A diminuição do consumo energético dos edifícios confere ainda mais importância à interdependência de questões como a eficiência e o ciclo-de-vida, de modo a garantir a sustentabilidade. Nesse sentido, a avaliação da integração dos sistemas solares ativos deve ser contextualizada no ciclo de vida do edifício e enquadrada nas dimensões da sustentabilidade, sob pena de, ao não o fazer, constituir um contrassenso, pois a aplicação dos SSA surge devido à necessidade de encontrar soluções e práticas sustentáveis, e estas devem ser verificadas e validadas como tais. O edifício, no seu ciclo de vida, tem de suportar os SSA e a sua substituição, devendo deste modo ser encarada a sua incorporação como um produto de construção e, consequentemente, a sua análise não se centrar apenas na rentabilidade que oferece na sua vida útil. Neste sentido, justifica-se uma metodologia que avalie a integração de SSA através de parâmetros com influência na avaliação de sustentabilidade, de modo a reduzir os impactes ambientais, económicos e sociais na conceção da envolvente solar ativa.

Concluindo, uma metodologia abrangente para a integração de SSA na envolvente, face ao contexto regulamentar (relativo ao desempenho energético) e geográfico do país, é pertinente, pois permitirá o apoio na decisão ao investidor e ao projetista, e uma consideração mais abrangente do papel multifuncional dos SSA na envolvente, na satisfação dos requisitos de integração "vitruviana" e de sustentabilidade.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

Como objetivo principal pretende-se o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão na fase de conceção, através da verificação das opções de integração - funcional, construtiva e formal - no desempenho relativo às várias dimensões da sustentabilidade - ambiental, económica e social - ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, e que a sua utilização contribua para a resolução do problema científico identificado no início do presente Capítulo.

Este objetivo implica um campo de estudo abrangente, no qual coexistem uma série de critérios e parâmetros cujos propósitos específicos são por vezes díspares e contraditórios em relação à finalidade pretendida, mas cuja articulação e complementaridade são essenciais para o atingir. Deste modo, através de uma síntese analítica deste campo temático abrangente, espera-se obter um conjunto de parâmetros e indicadores, que articulados através de um processo metodológico, potenciem estratégias de conceção e de seleção de produtos, e permitam a redução do desfasamento entre o rápido desenvolvimento tecnológico e os processos mais lentos de adaptação a nível conceptual de projeto.

Espera-se assim contribuir para colmatar a procura de novos modelos de abordar as necessidades e o desempenho dos "edifícios solares", e encaminhar as soluções de projeto neste domínio para um resultado geral melhorado do ponto de vista do conceito global do edifício, do seu desempenho geral e da sustentabilidade.

Para atingir este objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos parciais:

- Enquadrar o conhecimento existente relativo aos produtos - SSA, BIPV, BIST (*Buiding-integrated Solar Thermal*) e BIPV/T (*Buiding-integrated Photovolatic and Thermal*) - e às metodologias para a integração de SSA na envolvente);
- Definir o conceito de integração na envolvente de edifícios;
- Estabelecer os requisitos, parâmetros e indicadores de integração "vitruviana" e de "sustentabilidade" em função dos SSA e da sua utilização na envolvente de edifícios;
- Complementar o desenvolvimento da investigação existente relativa à integração dos SSA em edifícios, através dos conceitos de adaptabilidade e de ciclo de vida, na perspetiva da sustentabilidade, por serem, neste âmbito, abordagens fundamentais e que se encontram num estado de desenvolvimento incipiente.

1.5 METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO

Partindo da identificação do problema científico e dos objetivos do trabalho, a investigação estruturou-se a partir da questão de como avaliar a integração funcional, construtiva e formal dos sistemas solares ativos na envolvente de edifícios, tendo em consideração a sua repercussão na avaliação de sustentabilidade, designadamente nos desempenhos social, ambiental e económico, ao longo do ciclo de vida, num contexto de projeto. Neste sentido, descrevem-se as ações de investigação efetuadas de forma a enquadrar uma resposta a esta questão.

Numa primeira fase, o trabalho de investigação consistiu na caracterização dos sistemas solares ativos e da envolvente dos edifícios. Foi necessário estabelecer o estado da arte relativo aos sistemas solares ativos, à sua integração na envolvente, e à avaliação da sustentabilidade dessa integração. Para tal, e de modo a obter um estado da arte abrangente, recorreu-se a informação disponibilizada pelos fabricantes e resultante das atividades de investigação e desenvolvimento, abrangendo o panorama nacional e internacional, e considerando as expectativas futuras. Esta abordagem foi direcionada aos SSA enquanto produtos de construção, e à envolvente enquanto subsistema do edifício.

Numa fase seguinte definiram-se os requisitos e parâmetros de integração "vitruviana" (funcional, construtiva e formal), com base nos Requisitos básicos das obras de construção, definidos no Anexo I, da Diretiva dos produtos de construção (Regulamento UE N.º 305/2011). Assim como os requisitos e parâmetros de sustentabilidade (social, ambiental e económica), com base na norma europeia da sustentabilidade das obras de construção (IPQ, 2011). A definição destes requisitos e parâmetros baseou-se na sua capacidade de influenciarem, ou de serem influenciados, pelo contributo específico da integração de sistemas solares ativos na envolvente, permitindo assim a consideração de uma série de questões relevantes e especificas em termos de integração.

Através de um exercício de síntese dos requisitos e parâmetros considerados relevantes do ponto de vista da integração "vitruviana" e da sustentabilidade das obras de construção, formulou-se a hipótese de desenvolvimento da "metodologia para a integração de sistemas solares ativos na envolvente dos edifícios". Este processo é demonstrado na Figura 1.22, que também traduz a dependência de informação no percurso da investigação.

Através da metodologia proposta espera-se atingir o objetivo geral, que implica a compatibilização de um conjunto de forças divergentes, tarefa primordial inerente à atividade de projeto, de forma a dotar essa atividade de um maior e mais eficaz grau de controlo que a atual prática. Ou seja, espera-se melhorar a compatibilização construtiva, funcional e formal entre o conceito global do edifício e a

utilização de sistemas solares ativos, dentro de um quadro referencial ditado pela avaliação de sustentabilidade.

Com base na proposta de metodologia formulada foi efetuada a sua aplicação a dois casos de estudo, de forma a validar a hipótese. Os resultados da validação foram analisados permitindo a interpretação da informação resultante e a geração das respetivas conclusões.

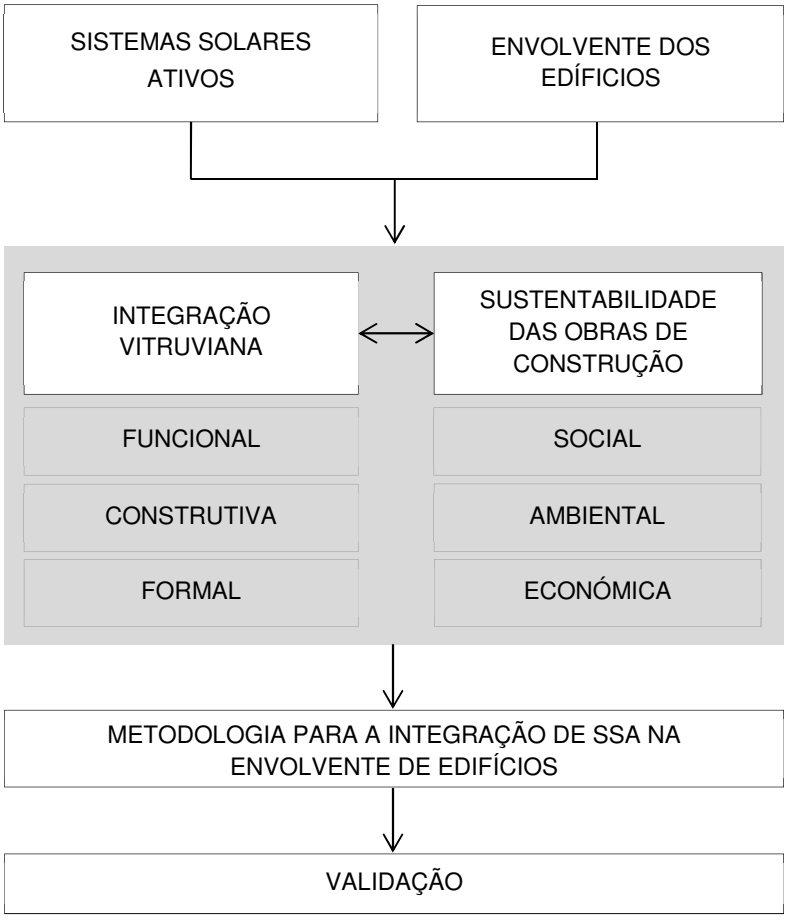


Figura 1.22 - Processo metodológico de investigação

1.6 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A investigação efetuada foi estruturada no presente documento em 8 Capítulos e 3 Anexos, apresentados de forma sintética na Figura 1.23. O primeiro Capítulo consiste na presente introdução que inclui a apresentação do problema cientifico e um enquadramento alargado do contexto em que este se coloca, assim como a sua justificação e pertinência.

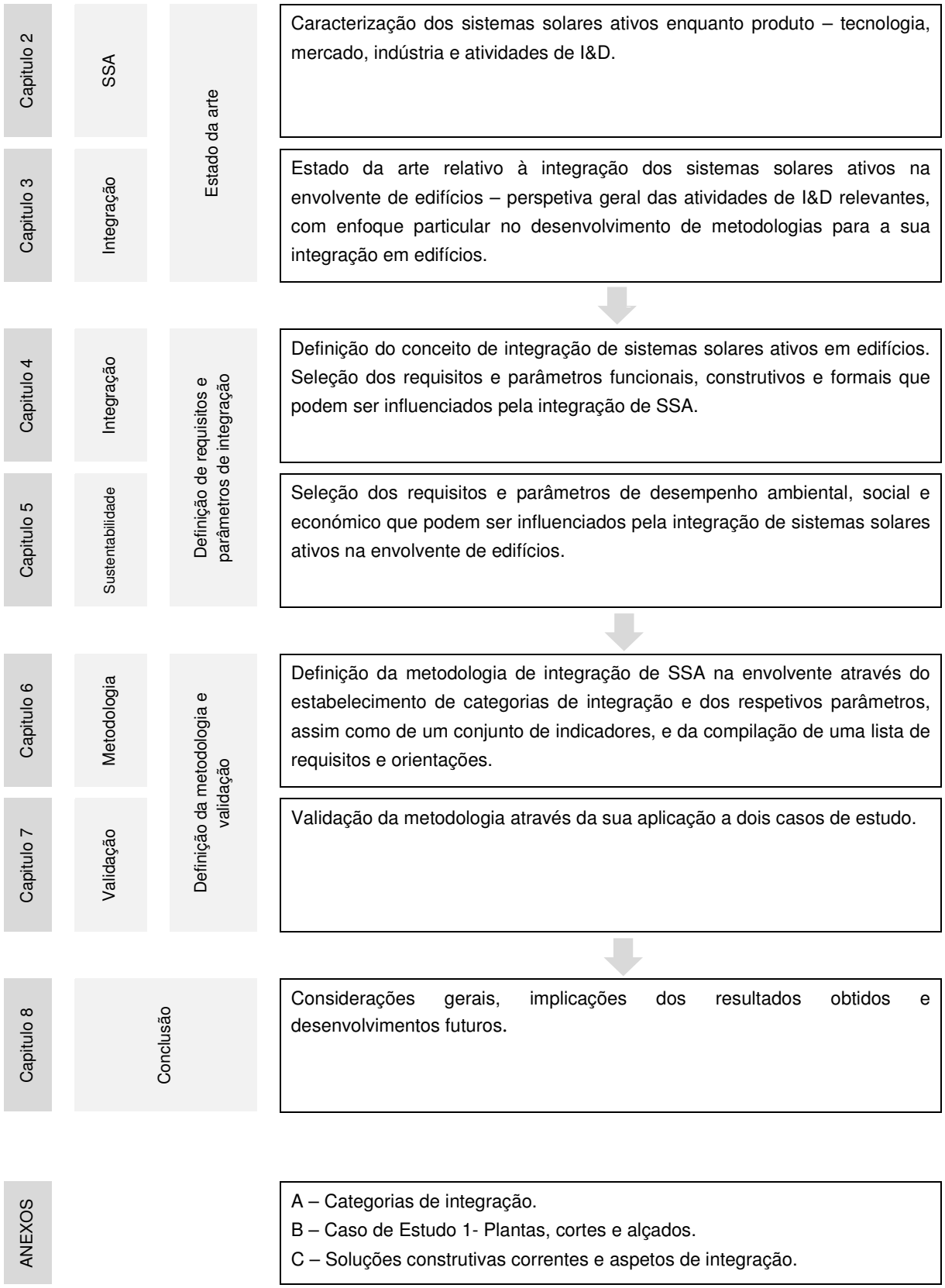


Figura 1.23 – Organização do documento

2
SISTEMAS SOLARES ATIVOS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo é abordado o estado da arte relativo aos sistemas solares ativos enquanto produto e as suas perspetivas de evolução. É caracterizada a tecnologia (princípios de funcionamento, constituição, apresentação, aplicações tipo, eficiência), são descritas as atividades de investigação e desenvolvimento (I&D) recentes ao nível do produto, e brevemente apresentados o mercado e a indústria. A abordagem aos SSA é contextualizada pelos aspetos com potencial para a utilização e integração na envolvente de edifícios, sendo excluídas as tecnologias solares ativas que não permitem essa utilização.

Salienta-se que a integração de SSA na envolvente é uma área que tem registado uma evolução considerável a vários níveis. No desenvolvimento enquanto produto BIST, BIPV e BIPV/T, verifica-se uma tendência para a inovação aliada a fatores qualitativos e económicos, revelada na capacidade dos SSA substituírem componentes construtivos tradicionais em edifícios, procurando desenvolver e promover soluções de fácil instalação. Este é um aspeto importante, pois demonstra que o desenvolvimento futuro dos SSA é também direcionado para o edifício, e não apenas para os sistemas como componentes isolados, e que a indústria aposta nesse sentido, seguindo a tendência de valorização da produção descentralizada de pequena escala.

A abordagem à caracterização dos SSA segue a seguinte ordem: coletores térmicos; módulos fotovoltaicos; e sistemas híbridos.

2.2 COLETORES TÉRMICOS

2.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Os sistemas solares térmicos absorvem a radiação solar e convertem-na em calor. Este processo é realizado através de um absorsor, normalmente metálico, que se comporta como um corpo negro. O absorsor geralmente incorpora um sistema de tubos que transfere o calor gerado através de um meio de transporte fluido (água ou ar), para uma forma de armazenamento, frequentemente composta por um tanque de água quente. A conversão e a transferência de calor são feitas no coletor. Geralmente o calor é transferido para a água potável através de um permutador de calor. O sistema total é assim formado pelo coletor, por um meio de transferência do calor, pelo circuito solar e pelo modo de armazenamento. As primeiras instalações de coletores solares térmicos remontam ao final do século XIX e destinavam-se ao aquecimento de águas sanitárias em utilizações domésticas (Figura 2.1), mantendo-se essa a sua utilização maioritária hoje em dia.

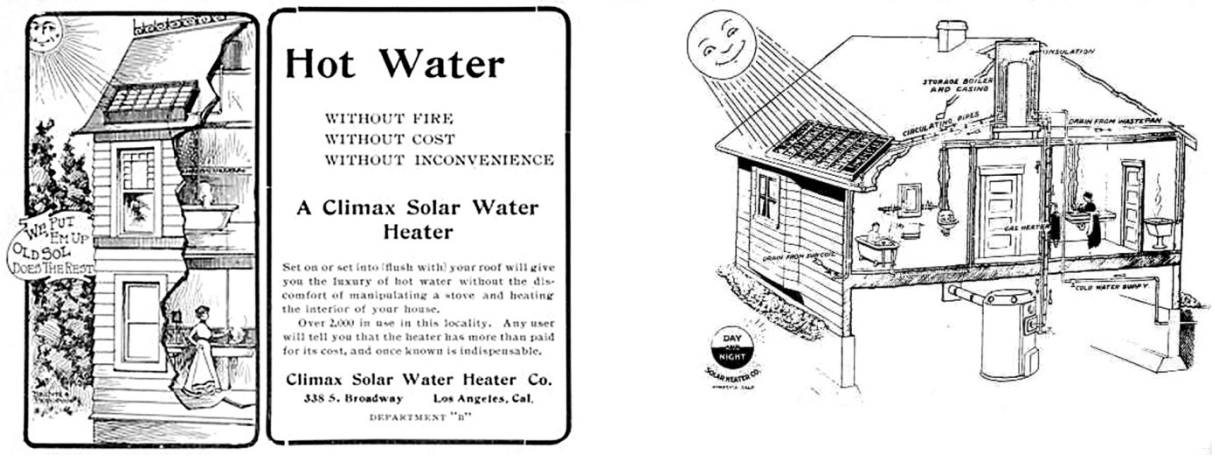


Figura 2.1 – Publicidade do primeiro coletor solar comercializado nos finais do séc. XIX, na Califórnia (EUA) (à esquerda) (UMA Solar, 2013), e ao modelo seguinte comercializado no início do séc. XX (à direita) (Inspectapedia, 2015)

2.2.2 CONSTITUIÇÃO, FORMAS DE APRESENTAÇÃO, APLICAÇÕES E EFICIÊNCIA

O aproveitamento solar térmico é feito através de diferentes tipos de coletores com características diversas que se adequam a usos distintos (Figura 2.2 e Tabela 2.1).

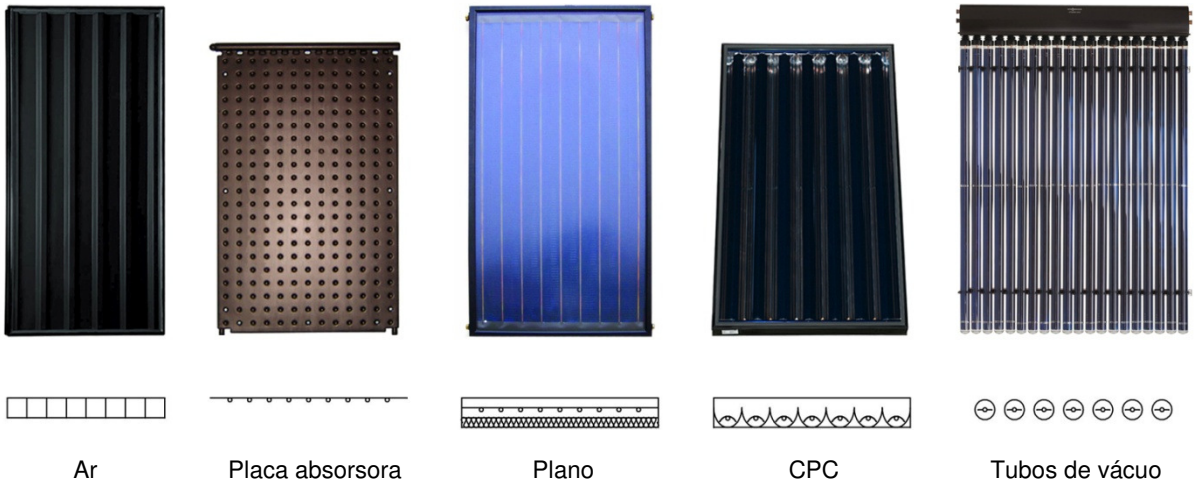


Figura 2.2 – Aspeto dos diferentes coletores correntes no mercado e secção esquemática tipo. Da esquerda para a direita: coletor de ar; placa absorsora; coletor plano; coletores concentradores parabólicos compostos (CPC); e tubos de vácuo.

A área de instalação está associada ao tipo de necessidades. Para a mesma produção de energia, dependendo do tipo de coletor e da sua eficiência, são necessárias áreas de instalação diferentes. Ao aumento da eficiência corresponde um aumento de custo dos sistemas.

Tabela 2.1 – Aplicações típicas dos coletores solares térmicos correntes, adaptado de (ADENE et al., 2004, Probst, 2009)

Meio de transferência	**Tipo de coletor**	**Temperaturas de funcionamento (°C)**	**Aplicações**	**Produção** (a) **kWh/m^2.a**
Ar	Placa absorsora	---	Pré-aquecimento de ar	
Hidráulico	Placa absorsora	25-50	Aquecimento de piscinas, pré-aquecimento de AQS	406
	Plano	50-100	AQS, aquecimento ambiente	616 (b) 462 (c)
	Concentradores parabólicos (CPC)	70-100	AQS, aquecimento e arrefecimento, calor de processo industrial	
	Tubos de vácuo	70-120	AQS, aquecimento e arrefecimento, calor de processo industrial	

(a) Cálculo da produção de energia através do método proposto pela ESTIF - European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF, 2011) para a conversão da área de coletor em rendimento energético, tendo como referência 1400 kWh/m^2 de radiação global anual.

(b) Utilização em AQS.

(c) Utilização como *combi-systems* (AQS e aquecimento/arrefecimento ambiente).

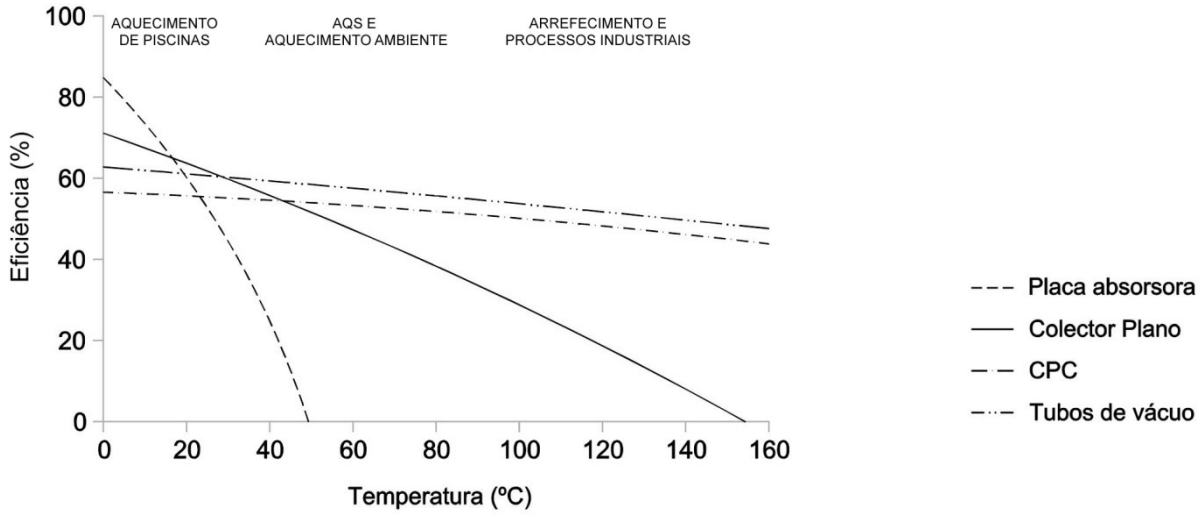


Figura 2.3 - Eficiência e tipos de aplicação dos coletores solares térmicos em relação às temperaturas de funcionamento, adaptado de (ADENE et al., 2004, Probst, 2009)

Na Europa, a utilização maioritária de sistemas solares térmicos destina-se ao aquecimento de águas sanitárias em habitações unifamiliares, recorrendo a coletores hidráulicos planos (83,8% do total das instalações no final de 2013) (Mauthner, Weiss e Spörk-Dür, 2015). Neste tipo de utilização, as necessidades de água quente podem ser totalmente satisfeitas pelo sistema solar térmico durante o verão, o sistema normalmente é dimensionado para proporcionar uma cobertura anual de cerca de 50% a 80% das necessidades, sendo os restantes 20% a 50% assegurandos através de um sistema de apoio.

O tanque de armazenamento pode funcionar de dois modos: por sistema de termossifão, o que implica que se situe acima do coletor, pois o circuito funciona por gravidade; ou através de circulação forçada, requerendo uma bomba de circulação, o que possibilita a colocação do tanque noutro local do edifício (Figura 2.4). Além da utilização generalizada em AQS, os coletores térmicos são também utilizados no aquecimento de piscinas através de soluções simples e, através de soluções mais complexas, no aquecimento e refrigeração ambiente (através de chillers de absorção).



Figura 2.4 – Coletor plano adicionado à cobertura com sistema termossifão (à esquerda) e integrado na fachada com circulação forçada (à direita) (Unterrainer, n. d.)

No hemisfério norte, a escolha do azimute sul e da inclinação em função do valor da latitude maximiza a captação de energia anual num coletor fixo. A escolha de uma inclinação maior do que a latitude do local, maximiza a captação de energia no inverno, período em que os requisitos energéticos (aquecimento) são também maiores.

Na generalidade dos coletores térmicos disponíveis correntemente no mercado, a sua materialidade é definida por elementos vítreos, metálicos ou plásticos, e a cor predominante varia entre o preto e o azul-escuro, raramente apresentando outros tons. Deste modo, o tipo de coletor, o tipo de utilização, a eficiência da instalação e a área necessária, assim como a orientação e inclinação, a cor, a materialidade, e os restantes componentes que compõem o sistema (para além do coletor), constituem as condicionantes básicas na integração destes sistemas em edifícios. Devido às características específicas dos vários tipos de coletores existentes, a sua versatilidade e grau de integração em coberturas e fachadas de edifícios são diversos. Nesse sentido, procede-se a uma descrição dos mesmos e das suas possibilidades de integração, com base na oferta do mercado e dos projetos de I&D em curso, em função do tipo de tecnologia.

2.2.2.1 Coletores de ar

Os coletores de ar são geralmente constituídos apenas pelo absorsor (plástico ou metálico) existindo também modelos que possuem uma cobertura em vidro (Figura 2.5, Figura 2.6 e Figura 2.7). Apesar da sua baixa eficiência, estes coletores possuem desempenhos satisfatórios em algumas aplicações, sobretudo a nível industrial e comercial, onde são normalmente utilizados para aquecimento direto do ar ou para pré-aquecimento do ar em sistemas de AVAC (Figura 2.8). Os coletores de ar metálicos sem vidro, devido à sua simplicidade e semelhança a um revestimento corrente, possuem naturalmente um grau de integração que pode atingir níveis elevados, uma vez que são utilizados de forma idêntica a um revestimento metálico tradicional (Figura 2.7), além de que estão disponíveis numa gama de cores relativamente abrangente.



Figura 2.5 – Coletor de ar com cobertura em vidro (Solar Home, 2015)

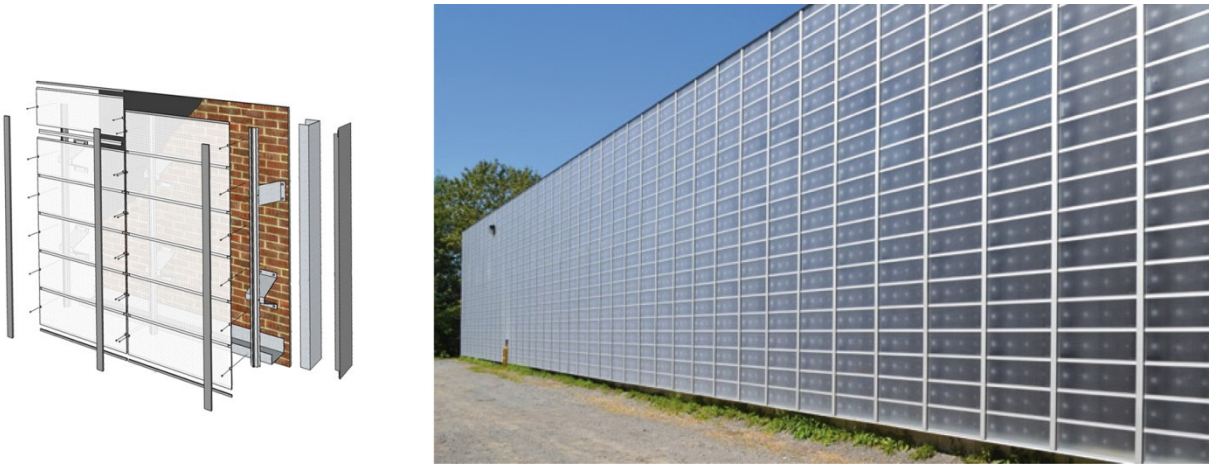


Figura 2.6 – Coletor de ar com cobertura em placas de policarbonato (Enerconcept Distribution, n. d.)



Figura 2.7 – Esquema do sistema Solarwall numa parede de alvenaria (à esquerda) e exemplo de aplicação no hangar de autocarros Calgary Transit, em Alberta, no Canadá (à direita) (Conserval Engineering, 2015)

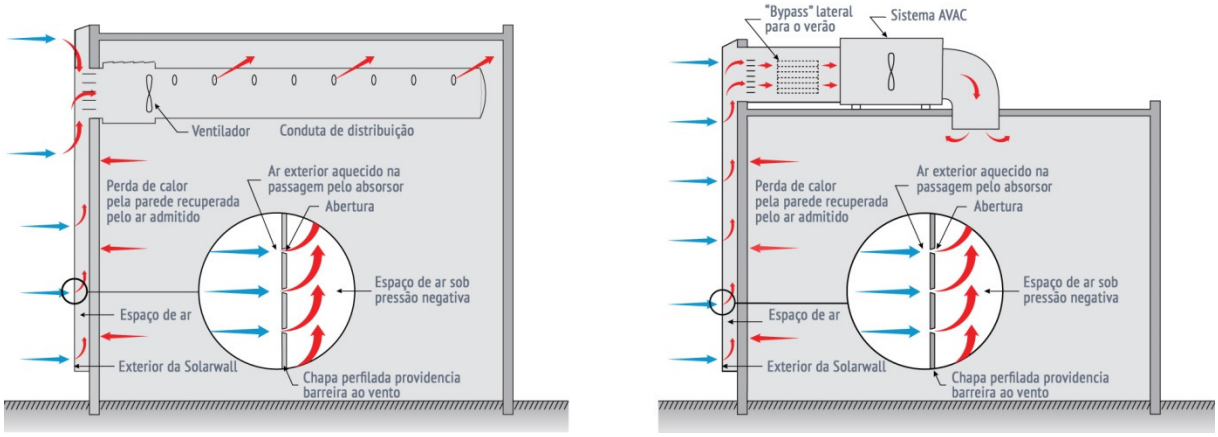


Figura 2.8 – Esquema da utilização de coletores de ar para aquecimento do ar (à esquerda) e pré-aquecimento do ar num sistema de AVAC (à direita) (Conserval Engineering, 2015).

2.2.2.2 Placa absorsora

Relativamente aos coletores hidráulicos, os sistemas mais simples são geralmente constituídos apenas pela placa absorsora, em plástico ou metal. Possuem uma eficiência baixa, devido à inexistência de cobertura, revestimento e isolamento, o que significa perdas de calor consideráveis, tal como nos coletores de ar. No entanto, devido à sua simplicidade, apresentam um custo mais baixo em relação aos restantes coletores hidráulicos.

No que se refere aos coletores constituídos por placas absorsoras ou planos sem cobertura em vidro, existem no mercado sistemas que permitem a realização de revestimentos metálicos de cobertura e fachada. Um exemplo é o "Absorsor AS" da Energie Solaire, que consiste em duas placas de aço inoxidável ligadas entre si através de um padrão "almofada", no qual o circuito solar resulta dos interstícios das ligações (Figura 2.9). Este sistema permite executar o revestimento final de fachadas e coberturas, inclusive permitindo ligeiras curvaturas, assim como a utilização de elementos "dummy" para zonas de revestimento não ativas (ou seja, a utilização de uma placa simples, com as mesmas características de dimensão e acabamento, para fins arquitetónicos de composição da envolvente).



Figura 2.9 – Placa absorsora como revestimento de fachada, edifício CeRN (Centro de serviços das estradas nacionais), em Bursins, na Suiça. Pormenor da fachada, onde é visível a compatibilização do coletor com o circuito solar e os restantes materiais (ISSF, n. d., Service immeubles, n. d.)

Outro exemplo é o sistema WAF que consiste num revestimento de alumínio para fachadas, de fácil aplicação através de um sistema de clipagem, e que possui um revestimento solar seletivo que otimiza a captação solar. O circuito hidráulico é composto por uma série de tubos que permanecem ocultos após montagem (Figura 2.10) e é destinado a aplicações de baixa temperatura.

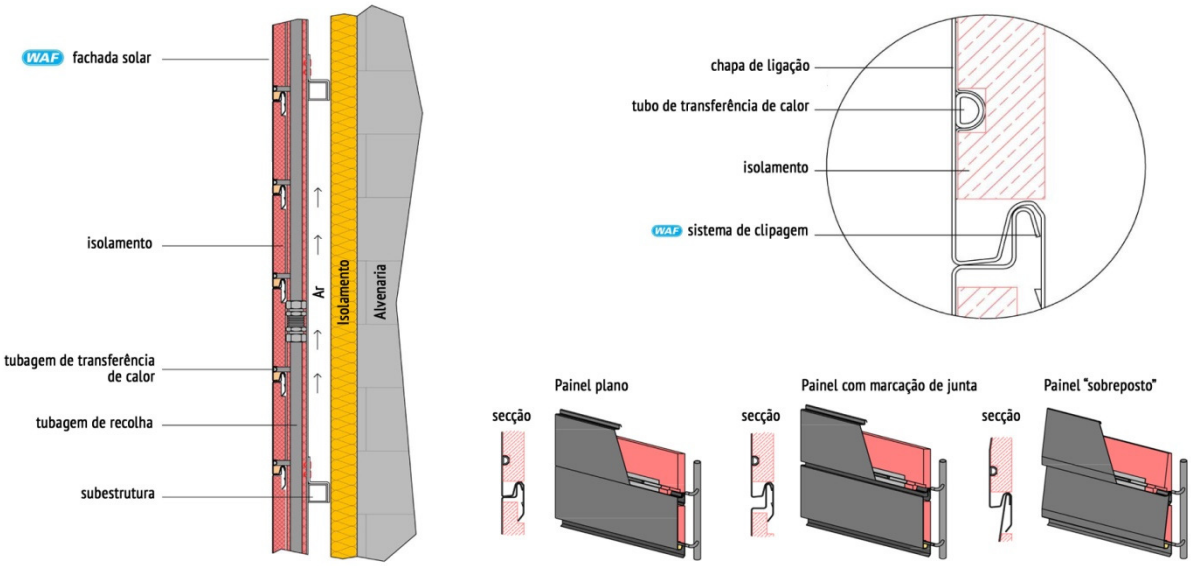


Figura 2.10 – Sistema de fachada WAF (WAF Fassadensysteme, n. d.)

Refere-se ainda o coletor Eco-Nok destinado a coberturas inclinadas, sendo integrado como remate arquitetónico das águas de uma cobertura, na cumeeira do telhado. Esta posição também lhe confere autonomia em relação à orientação solar (Figura 2.11).

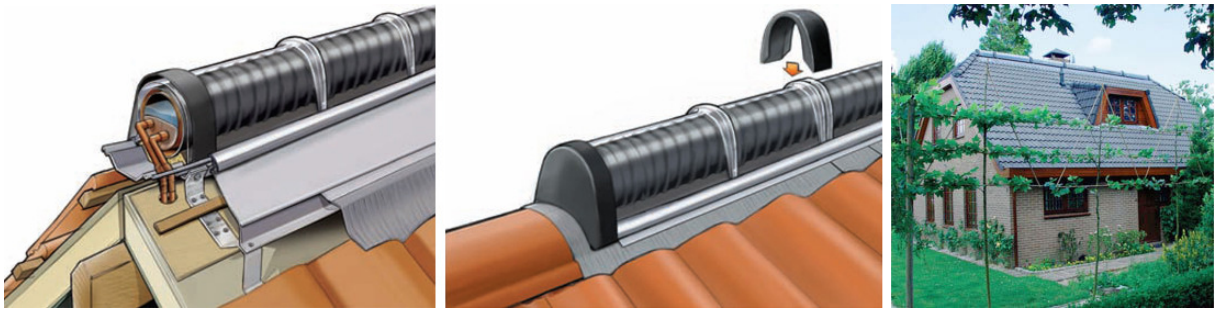


Figura 2.11 – Coletor Eco-Nok integrado como remate de cumeeira (Inventum, 2004)

Também vários fabricantes de revestimentos tradicionais, tais como zinco, cobre, ardósia e asfalto, adaptaram um circuito solar aos seus produtos, disponibilizando assim um sistema solar térmico visualmente impercetível, como no caso do sistema "QUICK STEP – SolarThermie" da Rheinzink, em que a área correspondente ao coletor solar é formalmente idêntica à zona corrente de revestimento (Figura 2.12). Nestas situações, tal como nos coletores de ar, o nível de integração é elevado. Neste contexto, refere-se que o princípio dos coletores térmicos também pode ser utilizado de forma passiva numa construção tradicional, através da realização de um revestimento de fachada e/ou cobertura de

cor escura, em que todo o edifício funciona como um grande coletor solar. Neste sentido, há uma linha ténue de separação entre um sistema solar térmico ativo e passivo, sendo que, na maioria dos casos, os sistemas são na realidade híbridos. Como exemplo, uma parede de trombe é um sistema térmico passivo, no entanto, pode recorrer a sistemas de apoio ativos, como ventilação forçada.



Figura 2.12 – Exemplo de integração do circuito solar num sistema de construção tradicional (Rheinzink, n. d.-b)

Em termos de I&D refere-se o desenvolvimento de absorsores sob a forma de lâminas de proteção solar, pelas empresas Ssolar e White Architects, que podem ser integrados arquitetonicamente pelo exterior ou interior de vãos envidraçados, ou ainda entre panos envidraçados (Figura 2.13). No que respeita à adaptação do circuito solar a revestimentos tradicionais, Kuhn (2013) estudou a possibilidade da sua incorporação na camada final de um isolamento térmico pelo exterior (sistema ETICS) (Figura 2.14).



Figura 2.13 – Coletor solar (absorsor) que também funciona como proteção solar (Farkas et al., 2013)



Figura 2.14 – Coletor térmico de baixa temperatura, composto por um circuito solar embebido no acabamento de um isolamento térmico pelo exterior (PSE e iD, 2011)

2.2.2.3 Coletores planos

Os coletores planos são compostos por uma placa absorsora, caixa com isolamento térmico, e cobertura em vidro transparente (que nos sistemas integrados poderá ter características específicas para determinados requisitos da envolvente). Podem ter várias configurações (em termos de placa absorsora, tipo de vidro, isolamento) que influem na sua eficiência. Vários fabricantes comercializam produtos que permitem a integração em sistemas de fachada, neste aspeto, a sua capacidade de integração pode ser alta em coberturas ou fachadas envidraçadas, ou que possuam revestimentos vítreos (Figura 2.15). No entanto, existem exemplos em que os sistemas correntes foram utilizados nesse sentido, ressalvando algumas disposições construtivas (Figura 2.16). Alguns fabricantes de caixilharia e revestimentos exteriores também oferecem a possibilidade da compatibilização dos seus sistemas com coletores planos e módulos fotovoltaicos, tanto para integração em coberturas como fachadas (Sapa, Schüco, Velux, Eternit). De modo a reduzir o custo de fabrico, existem também coletores polímeros (SHC-IEA, 2015), cuja camada final exterior consiste num revestimento polímero em detrimento do vidro (Figura 2.17).



Figura 2.15 – Edifício de habitação e comércio em Zurique, na Suíça, com coletores planos na fachada (Hill, 2015, Kämpfen für architektur, 2011)



Figura 2.16 – Centro Operacional da Brisa, Carcavelos (Carrilho da Graça Arquitetos, n. d.)



Figura 2.17 – Coletor solar térmico polímero integrado em fachada, conjunto residencial Bjornveien, em Oslo, na Noruega (Archdaily, 2010)

Verificam-se ainda outras aproximações aos sistemas térmicos direcionadas à envolvente, baseadas no princípio dos coletores planos, como o sistema desenvolvido pela Soltech, no qual telhas de vidro formam a cobertura final, sobrepondo-se a absorsores modulares. Este sistema, ao possuir a mesma configuração e modularidade das telhas correntes é compatível em termos construtivos com esse tipo de revestimento tradicional (Figura 2.18). Neste contexto também se refere o "Robin Sun Solar Thermal Glass", no qual a permeabilidade à luz é possível através da inserção do circuito solar em perfis de alumínio "U" que funcionam como absorsores. Estes perfis são dispostos espaçadamente e inseridos entre dois panos de vidro preenchidos com gás árgon. Esta configuração permite a integração em fachadas (dentro dos limites de um vão ou em fachadas-cortina) e coberturas, contribuindo para o isolamento térmico, iluminação natural (permeabilidade à luz, controlo de encandeamento) e ligação visual interior/exterior, para além da produção de energia térmica (Figura 2.19).

Um dos problemas na integração de SSA em edifícios, por oposição a um produto puramente técnico, é o da materialidade visível. Nesse sentido, no LESO - Laboratoire d'Énergie Solaire da EPFL, foi desenvolvido o "LESO Couloured Glazing" que consiste num vidro colorido para coletores planos e módulos fotovoltaicos, designado Kromatix e comercializado pela Swissinso, cuja perda de

transmissão da radiação é inferior a 10%. No caso dos coletores planos, o vidro colorido permite esconder o absorsor (a sua típica cor escura, imperfeições de superfície e pontos de solda), o que, associado ao leque de cores disponível e à possibilidade de utilizar o mesmo vidro em zonas não expostas ao sol (sem o coletor plano ou módulo fotovoltaico associado), permite uma unidade de acabamento e aumenta a integrabilidade em edifícios (Figura 2.20).



Figura 2.18 – Coletor composto por revestimento final de telhas de vidro (SolTech Energy, 2016)

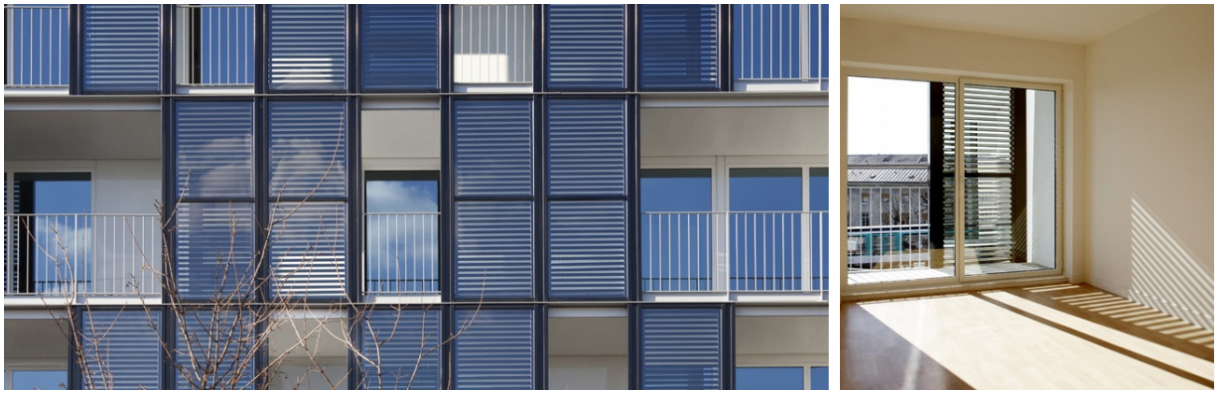


Figura 2.19 – Coletores RobinSun com permeabilidade à luz utilizados na fachada num edifício de habitação social em Paris, França (Philippon Kalt, n. d.)



Figura 2.20 – Vidros coloridos Kromatix sobre coletores planos como revestimento de fachada na sede do fabricante de coletores Doma (Schweizer, 2016)

Ao nível da I&D, encontram-se em desenvolvimento placas absorsoras com aberturas que possuem transmitância angular seletiva, que permitem bloquear a radiação solar de ângulos elevados e possibilitam o contacto visual com o exterior na horizontal e para ângulos inferiores, assim como a permeabilidade à luz e o controlo solar (Figura 2.21) (Hermann, Kuhn e Rommel, 2008, Maurer et al., 2012). Ainda ao nível da proteção solar, vários autores (Abu-Zour, Riffat e Gillott, 2006, Palmero-Marrero e Oliveira, 2006) estudaram diferentes configurações de um circuito solar inserido em perfis de alumínio correntemente utilizados como lamelas de sombreamento (Figura 2.22).

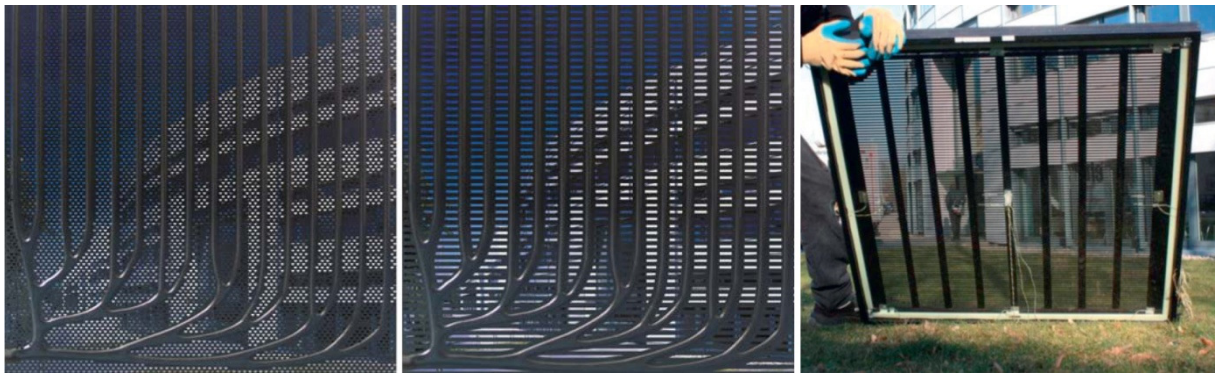


Figura 2.21 – Coletores semitransparentes (Hermann, Kuhn e Rommel, 2008, Maurer et al., 2012)

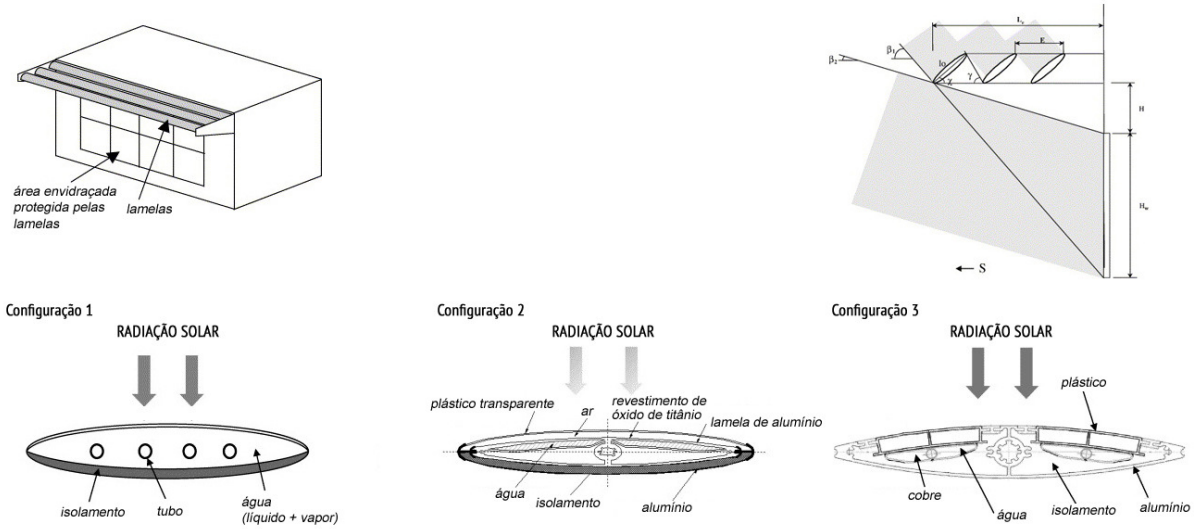


Figura 2.22 – Diferentes configurações do circuito solar integrado em lamelas de sombreamento (Palmero-Marrero e Oliveira, 2006)

Outra aproximação à integração na envolvente incide sobre a geometria e a materialidade visível dos coletores. Visa, Comsit e Duta (2014) propuseram coletores não vítreos para revestimento de zonas de fachada opaca com geometrias alternativas ao retângulo corrente, que consistem em duas formas - triângulo equilátero e trapézio isósceles – cuja modularidade pode originar a formação de diversos padrões (Figura 2.23).

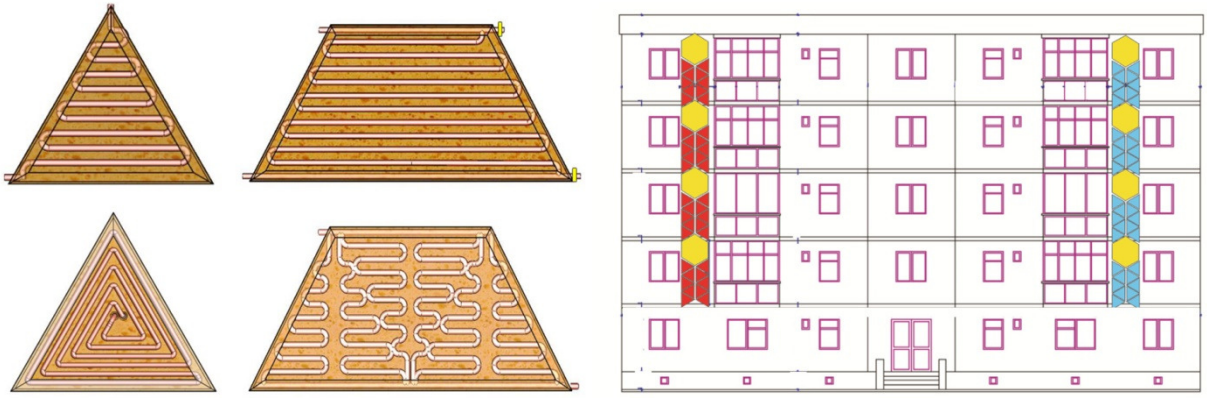


Figura 2.23 – Variações da forma dos coletores e do circuito solar e proposta de aplicação (Visa, Comsit e Duta, 2014)

2.2.2.4 Coletores concentradores parabólicos

Os coletores concentradores parabólicos compostos (CPC), são semelhantes aos planos, no entanto, através de uma superfície refletora em forma de parábola, aumentam a área de captação e reduzem a área de absorção, tornando-os assim mais eficientes. Combinam as vantagens da tecnologia de concentração com a facilidade de aplicação dos coletores planos, atingindo deste modo temperaturas e custos intermédios entre os dois sistemas.

Em Portugal, a empresa Sunaitec desenvolveu um sistema solar multifuncional denominado "Estruturas solares multifunções" que consiste num conjunto de tubos elípticos de plástico transparente que incluem um espelho metálico que através do ponto focal direciona a luz para o absorsor metálico (esse recetor pode também ser fotovoltaico). Um sistema de seguimento suporta os tubos e assegura o ângulo adequado à exposição solar permitindo também evitar que se atinjam temperaturas elevadas (como no verão quando ocorrem períodos de não utilização, com consequente perda de fluido pelas válvulas de segurança). Este sistema alia a concentração solar à inclinação otimizada através do seguimento do sol e promove a integração arquitetónica como dispositivo de proteção solar ou guarda-corpos (Figura 2.24). Como sombreamento destaca-se ainda a possibilidade de ser utilizado como pérgula com a função adicional de encerramento total da área coberta.



Figura 2.24 - A utilização do sistema Sunaitec numa pérgula e como guarda-corpos em varandas (Sunaitec, 2014)

Ao nível de I&D, verifica-se o estudo de coletores CPC específicos para fachadas. Como as fachadas são mais penalizadas que as coberturas em termos de exposição solar, devido à altura do sol, Carbajal

e Pereira (2008) estudaram um coletor CPC com o absorsor horizontal, no qual a ótica compensa os ângulos de incidência do sol no verão (Figura 2.25), tendo comprovado que o seu desempenho é superior a um coletor plano vítreo e a um CPC normal, em especial para azimutes próximos de zero graus, por causa de seu comportamento ótico e do melhor desempenho térmico. Estudos semelhantes foram também realizados para localizações na Europa do Norte (Ramirez-Stefanou et al., 2011).

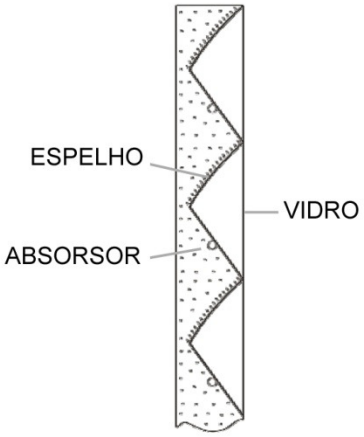


Figura 2.25 - Corte esquemático tipo de coletor CPC adaptado a fachada (Carbajal e Pereira, 2008)

Apesar de não constituir um CPC, o sistema de fachada simulado por Chemisana et al. (2013) baseia-se num sistema de concentração, neste caso composto por refletores lineares Fresnel que concentram a radiação solar para um recetor estático (Figura 2.26). Este é um sistema normalmente utilizado em aplicações de grande escala, mas neste caso é integrado à escala da fachada, conciliando a produção de energia (destinada a arrefecimento) com a proteção solar.

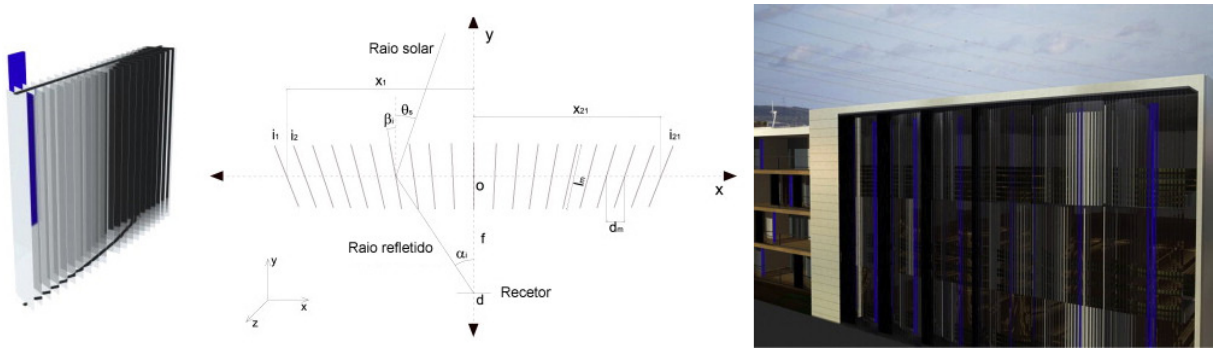


Figura 2.26 – Vista e esquema do sistema de concentração Fresnel e recetor (elemento azul), e integração na fachada (Chemisana et al., 2013)

2.2.2.5 Tubos de vácuo

Os tubos de vácuo possuem uma eficiência elevada devido à sua conformação, na qual as placas absorsoras são instaladas em vácuo dentro de um tubo de vidro, reduzindo assim as perdas. Dependendo da conformação interna e da relação placa absorsora/tubo, alguns sistemas possibilitam desempenhos elevados sem inclinação otimizada de suporte, o que é vantajoso em termos de utilização

em coberturas planas e fachadas. Estes coletores funcionam bem a baixas temperaturas e com céu nublado, sendo aptos para calor de processamento. A sua configuração confere-lhes um potencial a explorar em utilizações como filtragem e controlo de luz e existem soluções comerciais que conformam guarda-corpos para varandas (Figura 2.27).



Figura 2.27 – A utilização de tubos de vácuo como guarda-corpos (Schweizer Energie, 2014)

Ao nível de I&D, encontra-se em desenvolvimento no Instituto de Construção de Edifícios e Design (IBK2) da Universidade de Estugarda, um sistema de fachada destinado a edifícios altos e envidraçados, uma vez que este tipo de edifícios frequentemente possui uma área de cobertura disponível reduzida comparativamente à de fachada (Behling, Fuchs e Volz, 2007). O sistema consiste em tubos de vácuo Schott-Rohrglas com um espelho semicircular incorporado, que permite a melhor orientação solar através da rotação do tubo (Figura 2.28). Para além da captação de energia para fins térmicos (AQS e aquecimento/arrefecimento ambiente), o sistema também funciona como dispositivo de sombreamento, permitindo regular a entrada de luz natural pela métrica da grelha que forma. Deste modo, o espaçamento dos tubos e o grau de rotação dos espelhos, em relação à vertical, influenciam a iluminação natural e os ganhos energéticos. Dependendo das variações destes fatores, o sistema proposto atinge ganhos de energia até cerca de 35% superiores a um sistema de fachada com coletores planos. O fabricante Kollektorfabric, em parceria com o instituto Fraunhofer, também se encontra a desenvolver um sistema semelhante para fachadas, mas com base em tubos de vácuo com ar, destinado a aquecimento e arrefecimento solar (como apoio a um sistema de AVAC), e possibilitando o controlo solar. Este sistema possui a vantagem de não apresentar riscos em caso de falha por estagnação, ou por derrame, evaporação ou degeneração do fluido (Kollektorfabrik, 2011).

Caponetto et al. (2013) propõem um sistema de revestimento de fachada composto por tubos de vácuo com refletores concentradores de alumínio perfurado. Os tubos de vácuo são integrados em painéis modulares que permitem variações do espaçamento entre tubos, possibilitando várias composições de fachada, inclusive soluções de *brise-soleil*. Os painéis podem ainda incluir isolamento térmico, refletores concentradores com seguimento solar, e módulos fotovoltaicos sob a forma de lamelas (Figura 2.29).

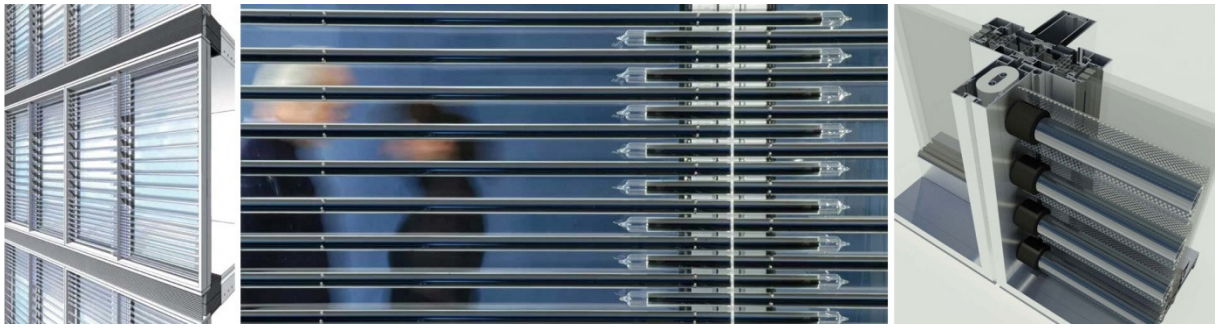


Figura 2.28 - Sistema de fachada com integração de tubos de vácuo (Behling e Volz, n. d.)

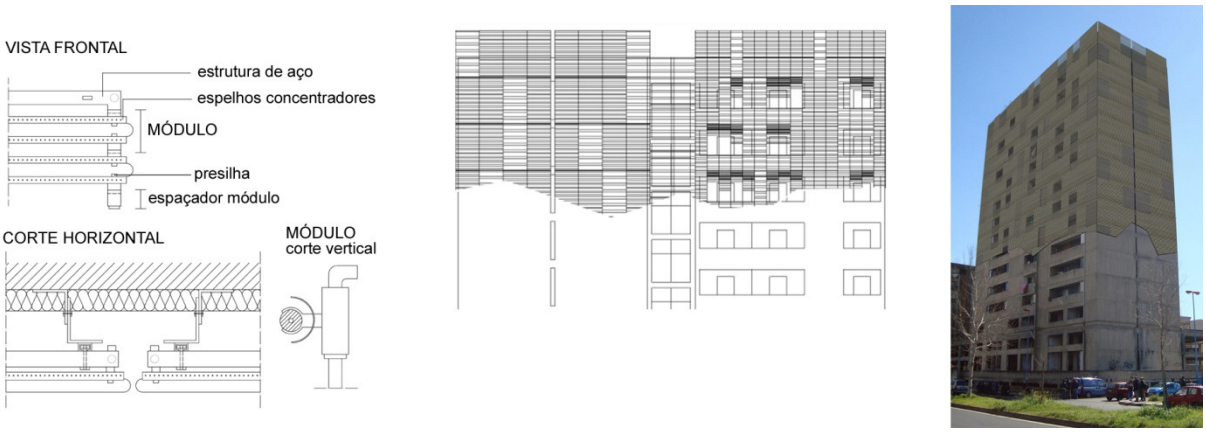


Figura 2.29 – Esquemas dos painéis de revestimento com tubos de vácuo e a simulação da sua integração num edifício (Caponetto et al., 2013)

2.2.3 MERCADO E INDÚSTRIA

O sector da tecnologia solar térmica tem registado um crescimento constante, a capacidade térmica em operação aumentou 8 vezes entre 2000 e 2014. Segundo o relatório anual do "Solar Heating and Cooling Programme" da Agência Internacional de Energia (Mauthner, Weiss e Spörk-Dür, 2015), a capacidade instalada a nível mundial no final de 2013 perfazia 374,7 GW_{th}, o que corresponde a uma área total de 535 milhões de m^2 de coletores (o relatório reúne informação de 60 países cuja capacidade instalada representa 95% do mercado solar mundial).

A China e a Europa detêm 82% da capacidade instalada mundialmente, da qual 70,2% corresponde à China. A capacidade acumulada em operação por tipo de coletor divide-se da seguinte forma: 99,6% são coletores hidráulicos e apenas 0,4% são coletores de ar (com e sem vidro). Desta percentagem de coletores hidráulicos, 70,5% são tubos de vácuo (valor intensamente influenciado pelo mercado chinês), 22,4% são coletores planos, e 6,7% são placas absorsoras. Na China predominam os tubos de vácuo, e nos EUA e na Austrália os absorsores sem vidro. No entanto, nos restantes países, verifica-se um predomínio dos coletores planos, que na Europa representaram 83,8% das novas instalações em 2013. A nível mundial, a maioria dos sistemas térmicos é de termossifão (77%), no entanto, na Europa e nos EUA predominam os sistemas de circulação forçada.

Em 2013, a nível mundial, 89% da energia produzida por coletores hidráulicos destinou-se a AQS (80% em habitações unifamiliares e 9% em edifícios maiores, tais como habitações multifamiliares, hotéis, hospitais, escolas), 6% destinou-se ao aquecimento de piscinas, 3% a *combi-systems* (AQS e

aquecimento), e a percentagem remanescente (que corresponde quase a 5 milhões de m^2) foi utilizada em *district heating*[4], calor de processo industrial e arrefecimento (Mauthner, Weiss e Spörk-Dür, 2015).

Verifica-se uma diversificação do mercado, por tipo de utilização, em alguns países europeus (como a Alemanha, Espanha e Áustria) em relação ao contexto mundial, patente na utilização dos sistemas térmicos em *combi-systems*, *district heating*, na indústria, e para arrefecimento solar, assim como na oferta de mercado de soluções nesse sentido, como para aquecimento em habitações unifamiliares, plurifamiliares e hotéis, sistemas de grande escala para *district heating*, e um crescente número de sistemas para ar condicionado, arrefecimento e aplicações industriais. De salientar que a utilização em *combi-systems* em alguns países europeus, como a Alemanha ou a Áustria, representa mais de 40% do mercado local. Também se refere que os sistemas de arrefecimento solar, apesar de constituírem um mercado de nicho, registaram a instalação de 1000 sistemas a nível mundial em 2012, e um crescimento entre os 40 e 70% nos oito anos precedentes. Cerca de 80% destas instalações encontram-se na Europa, principalmente na Espanha, Alemanha e Itália e são realizadas com coletores planos ou tubos de vácuo (o arrefecimento através de concentradores parabólicos ou Fresnel tem tido desenvolvimento na Índia, Austrália e Turquia).

Em 2014, na Europa, os 31,8 GW_{th} em operação (coletores planos e tubos de vácuo) geraram cerca de 24 TWh_{th} de energia solar contribuindo para evitar 2,75 Mt CO_2, e o volume de negócios do sector representou 2 biliões de Euros, tendo empregado 25 000 pessoas (ESTIF, 2015). Contudo, desde 2008 que se regista um declínio da capacidade instalada anualmente, uma vez que as medidas públicas de incentivo foram afetadas pela crise financeira e económica. No entanto, a capacidade total instalada continua a crescer, devido à sua importância na estratégia europeia, patente nos planos nacionais de energias renováveis, e alguns mercados específicos como Espanha ou Grécia cresceram em 2014. Apesar das instalações residenciais representarem o grosso das aplicações, as instalações de maior escala estão a crescer, nomeadamente os sistemas em edifícios plurifamiliares, e os sistemas acima de 35 kW_{th} (cerca de 50 m²) para aquecimento e arrefecimento comercial. Em termos de calor de processo industrial, onde vários projetos estão a ser implementados, a dimensão das instalações tem aumentado, estimando-se que evoluiu de uma média de 400 kW_{th} (cerca de 585 m^2), entre 2000 e 2007, para uma média de 1,5 MW_{th} (2100 m^2) em 2014, o que coloca estes sistemas na categoria de sistemas de grande dimensão 350 kW_{th} (500 m²), categoria onde o crescimento é notório, sobretudo devido às centrais de *district heating* na Dinamarca (ESTIF, 2015).

Em Portugal, tal como a nível europeu, os coletores mais utilizados são os coletores planos vítreos (seguidos, com uma expressão muito reduzida, pelos tubos de vácuo e placas absorsoras), sendo a utilização mais comum o aquecimento de águas sanitárias. Em 2014 a capacidade instalada foi de 54 961 m^2 (38 473 kW_{th}) e a capacidade acumulada de 1 133 965 m^2 (793 775kW_{th}). Em termos energéticos, a capacidade instalada no ano de 2014 permitiu a produção de 32 199 MWh proveniente de sistemas AQS e 1079 MWh através de sistemas combinados (AQS e aquecimento) (APISOLAR, 2014). Apesar do predomínio das instalações residenciais, verificou-se o crescimento das instalações no sector terciário e nos serviços. Contudo, o ritmo das instalações não é suficiente para atingir a meta de 2020 de 2,2 milhões de m^2 instalados e, segundo o relatório anual do mercado solar térmico na Europa (ESTIF, 2015), tal só é possível recorrendo a medidas de apoio.

A energia solar térmica é a mais convencional no que respeita ao fabrico de produtos e à sua utilização. Existem vários fabricantes nacionais de sistemas solares térmicos e a capacidade total transacionada pelos agentes do sector é genericamente destinada ao mercado interno (APISOLAR,

[4] *District heating* é uma rede urbana de distribuição de calor, gerado numa central, destinado às necessidades de aquecimento residenciais e comerciais, tais como AQS e aquecimento ambiente.

2012). Apesar do salto qualitativo de um elemento puramente técnico para um elemento construtivo ou arquitetónico ainda estar no início, verifica-se uma atenção gradual da indústria (solar e dos produtos de construção), sobretudo a nível europeu, na investigação e desenvolvimento de produtos orientados para a integração em edifícios e não apenas como meros coletores autónomos. Como estratégia, têm sido estudadas formas de compatibilizar várias funções da envolvente num só sistema. Apesar de não existirem estatísticas das instalações relativas a BIST, o tipo de aplicação comum caracteriza-se por instalações de pequena dimensão em edifícios (AQS em utilizações domésticas).

2.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O efeito fotovoltaico consiste na geração de eletricidade a partir da radiação solar, através do aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Foi descoberto no séc. XIX pelo físico Alexandre Edmond Becquerel. A palavra deriva do grego *phos* que significa luz e da unidade de voltagem elétrica que deriva do nome do físico italiano Alessandro Graf von Volta. Os primeiros sistemas fotovoltaicos foram desenvolvidos em aplicações espaciais em meados do séc. XX e as primeiras instalações terrestres foram efetuadas na década de 70, sobretudo em sistemas técnicos e remotos (sem acesso à rede elétrica). Na década de 80 assiste-se às primeiras experiências da sua utilização na envolvente de edifícios e, nas décadas seguintes, a um crescente desenvolvimento tecnológico e interesse pela integração em edifícios.

2.3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A conversão da radiação solar em eletricidade é efetuada através de células fotovoltaicas, sendo as mais comuns à base de silício. As células são encapsuladas e ligadas eletricamente entre si, em série ou paralelo, formando um módulo fotovoltaico. Na maioria das aplicações, os módulos são também ligados entre si, em série e/ou paralelo, designando-se o seu conjunto por painel (célula < módulo < painel). Os módulos fotovoltaicos produzem corrente direta, havendo assim necessidade de um inversor para transformar a corrente direta em corrente alterna. Os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados ligados à rede elétrica ou como sistemas isolados, sendo neste caso necessário um sistema de armazenamento, normalmente composto por baterias. O sistema total "BOS" (*balance of system*) é assim composto por módulos fotovoltaicos, inversores, sistemas de controlo, cablagens, estruturas de fixação e dispositivos de armazenamento de energia (se necessário).

2.3.2 CONSTITUIÇÃO, FORMAS DE APRESENTAÇÃO, APLICAÇÕES E EFICIÊNCIA

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados de diversas formas. Consoante os materiais ativos das células, são classificados como cristalinos ou filmes finos. Na Tabela 2.2 são apresentadas as características das células mais comuns no mercado, consoante o tipo de material que as compõem. Além destas, existem ainda células que combinam o silício cristalino e amorfo e células multijunção de alta eficácia que, devido ao seu custo, apenas são utilizadas na indústria aeroespacial ou em sistemas de concentração. Verifica-se o desenvolvimento tecnológico no que respeita os processos de fabrico (como é exemplo a redução de espessura das células cristalinas nos últimos anos), assim como a procura de novas células solares, com o objetivo de obter maior rendimento energético e reduzir o custo. Como alternativa ao silício estão em desenvolvimento células nano cristalinas sensibilizadas com corante e outras células orgânicas baseadas no processo fotoeletroquímico. Na Figura 2.31 está patente a evolução da eficiência das células em laboratório, agrupadas por famílias de semicondutores.

Tabela 2.2 – Tipos e características das células fotovoltaicas correntes, adaptado de (DGS, 2004, IEA-ETSAP e IRENA, 2013)

Células	**Silício cristalino**		**Película fina**		
Tipo	Monocristalino Mono-c-Si	Policristalino Multi-c-Si	Silício amorfo a-Si	CIS (disseleneto de cobre e índio)	CdTe (telureto de cádmio)
Produção	Tradicionalmente as cristalinas são cortadas		Geralmente depositadas sobre um substrato de vidro, metal ou plástico		
Eficiência célula (a)	16-22%	14-18%	7-9%	7-12%	10-11%
Eficiência módulo	13-19%	11-15%			
Forma (b)	Circular Semiquadrada Quadrada	Quadrada	Livre		
Dimensão (c) **(mm)**	100 x100 125 x 125 Diâmetro 100, 125, 150	100 x100 125 x 125 150 x 150 210 x 210	Máximo 2440x770 Especial 3000x2000	Máximo 1200x600	Máximo 1200x600
Espessura (mm)	0,3		1-3 (substrato) 0,001 (revestimento)	3 (substrato) 0,003 (revestimento)	3 (substrato) 0,008 (revestimento)
Estrutura	Homogénea	Cristais com várias orientações	Homogénea		
Cor (d)	Azul-escuro a preto (com antirreflexo) Cinza (sem antirreflexo)	Azul (com antirreflexo) Cinza (sem antirreflexo)	Castanho avermelhado a preto	Preto	Verde-escuro a preto
Mercado	30%	60%	10%	<1%	<1%
Área 1kWp (e)	7-9m^2	8-11m^2	16-20m^2	11-13m^2	14-18m^2

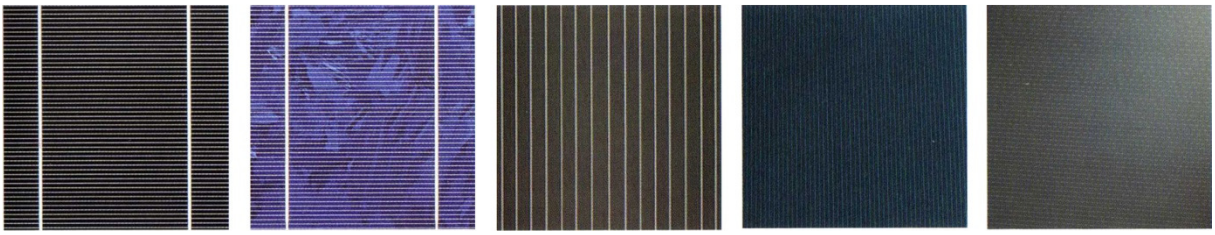
(a) Percentagem que específica a quantidade da radiação solar incidente que é convertida em corrente elétrica. Depende do material e estrutura da célula, e, em operação, depende da temperatura da célula. A eficiência dos módulos é inferior às das células comerciais, e a eficiência das células comerciais é inferior à obtida em laboratório.

(b) Dimensão das células cristalinas depende da espessura.

(c) Nas células cristalinas a dimensão dos módulos depende da dimensão do vidro. As células de película fina possuem flexibilidade o que permite a realização de módulos curvos.

(d) As células cristalinas podem abranger mais cores através da espessura da camada antirreflexo. Geralmente, quanto mais clara a cor maior o efeito negativo na produção de eletricidade.

(e) Aproximado, depende de vários fatores, tais como localização, orientação e inclinação, entre outros. Os módulos semitransparentes requerem maior área para a mesma produção, pois parte da sua superfície é não ativa.



Silício monocristalino | Silício policristalino | Silício amorfo | CIS | CdTe

Figura 2.30 - Células fotovoltaicas (Hegger et al., 2008)

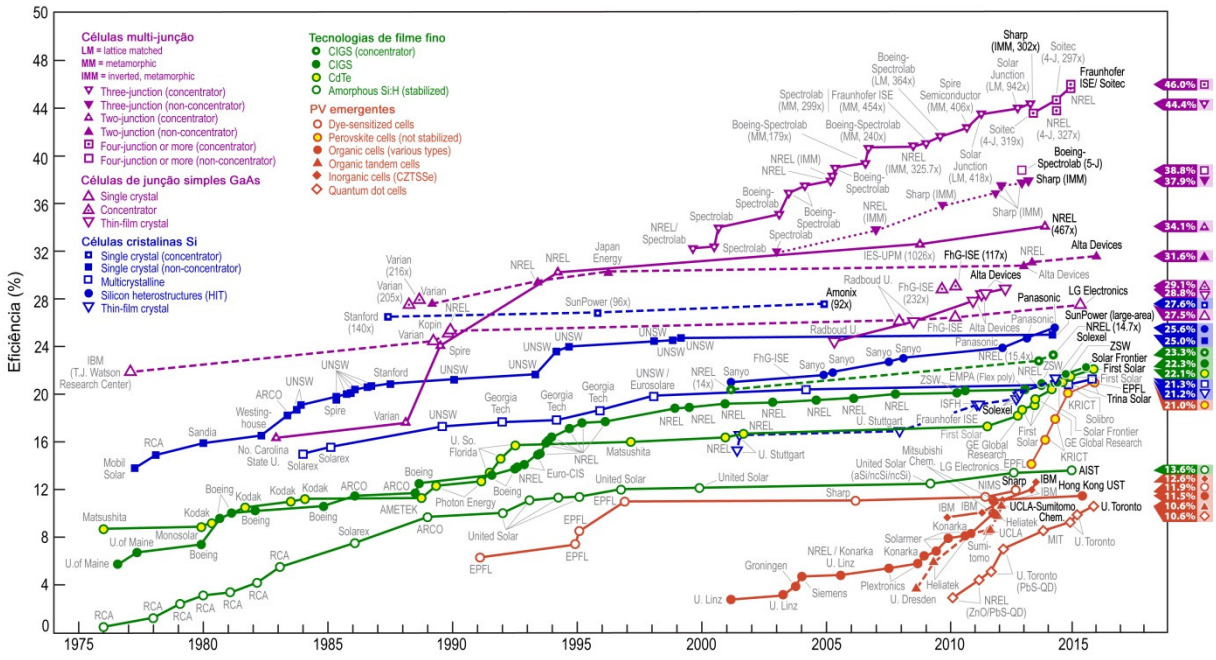
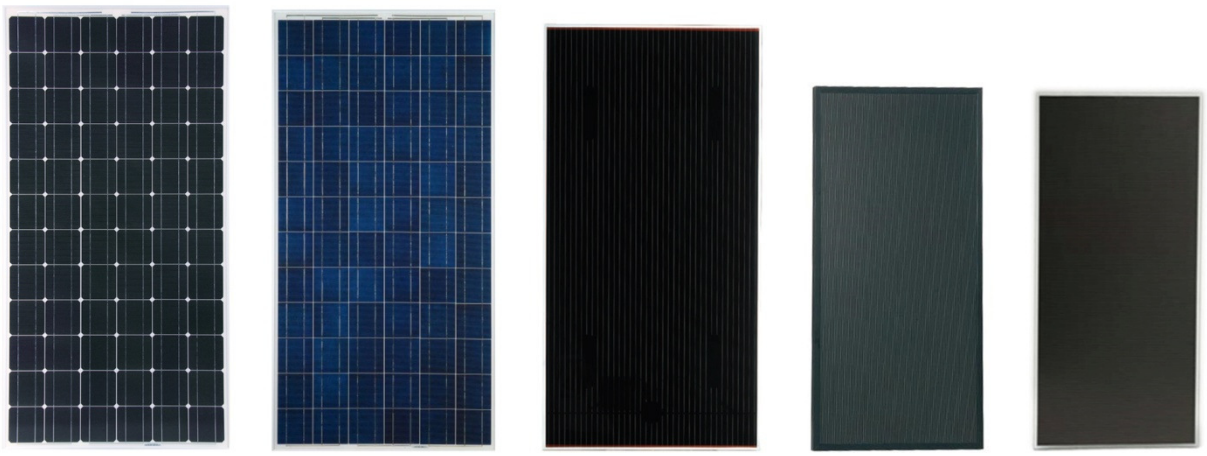


Figura 2.31 – Eficiência de células fotovoltaicas em laboratório ao longo do tempo (NREL, 2016)

Nos módulos, as células são ligadas em série ou paralelo de forma a atingirem desempenhos relevantes para a maioria das aplicações, e são utilizados diodos para compensar as eventuais áreas em sombra. Para proteger as células das tensões mecânicas, dos agentes atmosféricos e da humidade, estas são encapsuladas por laminagem e possuem proteções frontais e posteriores que normalmente consistem num vidro frontal e num substrato de vidro ou plástico. Os diferentes tipos de células são aplicados de forma diversa na composição dos módulos: as cristalinas são dispostas como peças individuais, devendo existir um mínimo de distância isoladora entre elas; e as células de película fina são produzidas juntamente com o substrato de suporte, normalmente dispostas de forma a cobrir toda a área, sendo a estrutura da célula e o circuito feito no processo de revestimento.

Relativamente ao encapsulamento de células cristalinas (Figura 2.33), o superstrato é normalmente composto por um vidro temperado com alta transmissão luminosa (normalmente com baixo teor de óxido de ferro), com capacidade de suportar ações térmicas e camada antirreflexo, tipicamente com uma espessura de 3/4 mm, chegando até 10 mm em módulos de grandes dimensões. O vidro que

compõe o superstrato pode ter funções específicas da construção, como nos coletores térmicos planos, tais como vidro de segurança endurecido ou laminado, potenciando várias utilizações no edifício.



Monocristalino Policristalino Silício amorfo CIS CdTe

Figura 2.32 - Módulos fotovoltaicos correntes

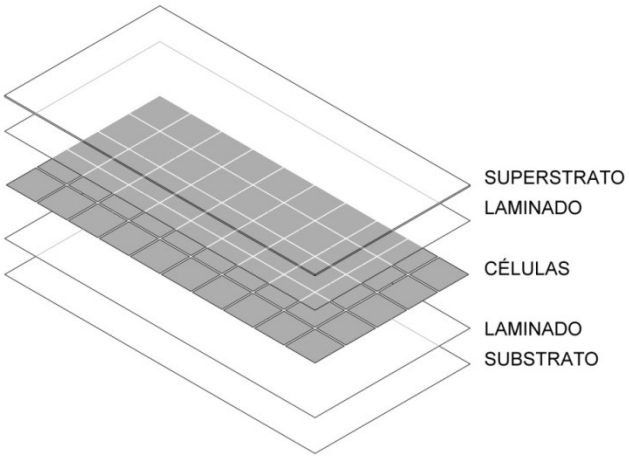


Figura 2.33 - Encapsulamento de módulos cristalinos

A laminagem que envolve as células pode ser constituída por diferentes materiais:

- EVA (Etileno-Acetato de Vinila) solução mais comum, não é resistente aos UV, normalmente o substrato é PVF (Tedlar), PET (tereflalato de polietileno), metal ou vidro;
- Teflon (PTFE – politetrafluoretileno) é resistente aos UV, tem uma refletividade baixa, dispensa vidro frontal, é utilizado em módulos de pequena escala como telhas solares;
- Resina, normalmente utilizada em módulos de grande dimensão devido às dificuldades de produção com EVA;
- TPU (poliuretano termoplástico) com este material há a perspetiva de fazer todo o módulo num só passo.

O substrato pode ser constituído por:

- Tedlar;
- PET (tereflalato de polietileno);
- Vidro (módulos transparentes – vidro/vidro);
- Metal.

Os módulos cristalinos vidro/filme são os mais comuns no mercado, apresentando dimensões fixas, normalmente entre 0,5 e 1,5 m^2, compostos por células quadradas de 10 a 15 cm de lado, dispostas ortogonalmente e com potências de 100 a 300 Wp. Esta configuração resulta da otimização para atingir o maior rendimento ao menor custo.

No encapsulamento de filmes finos o processo mais usual é a laminação com EVA, como substrato é utilizado Tedlar, um filme metálico ou vidro. Os módulos de filme fino podem ser flexíveis, nesse caso as células são aplicadas diretamente em folhas de metal, películas de plástico ou resinas sintéticas transparentes. A flexibilidade permite opções de integração diversificadas.

Os módulos cristalinos e de filme fino podem ainda possuir um caixilho, normalmente constituído por perfis de alumínio. A eficiência dos módulos depende do tipo de tecnologia, variando entre os 5 e os 20% (o limite teórico da célula de silício cristalino é de 29%), ou seja, 80% ou mais da radiação incidente é convertida em calor. O rendimento dos módulos diminui com o aumento da temperatura, quer ambiente, quer causado pelo seu próprio funcionamento. Esta particularidade permite que os sistemas fotovoltaicos possam ser articulados de forma a aproveitar o calor gerado pelo próprio funcionamento, sendo este o princípio dos sistemas híbridos PV/T. Os filmes finos são menos sensíveis ao aumento da temperatura de funcionamento (à exceção dos módulos CIS) e possuem melhor desempenho que os cristalinos para níveis baixos de radiação solar e radiação difusa. Devido à forma das células (faixas estreitas e compridas) os filmes finos também são menos afetados por sombreamentos parciais. Os módulos cristalinos e de película fina diferem em termos de:

- Eficiência;
- Dependência à intensidade da radiação;
- Dependência à intensidade da temperatura;
- Resposta espectral;
- Tolerância ao sombreamento.

O processo de geração de corrente dá-se sem ruído, movimentos ou emissões, com pouca necessidade de manutenção (geralmente considerando-se apenas a limpeza da superfície e a substituição do inversor). Normalmente os módulos são fabricados com uma caixa de junção pronta a fazer a ligação, pelo que a sua ligação aos restantes sistemas é facilitada.

Os módulos são certificados de acordo com normas internacionais que diferem para módulos cristalinos e para módulos de película fina. O modo de especificação mais comum é o STC (Condições de Teste Standard) expresso em kW/p e resulta das seguintes condicionantes: 1000 W/m^2 de energia incidente, com uma temperatura de 25ºC, e massa de ar AM 1,5. O rendimento energético numa aplicação real depende de vários fatores, designadamente: radiação solar incidente (localização e

orientação dos módulos); grau de eficiência da instalação fotovoltaica como um todo; e sombreamento (as perdas são desproporcionais, em excesso, em relação à área sombreada).

Numa instalação fotovoltaica que gere a toda a energia que um utilizador residencial necessite num ano, e não possua capacidade de armazenamento, o consumo próprio é cerca de 30%, ou seja, 70% da eletricidade produzida é injetada na rede (Jäger-Waldau, 2014). A superfície necessária para satisfazer as necessidades médias anuais de energia elétrica de uma casa típica[5] varia entre os 14 m^2 em Roma (2700 kWh/ano), 33 m^2 em Copenhaga (4400 kWh/ano) e 45 m^2 em Nova Iorque (11000 kWh/ano) (IEA-ETSAP e IRENA, 2013). Estas áreas são compatíveis com a envolvente de uma habitação. Sendo o módulo fotovoltaico a unidade básica de integração, as suas dimensões e forma fixas condicionam a articulação na envolvente. No entanto, podem ser produzidos módulos personalizados de acordo com especificações geométricas de projeto. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos (como a Ertex Solar ou a Meyer Burger) e a indústria de fachadas (como a Schüco ou a Sapa) permitem a personalização dos módulos. É possível introduzir alterações nos seguintes parâmetros:

- Tipo de célula (forma e dimensão, estrutura e textura, cor, transparência);
- Disposição das células no módulo (padrão, densidade, transparência);
- Contactos da célula (frontais ou posteriores, alinhamentos);
- Tipo de superstrato (vidro antirreflexo, textura *light trap*);
- Tipo de substrato (transparente ou opaco, cor, textura);
- Forma e dimensão do módulo;
- Caixilho do módulo (tipo de perfil, cor).

As figuras seguintes ilustram algumas das possibilidades listadas. A alteração destes parâmetros implica algumas condicionantes, como a diminuição da eficiência na produção de energia e, obviamente, um aumento do custo, mas também adicionam qualidades, como a permeabilidade à luz ou resultantes de um maior controlo formal, entre outros aspetos.

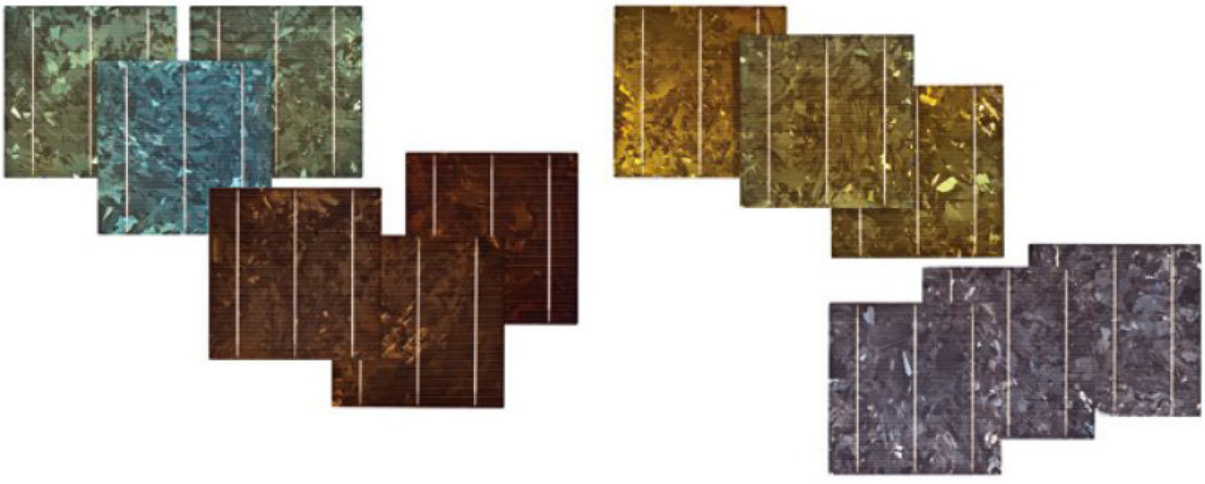


Figura 2.34 – Efeito de alteração da coloração de células policristalinas através da variação da espessura da camada antirreflexo (Sunways, n. d.)

[5] Baseado na radiação solar disponível, no consumo de eletricidade e assumindo uma eficiência do sistema fotovoltaico de 14%, tendo em conta o excesso de produção na primavera e no verão, e a necessidade de energia adicional da rede durante o inverno.

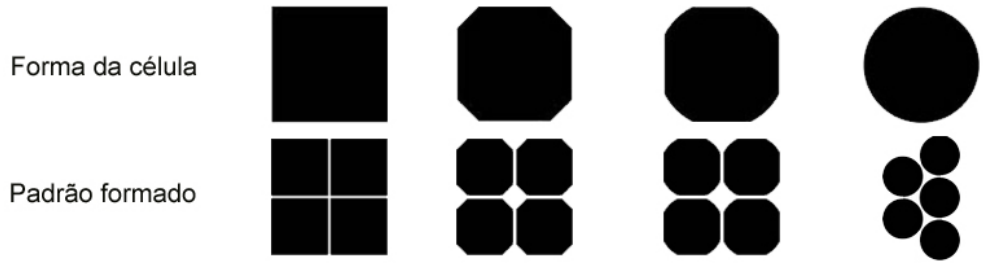


Figura 2.35 – Relação entre a forma da célula e o padrão formado

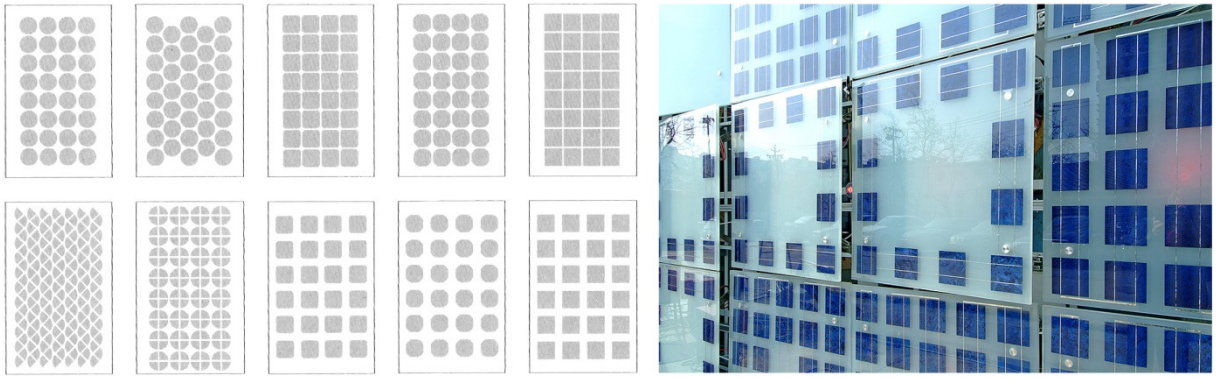


Figura 2.36 – Diferentes padrões definidos pelas células na conformação do módulo (à esquerda) (Weller et al., 2010), módulos personalizados da fachada Green Pix Zero-Energy Media Wall (à direita) (ARUP, 2015)

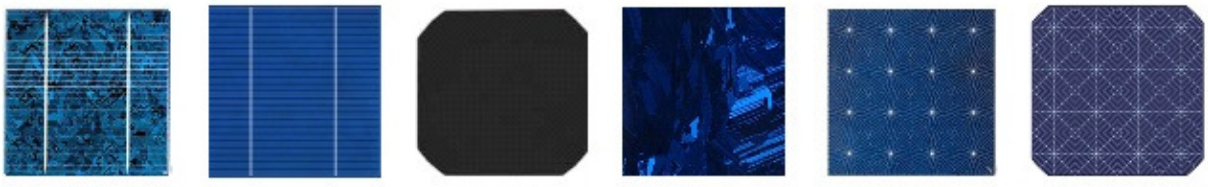


Figura 2.37 – Variação do aspeto das células pelo tipo e localização (frontal ou posterior) dos contactos (SUPSI e ISAAC, 2013)

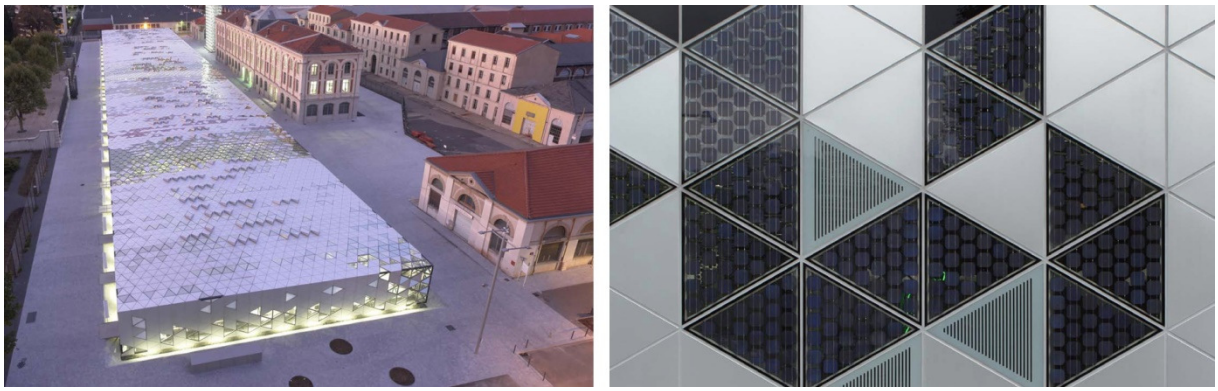


Figura 2.38 – No edifício Platine, na Cité du Design em Saint-Étienne, França, a forma triangular dos módulos fotovoltaicos é idêntica à do revestimento geral da envolvente e de outros elementos técnicos, como grelhas (LIN, 2009)

Na utilização de módulos fotovoltaicos como componentes de cobertura e fachada de edifícios, estes podem desempenhar funções adicionais para além da geração de energia, tais como revestimento final, onde podem garantir determinados requisitos da envolvente, como a resistência à penetração de água através da interligação dos módulos, mas também em termos térmicos, acústicos ou de resistência ao fogo. Para além de que o seu aspeto e materialidade podem proporcionar novas possibilidades formais. São diversas as soluções existentes no mercado para a integração na envolvente, desde sistemas de pequena escala, como "telhas solares", até coberturas integrais pré-fabricadas de grande dimensão (podendo constituir parte ou a totalidade da cobertura/fachada). Salienta-se que existem cada vez mais produtos especificamente concebidos para determinadas funções da envolvente, assim como módulos de remate específicos para a indústria da construção. Verifica-se também, por parte dos fabricantes de revestimentos tradicionais, a associação de células fotovoltaicos aos seus produtos, geralmente através da acoplação (Figura 2.39).



Figura 2.39 - Telhado integrado BIPV (à esquerda), o sistema inclui os remates dos limites da cobertura e de elementos pontuais, como a chaminé, é compatível com coletores térmicos e vãos, possui elementos decorativos com o mesmo acabamento para zonas sem exposição solar, e pode ser utilizado para a cobertura de alpendres através de módulos vidro/vidro (semitransparentes) (EVO, 2012), e telha cerâmica com módulo acoplado (à direita)

De seguida, descrevem-se os módulos fotovoltaicos por tipo de tecnologia, em função dos produtos disponíveis no mercado e as atividades de I&D relacionadas com o desenvolvimento de produto, na perspetiva da sua utilização em edifícios.

2.3.2.1 Módulos cristalinos

O mercado disponibiliza módulos cristalinos específicos para a envolvente, podendo estes serem integrados em revestimentos opacos ou semitransparentes em cobertura (Figura 2.40), fachadas ventiladas, fachadas cortina e fachadas duplas de vidro. Alguns fabricantes disponibilizam acessórios, normalmente compostos por perfis metálicos, que permitem combinar módulos fotovoltaicos, coletores térmicos e claraboias ou janelas (Meyer Burger, Schüco), e possibilitam a personalização dos remates e aplicações mais abrangentes (Onyx Solar, Issol, Systaic).

Nos módulos cristalinos, a semitransparência é conseguida através do distanciamento das células, ou da utilização de células perfuradas, podendo deste modo desempenhar funções de filtragem de luz/controlo solar em claraboias, vãos e fachadas envidraçadas (Figura 2.41), assim como permitindo a criação de padrões e texturas diversas. Existem também produtos específicos para sombreamento/controlo solar, através da conformação de palas ou *brise-soleil*. A Colt (uma empresa que comercializa produtos para controlo ambiente, ventilação e proteção solar), disponibiliza uma

série de soluções de proteção solar com células incorporadas, com possibilidade de escolha do tipo de sistema de proteção solar, do material, das células, do modo de operação, entre outros aspetos (Figura 2.42). Tal como nos coletores térmicos, a utilização de módulos fotovoltaicos que permitem a permeabilidade à luz e o controlo solar, interfere de forma acentuada e dinâmica no conceito energético, através da possibilidade de reduzir ou aumentar os ganhos solares diretos.

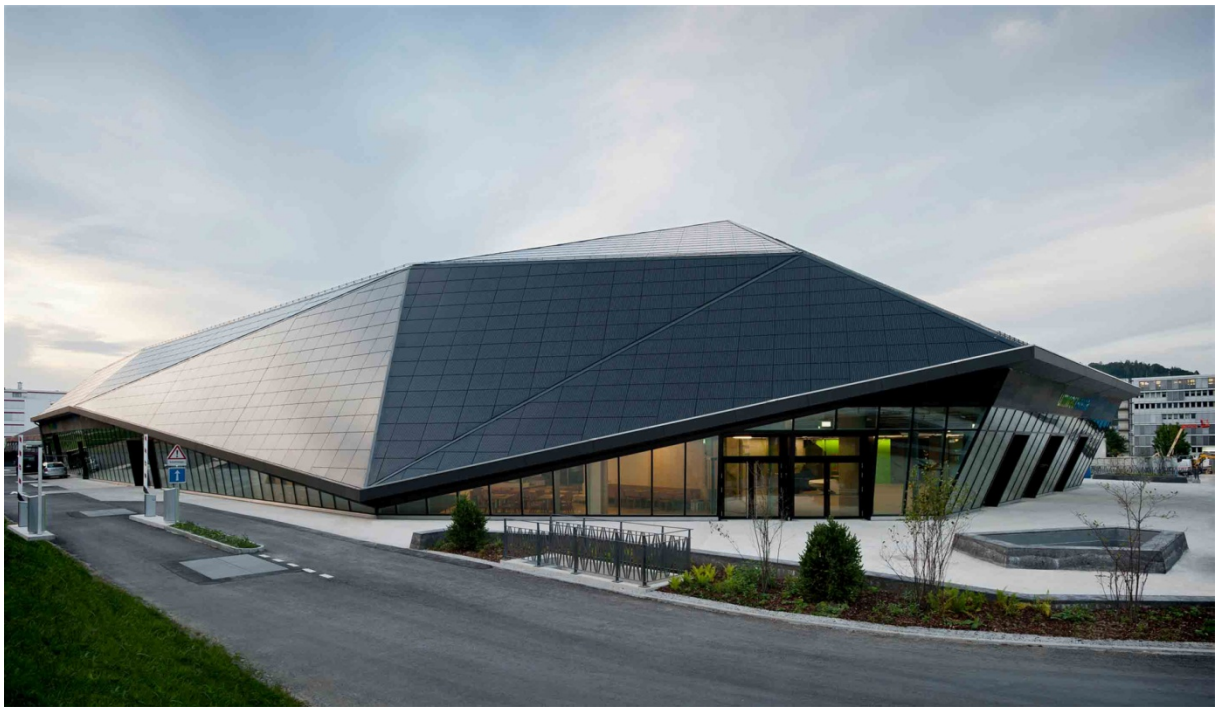


Figura 2.40 – Cobertura da Umwelt Arena Spreitenbach, revestimento composto por módulos fotovoltaicos cristalinos e coletores térmicos Meyer Burger (Detail, 2012)



Figura 2.41 – Exemplo de aplicação de módulos fotovoltaicos como filtragem de luz numa renovação de um edifício de escritórios de 1973 (Phileas, n. d.)



Figura 2.42 – Sistemas de proteção solar através de módulos fotovoltaicos (Colt, 2016)



Figura 2.43 – Módulos vidro/vido dispostos de forma alternada como proteção solar sobre fachada envidraçada, B.O.C. Bonneshof Office Center, Düsseldorf, Alemanha (Schüco, 2014)



Figura 2.44 - Proteção solar da fachada envidraçada da EWE Arena, em Oldenburg, na Alemanha, realizada através de um painel fotovoltaico de grandes dimensões, composto por módulos vidro/vidro, e que segue o movimento do sol (Colt, n.d.)



Figura 2.45- Sede da Q-Cells, Bitterfeld, Alemanha, proteção solar através de módulos vidro/vidro e portadas de correr em metal expandido (Colt, n. d.)



Figura 2.46 – A integração dos sistemas fotovoltaicos na California Academy of Sciences, em São Francisco, nos EUA, é efetuada na cobertura da galeria perimetral do edifício, recorrendo a células monocristalinas, laminadas em 720 módulos vidro/vidro (ocupam 920 m^2 e produzem 230 000 kWh/ano), os vidros adjacentes repetem o mesmo padrão das células a branco como elemento decorativo (Renzo Piano Building Workshop, n. d.)

No mercado também estão disponíveis vários sistemas baseados nos revestimentos tradicionais de ardósia e telhas planas, como os módulos para cobertura Sunstyle da Solaire France, que reproduzem um modo de aplicação tradicional, sendo neste caso o sistema composto por módulos e meios módulos, assim como elementos *dummy* (não ativos) destinados à execução de remates construtivos (Figura 2.47 e Figura 2.48). Também estão disponíveis módulos fotovoltaicos compatíveis com telhas correntes em termos de dimensão e encaixe (Solesia, Atlantis), quer de pequena dimensão, quer de grande dimensão (Figura 2.49). E ainda revestimentos tradicionais com células acopladas, tão diversos como telhas cerâmicas (Figura 2.50) ou revestimentos metálicos (Figura 2.51). Salienta-se que este tipo de produtos possui como desvantagem a impossibilidade de ventilar de forma adequada a parte posterior das células.

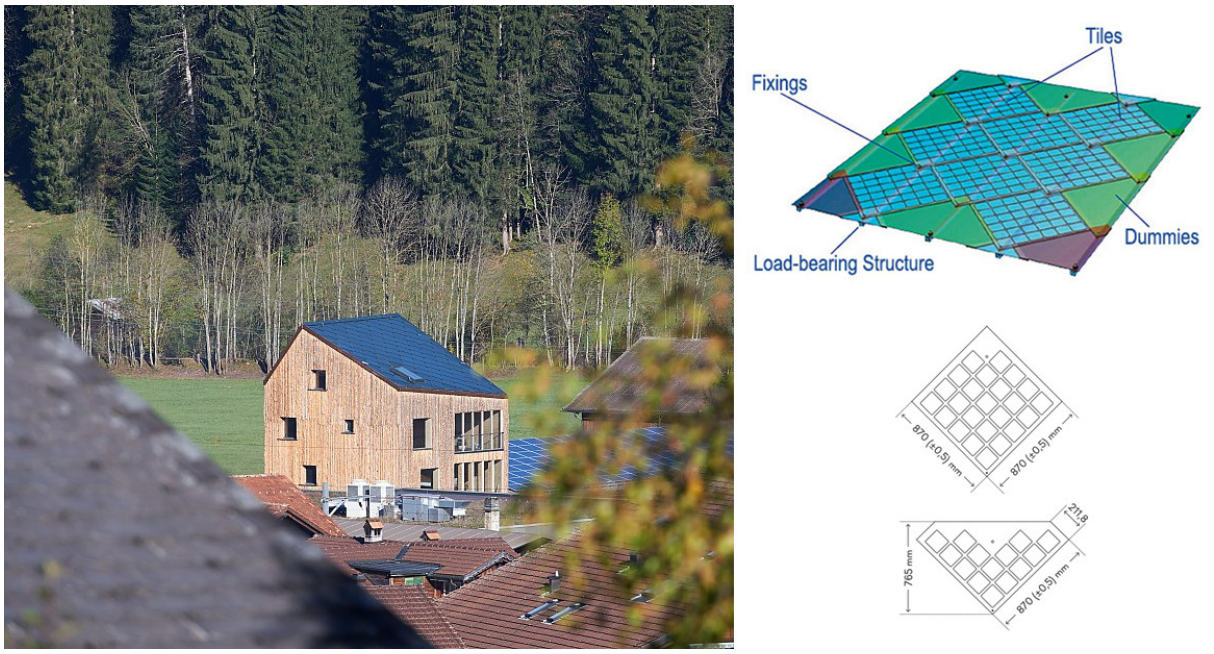


Figura 2.47 – Telhado revestido com o sistema Sunstyle, em Zweisimmen, na Suiça (à esquerda) e esquema do sistema (à direita) (Sunstyle, n. d.)



Figura 2.48 – Cobertura de pavilhões (70 000 m^2) em Perpignan, França, com o sistema Sunstyle, em substituição de um revestimento que continha amianto (Sunstyle, n. d.)



Figura 2.49 – Sistema Solesia, módulos fotovoltaicos adaptados às dimensões e encaixes de diversos tipos de telhas, neste caso um revestimento de cobertura da Eternit (ETERNIT, 2015)



Figura 2.50 – Telhas de pequena dimensão com células fotovoltaicas acopladas (Industrie Cotto Possagno, n. d.)



Figura 2.51 – Sistema “Quick Step Solar PV” da Rheinzink (Rheinzink, 2010)

Refere-se ainda uma abordagem particular à integração de sistemas fotovoltaicos em janelas, através da inclusão de células no interior de um vidro duplo (Figura 2.52). Este tipo de solução permite conciliar a geração de energia, a iluminação natural e o controlo de encandeamento.

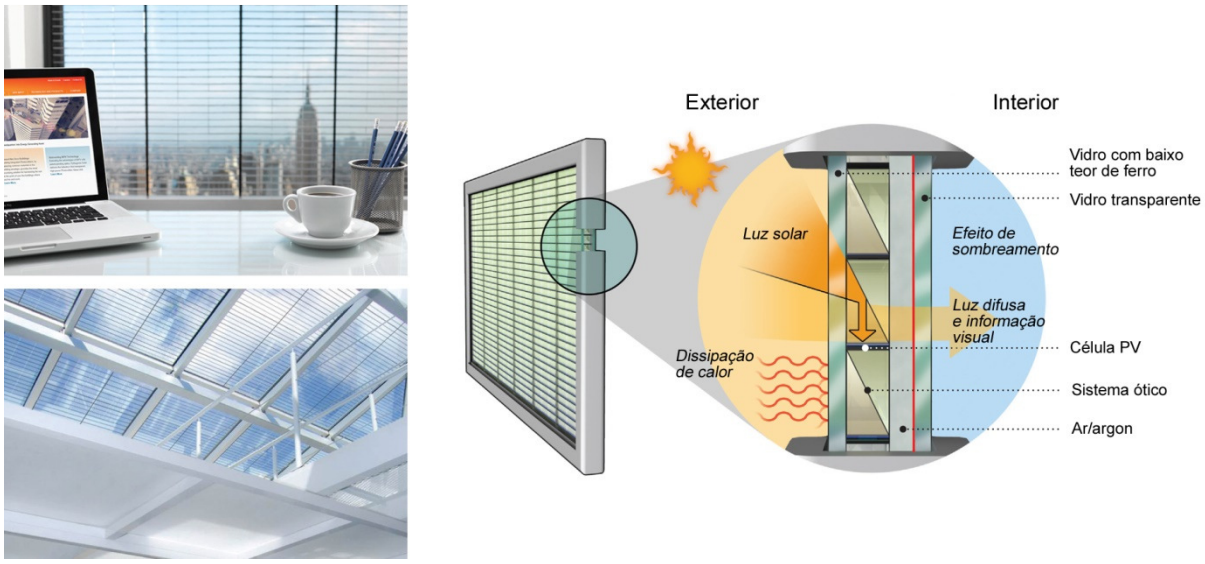


Figura 2.52 – Janela fotovoltaica PVGU desenvolvida por Pythagoras Solar e Guardian Industries (Guardian Industries, 2012).

Na abordagem à modificação dos componentes que compõem os módulos, refere-se a comercialização recente de vidros especiais coloridos como camada final dos módulos, que possibilitam a utilização de uma ampla gama de cores, mantendo altos níveis de desempenho, tais como o Kromatic (referido anteriormente em relação aos coletores planos no ponto 2.2.2.3, Figura 2.20) ou o Solaxess, desenvolvido pelo CSEM (Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique).

Em termos de I&D são apontadas várias direções no desenvolvimento de produtos fotovoltaicos para a integração na envolvente de edifícios. Ao nível do vidro de acabamento, na Lucerne University of Applied Sciences and Arts, estão a ser estudados diversos padrões que poderão ser utilizados para modificar a aparência dos sistemas fotovoltaicos (Figura 2.53) à custa de uma redução da eficiência entre 10 e 25% em relação aos módulos convencionais (Nigg, 2015).

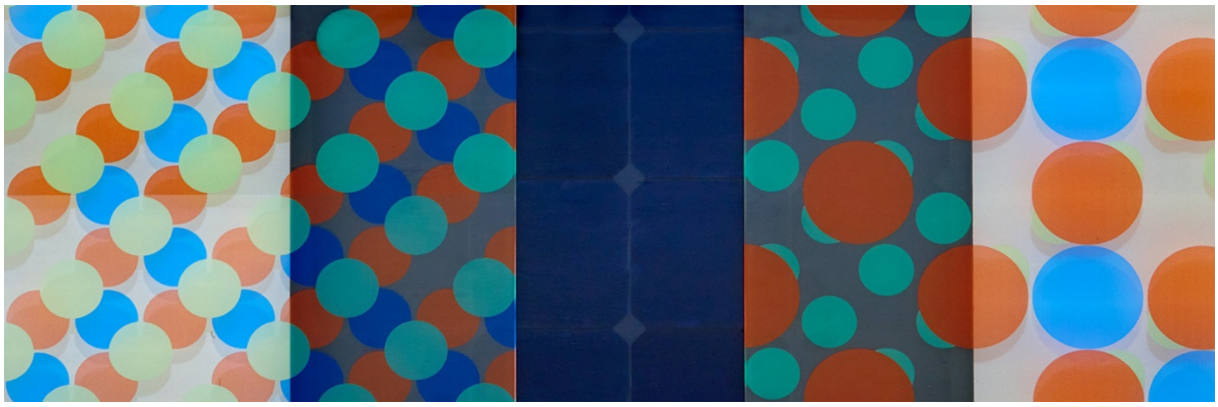


Figura 2.53 – Vidro com padrões gráficos para revestimento final de módulos fotovoltaicos (Nigg, 2015)

No Japão, a Kyosemi Corporation está a desenvolver células microesféricas com 1-2 mm de diâmetro, denominadas Sphelar, cuja forma particular permite captar a radiação solar a partir de várias direções. Devido à sua dimensão, estas células podem ser incorporadas em módulos rígidos ou flexíveis e

semitransparentes para a integração em edifícios, tendo sido estudada a sua integração em estufas (Yano, Onoe e Nakata, 2014).

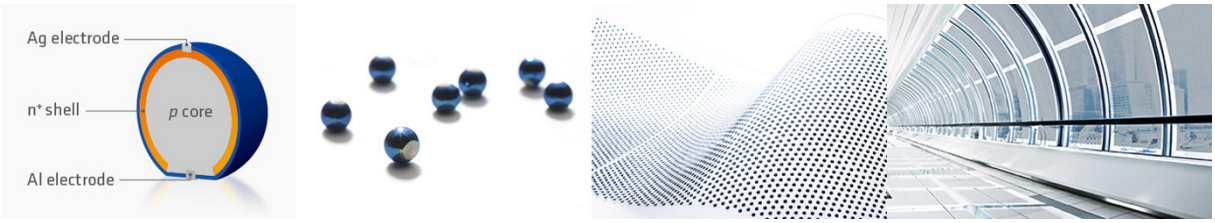


Figura 2.54 – Células Sphelar (Sphelar, 2016)

Na Universidade de Michigan State, nos EUA, foi desenvolvido um sistema de captação de energia solar denominado "concentrador solar transparente luminescente", no qual são utilizadas pequenas moléculas orgânicas, que são ajustadas para absorver comprimentos de onda não visíveis específicos da radiação solar (ultravioleta e próxima ao infravermelho) e que os redirecionam para células fotovoltaicas de silício cristalino situadas lateralmente no bordo do vidro, permitindo a passagem da radiação solar visível (Figura 2.55). Este sistema resulta assim numa célula solar capaz de gerar energia e simultaneamente num vidro transparente sem distorções de cor. A eficiência do protótipo é de apenas 1%, mas espera-se atingir 10% no futuro (Zhao et al., 2014).

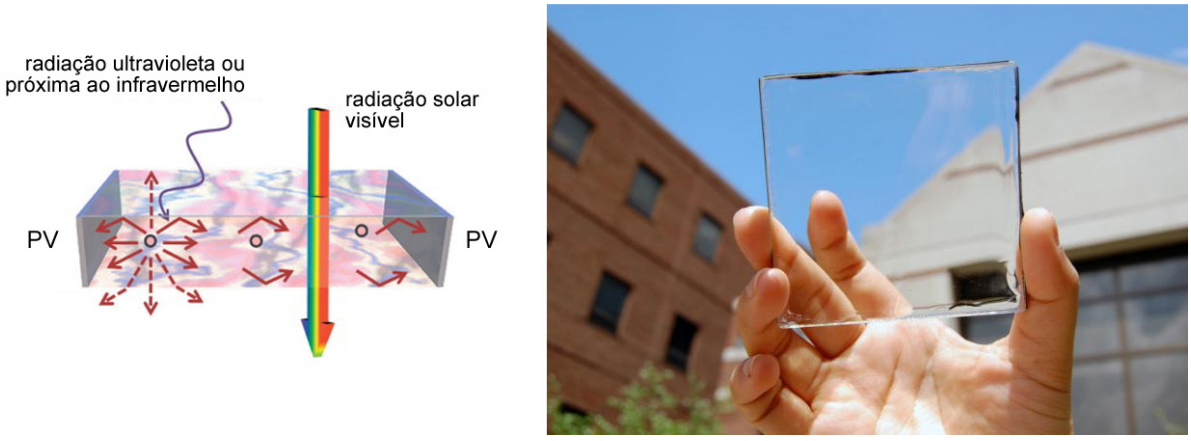


Figura 2.55 – Concentrador solar transparente que redireciona a radiação solar não visível para os captadores fotovoltaicos laterais (Mourant, 2014)

Com o mesmo conceito, o "EnergyGlass" consiste num vidro completamente transparente, no qual nano-partículas inorgânicas são fundidas numa camada de policarbonato, que é laminada entre dois panos de vidro. As nano-partículas redirecionam componentes do espectro da luz para os bordos do vidro onde se dá a conversão através de pequenas tiras fotovoltaicas de células monocristalinas (EnergyGlass, n. d.).

O modo de disposição das células e as suas ligações possibilitam variações formais significativas, e novos processos de fabrico podem influenciar essas relações. No Centro de Investigação da Energia (ECN), na Holanda, foi estudado um novo modo de construir células e módulos, denominando PUM - "Pin Up Module" (Figura 2.56), com os objetivos de facilitar o fabrico da célula, melhorar a sua

eficiência e de lhe atribuir um aspeto singular e atrativo (Bultman et al., 2000). Gupta et al. (2016) estudou os padrões formados pelos elétrodos frontais das células fotovoltaicas através da sua otimização topológica (Figura 2.57) em detrimento da otimização da forma, processo que gera as células convencionais de "padrão H".

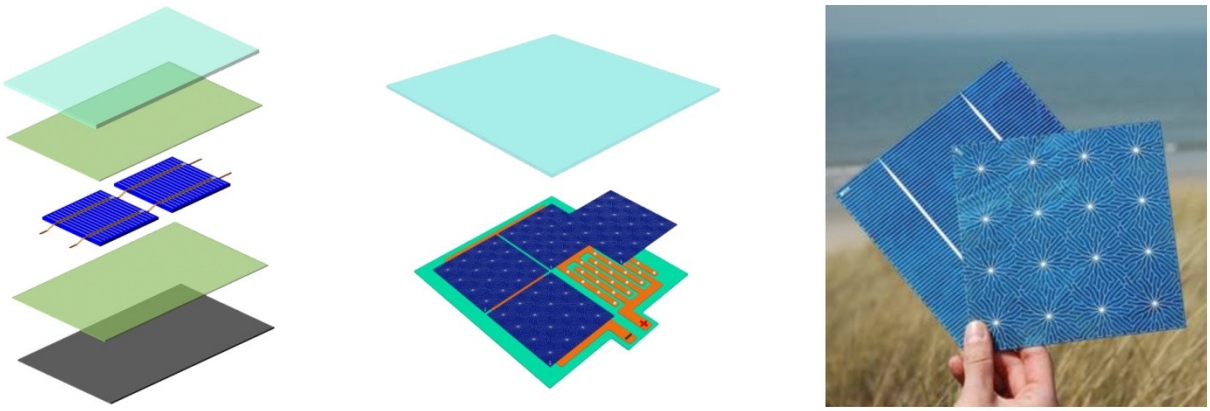


Figura 2.56 – Laminagem de um módulo convencional (à esquerda), montagem de um módulo com contactos posteriores e células PUM (ao centro) e célula convencional "padrão H" e célula PUM (à direita) (Jong, 2008)

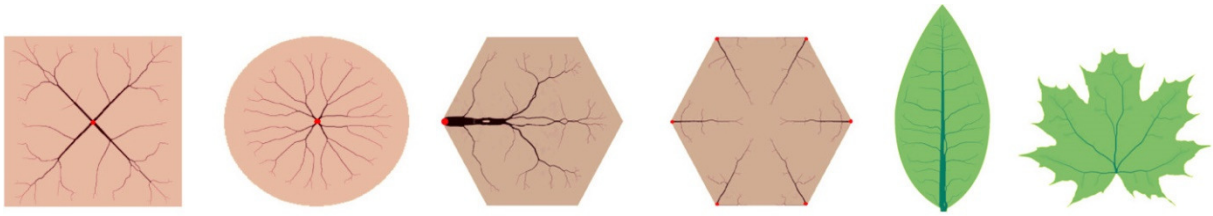


Figura 2.57 – Estudo de otimização topológica dos elétrodos frontais em diferentes formas de célula (Gupta et al., 2016)

2.3.2.2 Filmes finos

Tal como nos módulos cristalinos, o mercado disponibiliza módulos de filme fino específicos para cobertura e fachada, integráveis como revestimento final opaco ou translúcido, em coberturas (Figura 2.58), fachadas ventiladas (Figura 2.59), fachadas cortina e fachadas duplas de vidro. Nos filmes finos, a permeabilidade à luz é possível através da deposição das células em substratos transparentes ou translúcidos (Figura 2.60), assim como através do distanciamento na deposição das células, o que permite também a criação de padrões e texturas diversas, inclusive a inserção de texto e grafismos. Existem também produtos específicos para sombreamento através da configuração de palas ou *brise-soleil*.

São também comercializados revestimentos de cobertura metálicos (zinco, cobre, painéis sandwich), aos quais os módulos de filme fino são laminados e encapsulados em plástico, e telas de impermeabilização sintéticas com módulos flexíveis incorporados (Figura 2.61). Refere-se que algumas telhas e chapas metálicas também podem ser utilizadas no revestimento de fachadas. As telas possuem a vantagem do seu peso leve (favorável em situações de pouca resistência a cargas adicionais) e a possibilidade de se adaptarem a formas curvas. Nestes casos, como os módulos são colados aos substratos (revestimentos metálicos ou telas, e sendo as telas aplicadas através de

vulcanização), naturalmente a ventilação das células não é tão eficiente. No entanto, as células de silício amorfo possuem uma maior tolerância às temperaturas elevadas.



Figura 2.58 – Cobertura inclinada de uma água totalmente revestida com módulos fotovoltaicos de filme fino, num edifício de serviços, sede da Marché, em Kemptthal, na Suiça (Schittich, 2009)



Figura 2.59 – Sistema de fachada ventilada com módulos de filme fino CIS (Soltecture, n. d.)



Figura 2.60 – A transparência dos filmes finos de silício amorfo e a sua utilização numa fachada cortina (Schott, 2013)

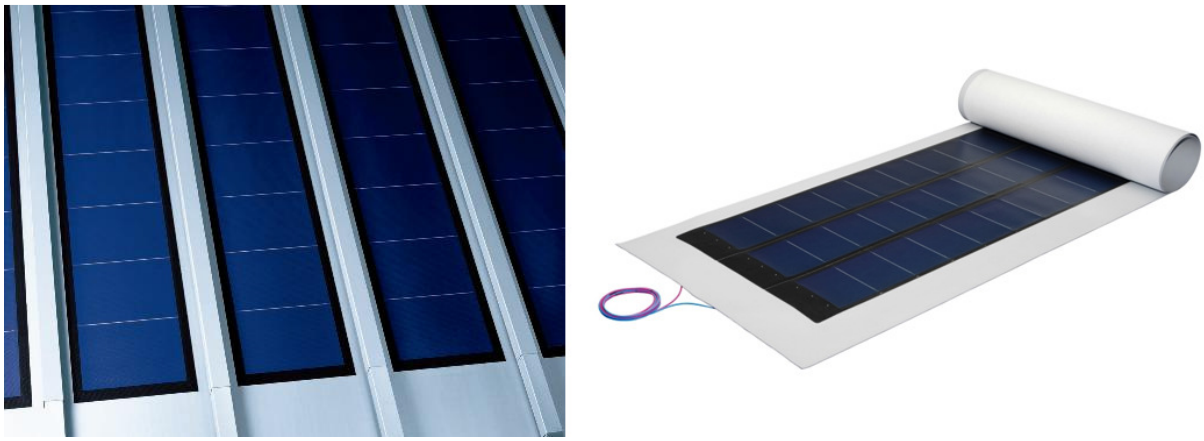


Figura 2.61 – Revestimento metálico de cobertura e fachada (à esquerda) e tela de impermeabilização (à direta) com filmes finos de silício amorfo acoplados (Rheinzink, n. d.-a)

Existem também módulos concebidos para a cobertura que seguem o mesmo sistema das telhas, em termos de funcionamento e colocação. Geralmente recorrem a perfis com encaixes perimetrais e compatíveis com telhas existentes no mercado (são normalmente desenvolvidos especificamente para determinados sistemas de telhas/revestimentos). Alguns módulos resultam do agrupamento modular de um conjunto de telhas. Este tipo de aplicação permite retirar os módulos individualmente.



Figura 2.62 - A SRS Energy Solé Power Tile consiste numa telha polimérica que incorpora um módulo fotovoltaico com células silício amorfo (Beachside Solar Technologies, 2016)

A nível de I&D, destaca-se o projeto "Solar Tiles" (2009-2011), desenvolvido por um consórcio (indústria cerâmica, centros de investigação e entidades públicas), que teve como principal objetivo a criação de materiais cerâmicos fotovoltaicos (telhas e revestimentos exteriores de fachada), tornando-os assim produtos multifuncionais que combinam as funções de revestimento com a produção de energia, acrescentando valor formal. O projeto consistiu na prova do conceito da deposição de filmes finos fotovoltaicos de silício nanocristalino ou polimorfo, em materiais cerâmicos.

No Instituto Fraunhofer foi estudada a incorporação de filmes finos fotovoltaicos CIS na camada final de reboco dos sistemas ETICS para fachada (Weller, Fischer e Wabnitz, 2013), reunindo assim o isolamento térmico e a produção de energia. No mesmo Instituto, foi também desenvolvido um componente envidraçado denominado "BIPV a-Si through façade" com ângulo de transmitância

seletivo, de forma a conciliar a proteção solar, evitar encandeamento e manter a ligação visual com o exterior (Frontini, 2010).

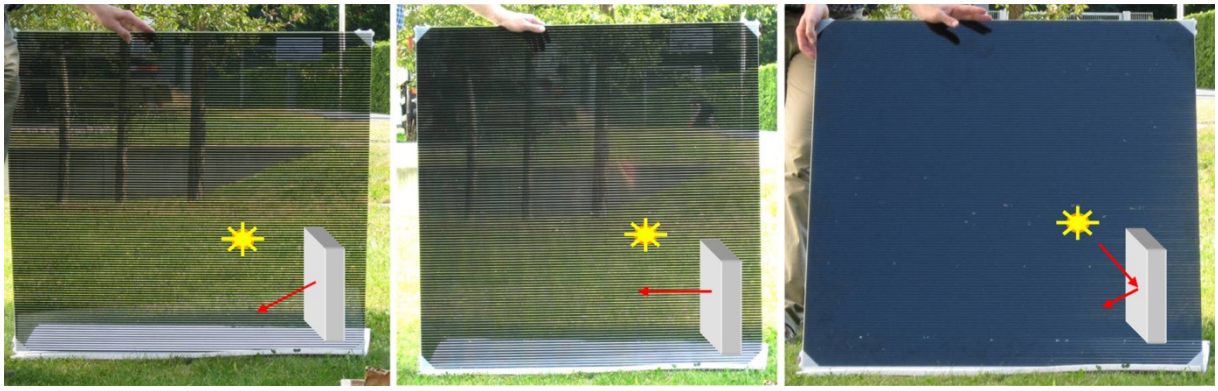


Figura 2.63 – Protótipo do módulo ""BIPV a-Si through façade", da esquerda para a direita: ligação visual para ângulos inferiores; ligação visual horizontal; ligação visual para ângulos elevados bloqueada (ângulo de incidência do sol nas células de silício amorfo) (Frontini, 2010)

2.3.2.3 Outras tecnologias

No que respeita às tecnologias fotovoltaicas emergentes, tais como as células nano cristalinas sensibilizadas com corante (dye-sensitized solar cells), as células orgânicas, e a utilização de materiais polímeros, entre outras, apesar de se encontrarem em fases iniciais de desenvolvimento, comparativamente às células de silício, verifica-se a sua utilização experimental em edifícios.

As células nano cristalinas sensibilizadas com corante, baseadas no processo fotoelectroquímico, apresentam um enorme potencial para integração, apesar da sua baixa eficiência, devido ao desempenho superior, comparativamente às tecnologias cristalinas, no que respeita às possibilidades cromáticas, à radiação difusa e à dependência do ângulo de inclinação. O SwissTech Convention Center, em Lausanne, na Suiça, é o primeiro edifício a integrar este tipo de células na envolvente, através da conformação de um dispositivo exterior de proteção solar da fachada envidraçada a poente (Figura 2.64).

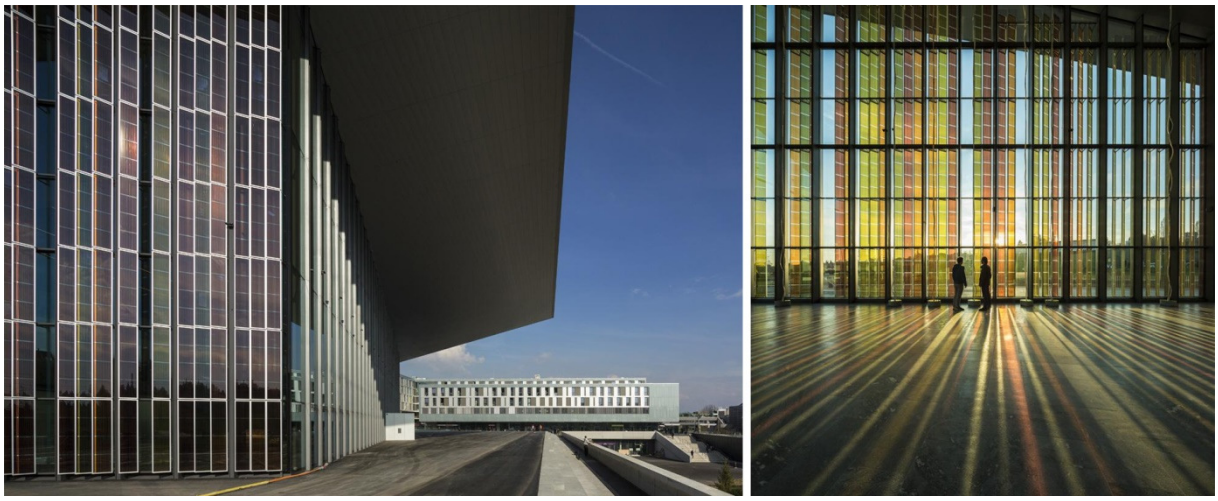


Figura 2.64 - SwissTech Convention Center (Richter Dahl Rocha & Associés architectes, n. d.).

Neste edifício as células ocupam uma área de 300 m^2 e permitem o controlo da transmissão luminosa no grande átrio interior. As células são semitransparentes e multicolores (vermelho, verde e laranja), e a sua disposição foi concebida pela artista plástica Catherine Bolle. Este caso demonstra a complementaridade e interdependência das questões energéticas, funcionais e formais na definição da envolvente do edifício e do ambiente interior pretendido.

Seguindo o mesmo princípio das células solares sensibilizadas com corante, refere-se o projeto DysCrete (Klussmann e Kassel, 2014), onde foi estudada a integração no betão de corantes orgânicos que absorvem a luz e a transformam em eletricidade através de reações eletroquímicas. Neste caso, o processo de aplicação é efetuado pela deposição em camadas, no processo de fabrico do betão. Este sistema é destinado a elementos de betão pré-fabricados, reúne as vantagens de um revestimento de betão à produção de energia, e apresenta potencial para o desenvolvimento de soluções de baixo custo.

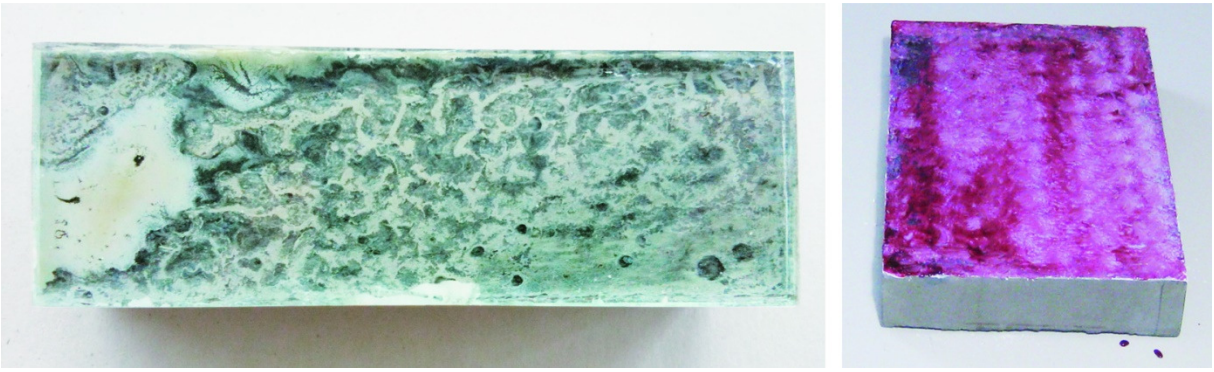


Figura 2.65 – Projeto Dyscrete, o betão como sistema fotovoltaico (Aden et al., 2015)

O desenvolvimento de células orgânicas e polímeras está a atingir níveis de eficiência e de estabilidade operacional que as tornam atrativas, devido ao tipo de materiais utilizados e ao processo de fabrico simples e de baixo custo (impressão *roll-to-roll*). No que respeita à integração em edifícios a Solarte disponibiliza células baseadas em semicondutores de carbono, flexíveis e transparentes, que podem ser personalizadas em termos de forma, e inseridas em vidro ou laminadas em diferentes materiais, possibilitando a integração em diferentes produtos, desde objetos a edifícios (Figura 2.66).



Figura 2.66 – As “árvores solares” do Pavilhão da Alemanha na Expo Milão 2015 consistiam em estruturas de sombreamento com células orgânicas integradas (Schmidhuber, 2014)

Neste tipo de tecnologia refere-se ainda o produto Solar Ivy que consiste na inserção de células orgânicas em dois tipos de suporte que mimetizam uma folha vegetal, cuja utilização se destina ao revestimento de fachadas, replicando uma trepadeira (o sistema também está disponível em células de filme fino de silício amorfo e CIGS). As "folhas" são aplicadas sobre uma malha metálica e a sua modularidade/densidade pode ser definida de acordo com a função a desempenhar, que pode incluir o sombreamento de grandes envidraçados (Figura 2.67).



Figura 2.67 – Solar Ivy (SMIT, n .d.).

Relativamente ao processo de deposição de células fotovoltaicas em vários substratos, refere-se ainda a sua incorporação em fibras. Neste contexto, a Soft House (Kennedy & Violich arquitetos) integra um sistema de cortinas que possui células solares orgânicas e iluminação LED integradas. A cortina é um elemento arquitetónico fundamental, pois define a compartimentação interna, ou seja, o espaço arquitetónico, através das variações que conforma (Figura 2.68). Neste caso, o sistema produtor de energia é também dispositivo de iluminação e objeto definidor da espacialidade interna da casa.

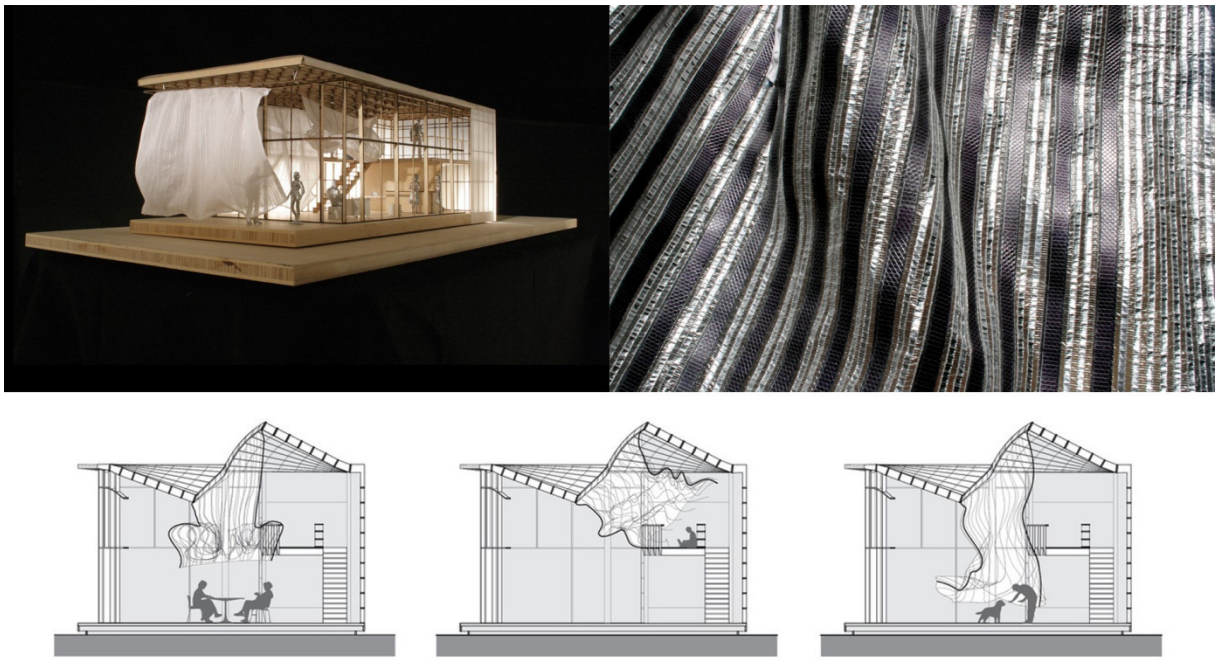


Figura 2.68 – Soft House (Kennedy and Violich Architecture, 2013)

Apesar de não constituir uma tecnologia de conversão de radiação solar em eletricidade, refere-se a tendência crescente da combinação de sistemas fotovoltaicos com iluminação LED e aplicações multimédia na envolvente de edifícios ou em estruturas urbanas, com um propósito lúdico de interatividade e comunicação visual ou visando instalações artísticas. O Greenpix Zero Energy Media Wall (Figura 2.69), em Beijing, projetado pelos arquitetos Simone Giostra & Partners, é um exemplo deste tipo de tendência.



Figura 2.69 – A fachada do Greenpix Zero Energy Media Wall é composta por módulos quadrados, de vidro e fotovoltaicos vidro/vidro, atrás de cada módulo há um ponto de luz LED, que permite a interação multimédia. A energia utilizada nesta "Media Wall" é fornecida pelo sistema fotovoltaico (Etherington, 2008)

2.3.3 MERCADO E INDÚSTRIA

Há menos de uma década a energia solar fotovoltaica apresentava um elevado custo de produção face ao rendimento obtido. Entre 2008 e 2012, o preço dos módulos decresceu 80%, levando a que em 2014, no custo total do conjunto "BOS", os módulos correspondessem a menos 50%, por oposição a quase 70%, em 2008 (Figura 2.70). Esta descida de preço deveu-se à economia de escala, à otimização da produção e ao avanço tecnológico. Refere-se ainda que no mercado global o preço dos componentes de um sistema fotovoltaico (módulos, inversores, cablagens, etc.) é muito semelhante, enquanto o preço do sistema instalado possui uma grande variação, devido aos requisitos regulamentares de permissão, licença e ligação à rede, assim como a maturidade do mercado local, que difere de país para país devido às diferentes políticas energéticas e medidas de incentivo públicas para as energias renováveis, e os diferentes graus de liberalização dos mercados (Jäger-Waldau, 2014).

Nos últimos anos verificou-se uma implementação rápida destes sistemas em determinados países, em função dos incentivos à sua aplicação, tais como a Alemanha, Itália ou Espanha. Curiosamente, independentemente da crise económica e financeira, da instabilidade política face aos incentivos (inclusive com casos de revisão de tarifa com efeito retractivo), o sector fotovoltaico continuou a crescer, apesar de o fazer com velocidades e dinâmicas diferentes de país para país ao longo do tempo, sendo, todavia, uma das indústrias com maior taxa de crescimento mundial.

A descida de preço dos sistemas fotovoltaicos, associada à capacidade da indústria fornecer um produto fiável, com a garantia de rendimento energético de pelo menos 25 anos (além de que os sistemas têm melhorado a eficiência, a vida útil, e o tempo de retorno energético), e ao aumento do

preço da eletricidade fornecida pela rede, estão a tornar a eletricidade fotovoltaica economicamente apelativa, verificando-se, em alguns mercados, uma atração pelo autoconsumo. Contudo, no sector residencial, se um sistema fotovoltaico gerar a energia equivalente às necessidades anuais, apenas é consumida diretamente cerca de 30% da produção, devendo a restante energia ser armazenada ou vendida à rede, o que, segundo o "PV Status Report" de 2014 (Jäger-Waldau, 2014), não possibilita a conformação de um mercado autossustentável e sem apoios. No entanto, os sistemas de armazenamento encontram-se numa fase de rápida evolução tecnológica, verificando-se já a sua redução de preço. E a integração dos sistemas fotovoltaicos confere outras qualidades para além da geração de energia, que também devem ser valorizadas.

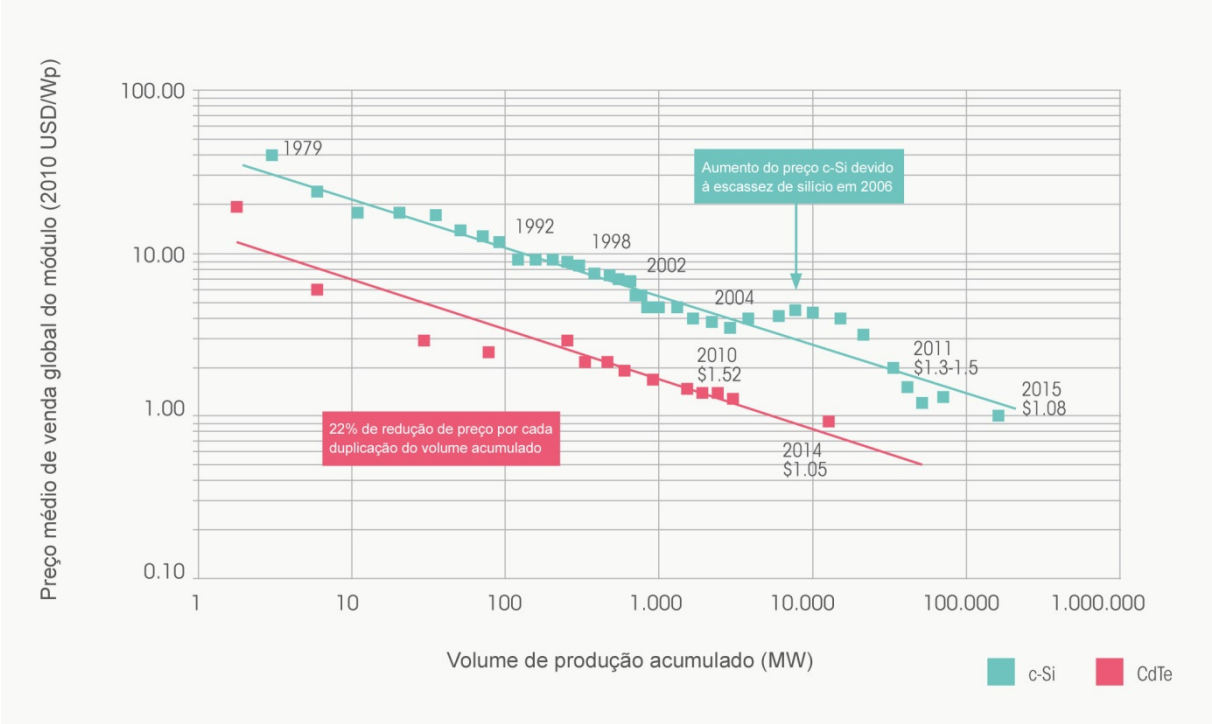


Figura 2.70 – Preço dos módulos fotovoltaicos – silício cristalino (c-Si) e filme fino CdTe (IRENA, 2012).

No final de 2013, a capacidade de geração de eletricidade fotovoltaica instalada mundialmente perfazia 140 GW, dos quais 80,7 GW correspondiam à União Europeia, líder em termos de capacidade instalada, tendo crescido para este valor a partir de 185 MW em 2000. No entanto, nos últimos anos, o mercado asiático (China e Japão) tem registado o maior crescimento nas novas instalações. Em Portugal, as instalações têm crescido lentamente, apesar da vantagem local no que respeita à disponibilidade de radiação solar, registando uma capacidade acumulada de 281 MW no final de 2013 (Jäger-Waldau, 2014).

Na Europa, relativamente ao tipo de instalação, predominam as instalações em coberturas de edifícios, enquanto os sistemas no terreno, apesar de terem registado um crescimento de 2012 para 2013, tenderão a diminuir. As novas instalações em 2013 repartiram-se da seguinte forma: no terreno 34%; em coberturas de comércio 27%, indústria 17% e residenciais 22%. Neste aspeto, salienta-se que o mercado europeu é muito heterogéneo de país para país. No entanto, destaca-se que em 2011 e 2012, a instalação de fotovoltaicos em cobertura representou a maior capacidade de geração de energia

instalada na Europa, à frente da eólica e ficando as centrais fotovoltaicas de grande escala em quarta posição (Fontaine e Orlandi, 2014, Fontaine e Latour, 2013).

Em termos de tecnologia, a maioria da produção e das instalações a nível mundial é composta por módulos de silício cristalino. Apesar de sofrer alguma oscilação anual, a produção mundial de módulos de silício cristalino é a predominante, tendo correspondido a 90% da produção em 2013, sendo os restantes 10% relativos à produção de filmes finos.

No sector fotovoltaico, verifica-se um papel ativo dos fabricantes, através da sua associação empresarial e da participação em atividades de I&D (através das quais procuram não só otimizar os produtos, mas também desenvolver soluções para integração em edifícios, assistindo-se em paralelo à indústria tradicional ligada à envolvente - revestimentos e vidro - a aderir à tecnologia), pressionam o desenvolvimento do mercado e assiste-se ao sector solar térmico a seguir este exemplo. Em Portugal existem quatro fabricantes de sistemas fotovoltaicos (Magpower, Jinko, Martifer Solar e Open Renewables), não sendo fabricados produtos específicos para a integração arquitetónica. Contudo, existe uma abertura caso a caso, sendo possível introduzir algumas modificações nos módulos.

Em muitos cenários o retorno económico realiza-se dentro da vida útil do produto. Normalmente os módulos fotovoltaicos possuem uma garantia de 20-25 anos, chegando em alguns fabricantes aos 30 anos. A garantia da eficiência é variável ao longo desse período. O processo total de produção dos módulos fotovoltaicos requer muita energia, as células cristalinas utilizam mais material para a mesma produção energética que os filmes finos. Todavia, as emissões associadas aos módulos reportam-se essencialmente ao processo de fabrico. Dependendo da localização, o *payback* energético é bastante curto, sobretudo na Europa do sul. Têm sido desenvolvidos estudos de ciclo de vida para produtos fotovoltaicos, assim como de processos de fim de vida, ao nível da reciclagem. Sendo este um campo de investigação com financiamento europeu.

2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas híbridos PV/T – coletores fotovoltaicos/térmicos - convertem a radiação solar em energia elétrica e térmica. Consistem geralmente num módulo fotovoltaico com uma placa absorsora na sua parte posterior. Esta configuração permite reduzir a temperatura de funcionamento do módulo fotovoltaico e, simultaneamente utilizar o calor gerado em aplicações de baixa temperatura. Existem coletores de ar, hidráulicos e de concentração, com diferentes configurações internas (Figura 2.71).

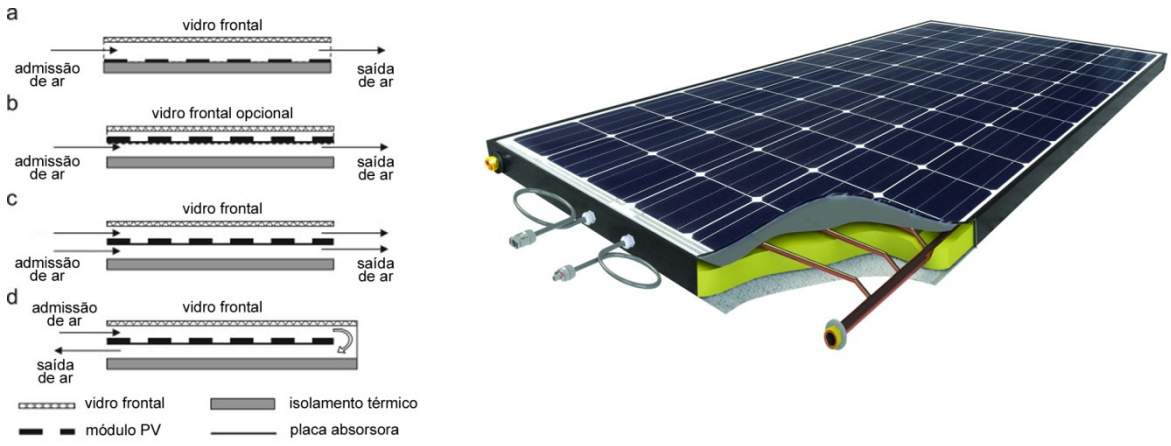


Figura 2.71 – Secções longitudinais típicas de coletores PV/T de ar (à esquerda) (Hussain et al., 2013), e módulo PV/T hidráulico (à direita) (Minimize Group, 2015)

Comparações entre sistemas híbridos PV/T e sistemas fotovoltaicos demonstram que os primeiros atingem maior eficiência na conversão de energia com potenciais benefícios de custo (Anderson et al., 2009).

Para a integração na envolvente encontram-se no mercado módulos PV/T que permitem realizar o revestimento da cobertura ou fachada. Todavia, recorrendo a módulos fotovoltaicos correntes (ou ligeiramente modificados), também se poderão conceber aplicações híbridas através de disposições construtivas, como é exemplo a fachada do edifício Solar XXI, na qual o calor gerado pelos painéis fotovoltaicos é recuperado através de um sistema de ventilação, por convecção natural. O edifício Solar XXI foi realizado pelo LNEG para as suas instalações tendo como objetivo a demonstração tecnológica na área da eficiência energética e das energias renováveis. Nesse sentido, possui vários sistemas solares passivos e ativos, cuja integração foi considerada um fator essencial para a aceitação arquitetónica. O edifício foi concebido de acordo as seguintes estratégias:

- Redução das cargas térmicas do edifício pela otimização da envolvente (isolamento térmico pelo exterior);
- Fachada sul com sistema de ganho direto para aquecimento - grandes vãos envidraçados e fachada fotovoltaica (módulos de silício monocristalino) para produção de eletricidade, com aproveitamento térmico do calor produzido pelo funcionamento dos módulos, por convecção natural;
- Sistema de arrefecimento passivo através de tubos enterrados;
- Sistema de ventilação natural;
- Sistema de coletores concentradores parabólicos compostos (CPC) na cobertura para aquecimento ambiente (encontram-se sobre a cobertura plana numa estrutura de apoio, simplesmente adicionados);
- Sistema de iluminação natural;
- Estrutura de sombreamento do parque de estacionamento do edifício com módulos fotovoltaicos de silício amorfo.

Os módulos fotovoltaicos na fachada sul totalizam cerca de 96 m^2 e 12 kWp para fornecimento direto de energia elétrica, satisfazendo 76% do consumo elétrico anual do edifício (Rodrigues et al., 2008, Gonçalves et al., 2008). A sua integração na envolvente possibilita o aproveitamento térmico do calor resultante do funcionamento das células fotovoltaicas, através da convecção natural, da seguinte forma: no período de inverno, o calor produzido pelos módulos fotovoltaicos é recuperado através de duas aberturas no pano de parede interior; no período de verão, o calor produzido pelos módulos fotovoltaicos e pelos ganhos internos das salas é dissipado através de aberturas que comunicam diretamente entre os módulos fotovoltaicos e o exterior; na meia estação, o ar admitido do exterior é pré-aquecido antes de ser injetado no interior das salas (Figura 2.72). Salienta-se que as aberturas no pano de parede interior da envolvente são controladas pelos utilizadores.

O Edifício Solar XXI é um exemplo da utilização sinergética de módulos fotovoltaicos como revestimento de fachada, onde a energia térmica gerada pelo seu funcionamento é aproveitada para o aquecimento natural do edifício através do controlo da ventilação posterior dos módulos. As várias camadas que constituem a envolvente do edifício são utilizadas na resolução dos requisitos entre o ambiente interior e o exterior, não só pelo sistema BIPV/T, mas também no modo como acomodam os sistemas para proteção solar dos vãos, de modo a evitar o sobreaquecimento e a possibilitar o controlo da luminosidade. Este caso é exemplar na demonstração de como é essencial determinar, em função da

tecnologia, funcionamento e materialidade dos sistemas solares ativos, quais as possibilidades de contributo funcional adicional na envolvente, ou seja, onde e como se integram, e que sistemas são compatíveis com outros materiais, elementos e funções da envolvente.

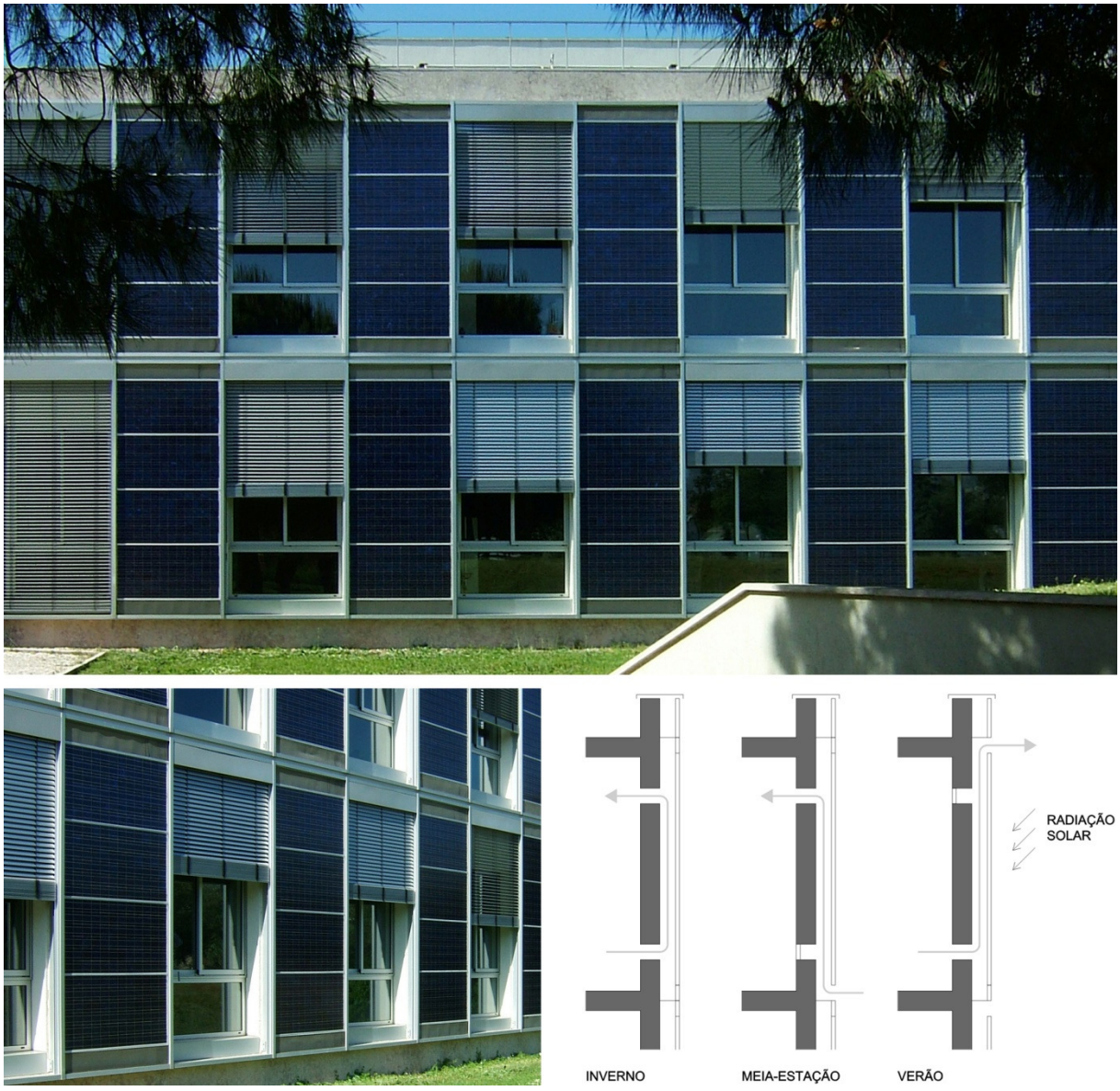


Figura 2.72 - Aplicação sinergética dos módulos fotovoltaicos na fachada sul do edifício Solar XXI

O edifício da biblioteca Pompeu Fabra em Mataró, Espanha, é outro exemplo deste tipo de aplicação (Figura 2.73). Foi concebido com o objetivo de demonstração de estratégias de sustentabilidade e da capacidade da indústria fotovoltaica europeia. Entre as diversas aplicações de sistemas fotovoltaicos, destaca-se a fachada sul, que consiste numa fachada envidraçada de pano duplo, sendo o pano exterior composto por um vidro duplo que integra células cristalinas afastadas 14 mm entre si e que forma uma caixa-de-ar de 150 mm com o pano interior. A caixa-de-ar é ventilada de forma híbrida (natural e mecânica), de verão o ar é admitido naturalmente e libertado para o exterior, com o propósito de arrefecer as células, e no inverno o ar aquecido pelo sistema fotovoltaico é direcionado para um

recuperador de calor e usado para aquecer a admissão de ar fresco. Neste caso, a fachada PV/T concilia a iluminação natural e o controlo/filtragem de luz, como o desempenho energético da fachada e a climatização interior (no inverno).

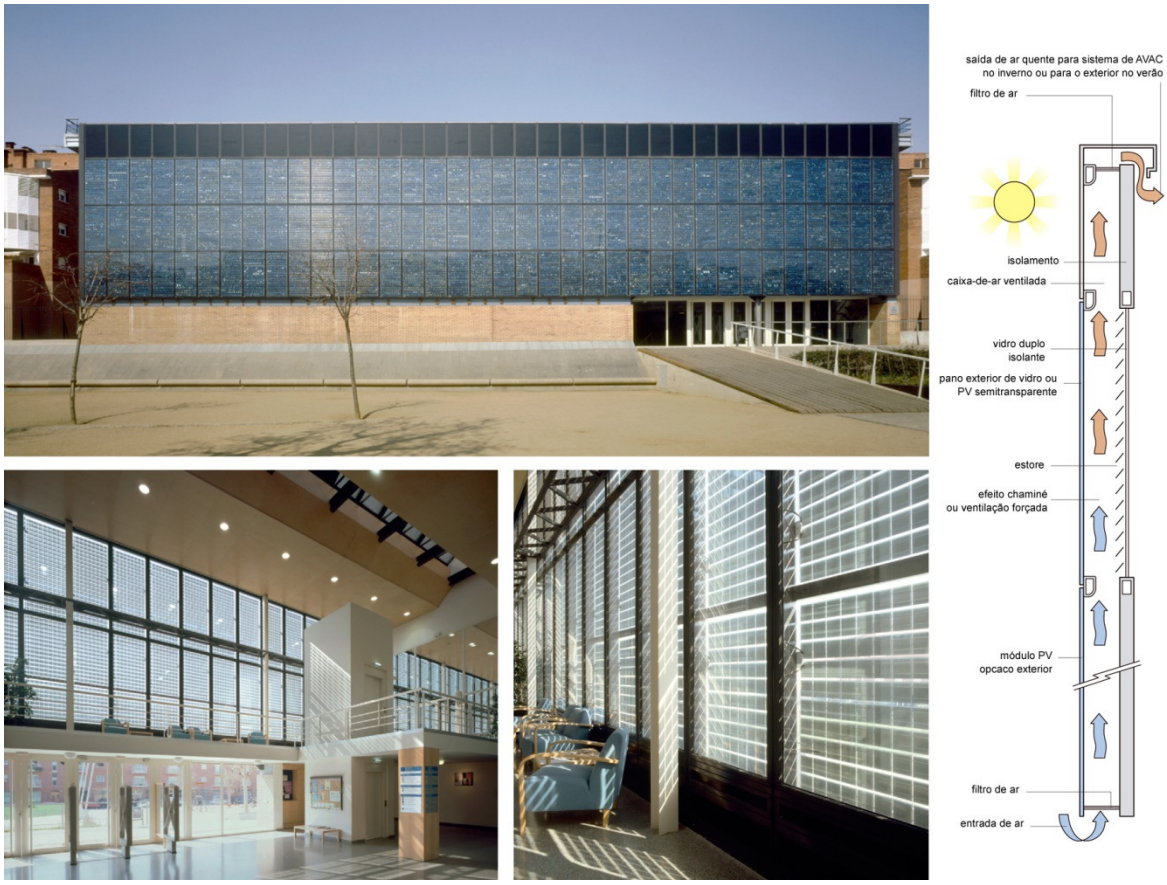


Figura 2.73 – Fachada dupla da biblioteca em Mataró (Roberts e Guariento, 2009)

A nível de I&D, o CASE "Center for Architecture Science and Ecology", um centro de investigação nos EUA que resulta da colaboração entre o Instituto Politécnico Rensselaer e a empresa de arquitetura e engenharia SOM (Skidmore, Owings & Merrill), desenvolveu um projeto denominado "Integrated Concentrating Solar Facade" (ICSF) que consiste num sistema fotovoltaico de concentração para integração em edifícios, através da miniaturização e distribuição dos componentes essenciais da tecnologia dos concentradores fotovoltaicos. Este sistema produz eletricidade através de lentes facetadas que concentram a luz para uma célula fotovoltaica multijunção de alta-eficiência. A energia não convertida em eletricidade é capturada por um fluxo de refrigeração, através do recetor onde a célula está montada, e utilizada para aquecimento de água, aquecimento ambiente, ou para ciclos de refrigeração por absorção (Dyson, Stark e Jensen, 2007). O sistema integra-se em fachadas e coberturas envidraçadas, dentro dos limites dos vãos ou entre uma superfície exterior envidraçada e outra interior de proteção dos componentes. Possibilita, a compatibilização da geração de energia elétrica e térmica, com a relação visual entre interior e exterior, a iluminação natural difusa e a redução dos ganhos solares. Como os mecanismos estão protegidos pela superfície envidraçada das ações climáticas e de outras forças externas, como a pressão do vento, é possível o seguimento preciso através de motores de baixo custo, o que simplifica um dos grandes obstáculos na aplicação de

sistemas de concentração fotovoltaica (normalmente seguidores de grande escala) que consiste nos requisitos de precisão do seguimento, face à ação do vento e à frequência da manutenção. A sua modularidade é esteticamente atrativa para o mercado arquitetónico e confere-lhe versatilidade na ligação à variedade das estruturas existentes, reduzindo os custos relativamente a sistemas de concentração mais complexos. Estimativas simples do retorno do investimento indicam períodos reduzidos em comparação com sistemas fotovoltaicos convencionais. O sistema está a ser testado em edifícios (Figura 2.74).

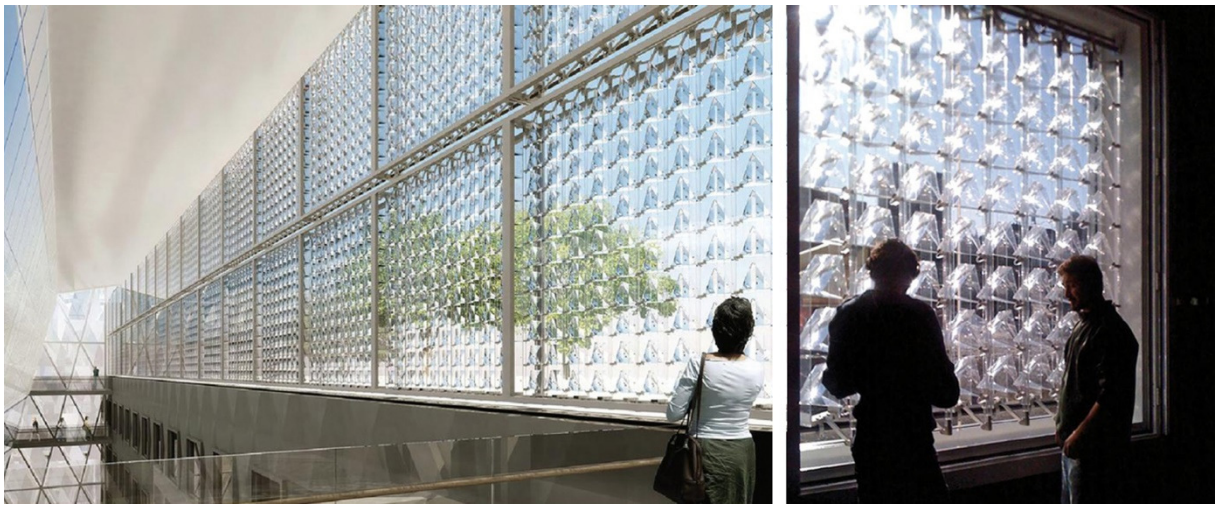


Figura 2.74 - Imagem virtual do *New York Fashion Institute of Technology Student Center* (à esquerda), e instalação piloto no *Syracuse Center of Excellence in Environmental and Energy Systems* (à direita) (CASE, 2016)

Na Universidade de Lund, na Suécia, foi desenvolvido o projeto "Janela Solar", que consiste num dispositivo de sombreamento PV/T composto por lamelas concentradoras móveis, colocadas pelo interior de um vão envidraçado (Figura 2.75). A "Janela Solar" compatibiliza a geração de eletricidade, o aquecimento de águas sanitárias, ganhos diretos e iluminação natural, ao mesmo tempo que as lamelas refletoras atuam como estores no controlo do grau de luminosidade e encadeamento. Verificou-se que o balanço entre ganhos diretos, isolamento térmico e produção de energia é fundamental neste tipo de solução (Davidsson, Perers e Karlsson, 2012).

Yin et al. (2013) desenvolveram um protótipo de uma cobertura integral com base num sistema PV/T hidráulico, tendo em conta a otimização da conversão elétrica e térmica, assim como condicionantes construtivas (Figura 2.76). No sistema proposto os módulos fotovoltaicos são encapsulados entre uma camada exterior de proteção e uma camada composta de uma mistura de alumínio (alta condutibilidade) e polietileno de alta densidade onde se encontra embebido o circuito solar. Este conjunto assenta num substrato estrutural e cumpre as funções básicas da envolvente, tais como estanquidade à água, isolamento térmico, resistência estrutural, durabilidade e eficiência energética, garantido a produção de energia e reduzindo constrangimentos construtivos. A análise de desempenho efetuada indica que o sistema de cobertura solar proposto apresenta vantagens significativas sobre os sistemas de cobertura com revestimento de asfalto e módulos fotovoltaicos tradicionais sem refrigeração.

Outros estudos, como Krauter et al. (1999) procuram melhorar a integração em fachada dos sistemas fotovoltaicos, neste caso através do arrefecimento da temperatura de funcionamento em fachadas

ventiladas. Duas das soluções testadas - circulação forçada de ar e circuito hidráulico - obtiveram resultados vantajosos em comparação a um sistema fotovoltaico em fachada ventilada com arrefecimento passivo. Estes métodos permitem ainda a recuperação do calor, ou a utilização do circuito hidráulico para AQS, obtendo assim um componente BIPV/T.

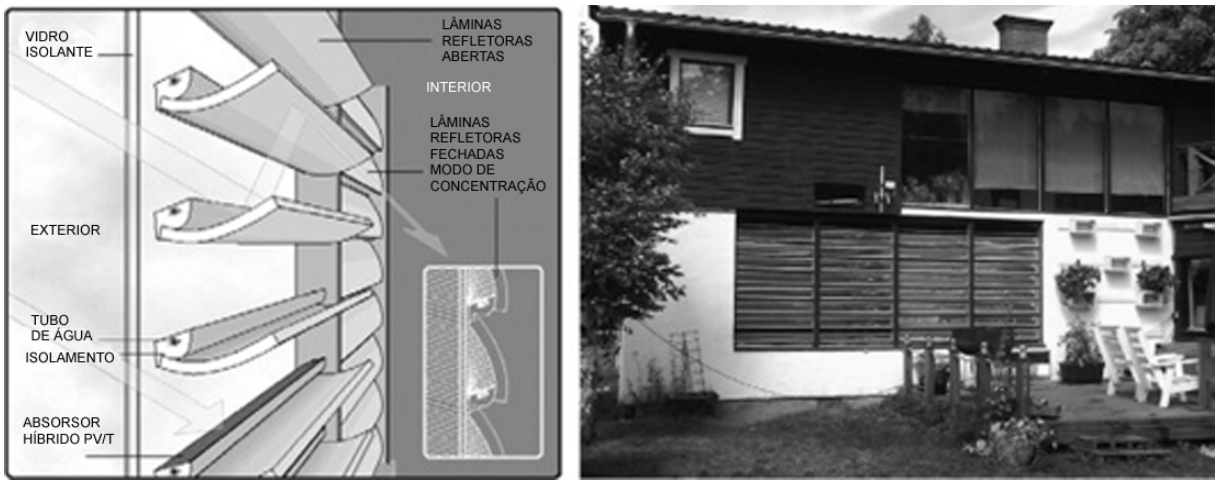


Figura 2.75 - A "Janela Solar" possui células fotovoltaicas inseridas em lamelas refletoras móveis e refrigeradas por um circuito hidráulico (à esquerda), aplicação experimental da "Janela Solar" em Solgården (à direita) (Davidsson, Perers e Karlsson, 2012)

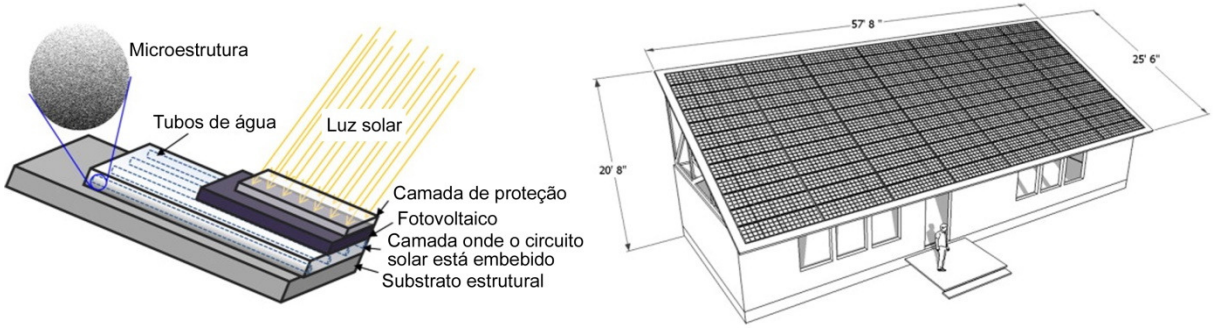


Figura 2.76 – Ilustração esquemática do sistema de cobertura PV/T proposto (á esquerda), vista de uma cobertura de uma água BIPV/T (Yin et al., 2013)

A nível experimental também foi estudada a integração de materiais de mudança de fase (PCM) em sistemas híbridos. No edifício Solar XXI, referido anteriormente, foram estudados dois sistemas "BIPV/T-PCM", sendo um composto por um módulo fotovoltaico (exterior), uma caixa-de-ar intermédia, e por um painel de gesso cartonado que incorpora materiais de mudança de fase (interior). Este sistema foi integrado na fachada sob um vão envidraçado, constituindo um elemento opaco (Figura 2.77). Durante o dia o módulo fotovoltaico recebe radiação solar, parte da qual é transformada em calor, alterando o estado do PCM. Durante a noite o PCM solidifica e liberta calor, mantendo o painel quente e evitando perdas de calor pela envolvente (Aelenei, Pereira, Ferreira, et al., 2014). O estudo demonstrou que esta é uma solução eficiente na redução das necessidades energéticas, ao mesmo tempo que concilia a produção de eletricidade. Noutra variante estudada, a camada interior foi conformada por uma bateria térmica composta por várias placas de PCM dispostas paralelamente e inseridas numa caixa isolada termicamente, este sistema também incluía ventiladores (na caixa-de-ar e

na bateria), comportas (entre as várias camadas do sistemas) e um conjunto de gavetas que permitia "fechar" a caixa da bateria térmica. Através da articulação dos ventiladores, comportas e gavetas é possível operar o sistema em função das necessidades. Este estudo demonstrou o potencial da sua aplicação no aquecimento ambiente no inverno, e a complexidade de articular todos os requisitos em determinadas situações, como o arrefecimento durante o verão (Ventura, 2014).



Figura 2.77 – Esquema da configuração do sistema e vistas do protótipo (Aelenei, Pereira, Gonçalves, et al., 2014)

2.5 SÍNTESE

Os sistemas solares ativos disponibilizados no mercado com vista à integração em edifícios, assim como aqueles que se encontram em desenvolvimento, possuem uma grande variedade, patente não só no tipo de tecnologia e nas funcionalidades adicionais que podem desempenhar na envolvente, como no modo de funcionamento, apresentação, composição e materialidade. Na transferência de tecnologia dos sistemas fotovoltaicos para produtos BIPV, destaca-se o potencial das células orgânicas, patente não só no seu baixo custo, como em determinadas características específicas, como a independência do ângulo de inclinação. Salienta-se que as inovações não se limitam aos produtos ou à tecnologia, mas também ocorrem ao nível do projeto, na exploração da configuração da envolvente, como se verifica no caso da fachada do edifício Solar XXI, ou através de outras estratégias como a integração de elementos arquitetónicos que potenciem a incidência da radiação solar nos SSA através de reflexão. Não há, desta forma, e tal como nos revestimentos correntemente disponíveis no mercado da construção, um determinado caminho marcado, mas uma vasta possibilidade de escolha e um futuro em aberto.

Neste contexto, os SSA podem ser caracterizados segundo os aspetos determinantes para integração na envolvente de edifícios, nomeadamente:

- Local e tipo de envolvente (fachada/cobertura, zona opaca/envidraçada);
- Materialidade e forma intrínseca (metal, vidro, plástico, dimensões e geometria);
- Aplicações.

Na tabela seguinte é apresentada uma classificação dos sistemas nestes termos. No que respeita às aplicações, os SSA podem desempenhar diversas aplicações num edifício, inclusivamente através da forma como são integrados (como na solução de ventilação da fachada do edifício Solar XXI).

Tabela 2.3 – Possibilidades de classificação dos SSA em relação à integração na envolvente, adaptado de Zhang et al. (2015)

Classificação		
Elemento envolvente (elementos fixos ou móveis)	Cobertura opaca Cobertura envidraçada Fachada opaca Fachada envidraçada Elementos exteriores à envolvente (varandas, proteção solar)	
Materialidade, dimensão e forma do módulo/coletor (componente isolado, componente com variações, *dummies*, sistema completo)	Não vítreos	Coletor de ar Placa absorsora Coletor plano (polímero) Módulo de filme fino Células orgânicas
	Vítreos	Coletor de ar Coletor plano CPC Tubos de vácuo Módulo de silício cristalino Módulo de filme fino
	Transparência	Sistemas transparentes Sistemas semitransparentes/translúcidos Sistemas opacos e transparentes (através de ângulo seletivo) Sistemas opacos (ao olho humano mas permeáveis aos raios solares)
Meio de transferência e aplicação (função na envolvente)	Ar	Aquecimento de ar e ventilação. Pré-aquecimento de ar fresco, de forma direta ou indireta, através de circulação forçada ou natural, por vezes associado a outros sistemas de aquecimento.
		Aquecimento ambiente. Ganhos diretos através de SSA translúcidos. Ganhos indiretos, transferindo o calor para um meio de armazenamento.
		Combinação de aquecimento de ar e água (*combi-systems*).
	Hidráulico	
		Aquecimento de água (AQS).
		Arrefecimento e ventilação (com possibilidade de recuperação de calor). Proteção solar.
	Eletricidade	A eletricidade pode ser usada para os mais variados fins.

3

A INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES ATIVOS NA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS – ESTADO DA ARTE

3.1 INTRODUÇÃO

No presente Capítulo é caracterizado o estado da arte relativo à integração de sistemas solares ativos na envolvente de edifícios. Este tema constitui, a nível internacional, um campo de investigação que nos últimos anos tem vindo a crescer e a aprofundar os respetivos subtemas de uma forma consistente. O objetivo principal consiste em potenciar os sistemas solares ativos como parte integrante do edifício, estabelecendo sinergias e gerando mais-valias, em detrimento da sua simples utilização como um elemento técnico adicionado à envolvente numa fase final de projeto, com o único propósito de gerar energia.

De modo a estabelecer um enquadramento abrangente, dividiu-se o estado da arte em duas partes. A primeira visa uma descrição geral das atividades de investigação relevantes, e a segunda parte visa a caracterização analítica das metodologias de integração de SSA na envolvente de edifícios.

3.2 BIPV, BIST E SUSTENTABILIDADE – ENQUADRAMENTO GERAL

Os primeiros coletores solares térmicos surgiram no final do século XIX. Ao longo do século XX verificou-se o amadurecimento da tecnologia e o domínio do seu dimensionamento, paralelamente ao estabelecimento de regulamentação específica. No mesmo período assistiu-se ao crescente relevo do estudo académico das instalações em edifícios. Os primeiros edifícios construídos com preocupações de uma integração abrangente de SSA foram as "casas solares" desenvolvidas no MIT nos anos 40 (Figura 3.1) nas quais se integraram coletores planos de forma experimental. O interesse pelas tecnologias solares ativas acentua-se, de uma forma mais consistente e contínua, após a crise petrolífera da década de 70. No que concerne à integração de módulos fotovoltaicos na envolvente, as primeiras experiências surgem na década de 80, sendo o conjunto residencial em Munique (concebido pelos arquitetos Thomas Herzog e Bernhard Schilling, em parceria com o Instituto Fraunhofer) um projeto pioneiro que também incluía a integração de coletores térmicos (Figura 3.2). A partir da década de 90, a par com um salto qualitativo no desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica (que teve as primeiras aplicações na indústria espacial na década de 60) e num contexto de promoção das fontes de energia renovável, o tema da integração passa a ser incontornável na discussão em torno do desempenho sustentável dos edifícios.

Atualmente, alguns países, como a França, Espanha, Itália ou a Suíça, estabeleceram critérios de integração arquitetónica de sistemas solares ativos nos respetivos regulamentos nacionais, inclusive

com benefício de tarifa no caso dos BIPV. Em Portugal, apesar de não existirem orientações nacionais desse tipo, a nível local, como no centro histórico do Porto, foram definidas recomendações de instalação e integração arquitetónica para coletores solares térmicos (Fernandes et al., 2010).



Figura 3.1 - MIT Solar House I (1939), III (1949) e IV (1959) (MIT Solar Decathlon Team, n. d.)



Figura 3.2 – Conjunto residencial em Munique, na Alemanha, com painéis fotovoltaicos e tubos de vácuo integrados na envolvente (1979-1982) (Krippner, 2005, Schoof, 2013)

Este crescente interesse pela integração dos SSA, sobretudo nos últimos 20 anos, é acompanhado a nível industrial, onde se verifica uma transferência de tecnologia para o domínio da arquitetura, através do desenvolvimento de SSA como produtos de construção, em detrimento da produção exclusiva de sistemas isolados e puramente técnicos (como descrito no Capítulo anterior). Neste contexto, o próprio conceito de BIPV possui normalização específica em curso pelo Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC, 2014a). Destaca-se também a pressão dos vários agentes ligados a este tema (industriais e governamentais) através de criação de prémios que reconhecem e valorizam as soluções de integração arquitetónica, tais como: o concurso internacional *Solar Decathlon* criado pelo *U.S. Department of Energy* realizado a nível universitário com o objetivo de projetar e construir uma casa operada a energia solar (Figura 3.3); ou o *European Solar Prize* estabelecido em 1994 pela Eurosolar (Associação Europeia para a Energia Solar) que inclui a categoria "Arquitetura solar e planeamento urbano" (Figura 3.4), assim como versões nacionais do prémio.

Refere-se ainda que têm sido publicados diversos manuais que condensam, de uma forma generalista, o conhecimento existente relativo à integração de SSA, sobretudo a nível dos sistemas fotovoltaicos, por parte de diversos agentes (governamentais, associações industriais, sector profissional –

arquitetura e engenharia), tais como as Nações Unidas, a ESTIF (*European Solar Thermal Industry Federation*), o Enerplan (*Syndicat des professionnels de l'énergie solaire*), entre outros.



Figura 3.3 – "RhOME for denCity", casa vencedora do Solar Decathlon 2014, entre as várias estratégias adotadas, possuía um dispositivo de sombreamento composto por módulos fotovoltaicos que permitia a proteção solar de um pátio e respetivas fachadas (Battista et al., 2015, Mitchell, 2014)



Figura 3.4 – Edifício de habitação "Aktiv-Stadthaus" em Frankfurt, Alemanha, vencedor do European Solar Prize 2015, na categoria "Arquitetura solar e planeamento urbano", no qual a totalidade da cobertura é composta por módulos fotovoltaicos, assim como grande parte da fachada sul, sendo a energia gerada armazenada em baterias distribuídas pelas várias frações (HHS, n. d.)

A nível académico verifica-se o aumento considerável da investigação nesta área, patente na diversidade de projetos existentes em torno dos SSA a decorrer em centros de investigação dedicados às energias renováveis, assim como o surgimento, dentro destes centros, de grupos especificamente centrados na integração de SSA em edifícios, tais como o "Swiss BiPV Competence Centre" (criado no ISAAC – "Institute for Applied Sustainability to the Built Environment", juntamente com o

departamento de Arquitetura da SUPSI – "University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland"). Neste contexto, refere-se ainda que o tema da integração de SSA em edifícios também ganhou visibilidade como subtema autónomo nas edições recentes dos congressos dedicados à energia solar.

Relativamente aos projetos desenvolvidos, salienta-se o trabalho realizado pela Agência Internacional de Energia (IEA-ETSAP e IRENA), através de dois sub-programas: o "Photovoltaic Power Systems" (PVPS) - estabelecido em 1993, que tem como missão acelerar o desenvolvimento e a implementação da energia solar fotovoltaica como uma opção de energia renovável significante (IEA-PVPS, 2016); e o "Solar Heating and Cooling" (SHC) - estabelecido em 1977, onde são desenvolvidos projetos nas áreas de sistemas solares ativos avançados, solar passivo e iluminação natural (IEA-SHC, 2015). Destes programas, compostos por equipas multidisciplinares que reúnem investigadores, projetistas e industriais, destacam-se os seguintes grupos de trabalho:

- **IEA-SHC Task 16 "Photovoltaics in buildings"** (1990-1995)
  Os objetivos deste grupo de trabalho consistiram em maximizar o contributo solar do edifício, compreender como integrar sistemas fotovoltaicos no edifício, a relação destes com outros sistemas de energia do edifício, e otimizar a vertente económica. No âmbito deste programa foi construído um parque para demonstração e monotorização de diferentes possibilidades de integração - o IEA Demosite (que funcionou na EPFL até 2008, inclusive como apoio a outros grupos de trabalho), e resultou o livro "Photovoltaics in Buildings" (Sick e Erge, 2013), que se divide em quatro secções: componentes; integração arquitetónica; processo de projeto dos sistemas; e instalação e manutenção.
- **IEA-PVPS Task 7 "Photovoltaic power systems in the built environment"** (1997-2001)
  Este grupo de trabalho teve como objetivo melhorar a qualidade (arquitetónica e técnica) e a viabilidade económica dos sistemas fotovoltaicos no ambiente construído. Foram estabelecidos critérios arquitetónicos de integração, criada uma base de dados (www.pvdatabase.org, que se perpetuou na IEA-PVPS Task 10), abordadas questões de mercado e determinadas barreiras não técnicas. Este grupo de trabalho também participou no desenvolvimento do PVSYST (um software para o estudo, dimensionamento e análise de dados de sistemas fotovoltaicos) e no desenvolvimento de novos produtos, juntamente com a indústria. À semelhança do grupo anterior, o trabalho foi condensado em livro (Prasad e Snow, 2005) no qual são abordadas: questões de projeto; sistemas fotovoltaicos e integração; casos de estudo BIPV; integração em outras estruturas (não edifícios); avaliação do potencial urbano para BIPV e ferramentas; conceitos elétricos e fiabilidade; mercado e barreiras não técnicas à implementação.
- **IEA-SHC Task 41 "Solar Energy and Architecture"** (2009-2012)
  Este grupo de trabalho abordou não só os sistemas fotovoltaicos como também os térmicos, através de três grandes temas: critérios para integração arquitetónica; métodos e ferramentas (sob a forma de um inquérito para determinar os métodos e ferramentas utilizados correntemente pelos projetistas); e conceitos, casos de estudo e orientações. Para além de um tratamento mais profundo das questões de integração arquitetónica que os grupos anteriores, foi abordado o desenvolvimento industrial de novos produtos SSA a partir das questões de integração.

Noutros grupos de trabalho, apesar de não tratarem o tema da integração, foram compiladas bases de dados com exemplos de boa integração arquitetónica de SSA, tais como o IEA-PVPS Task 10 "Urban-Scale Photovoltaic Applications**"** (2004-2009), que abordou a influência ambiental da geração de energia a nível urbano, e o IEA-SHC Task 39 "Polymeric Materials for Solar Thermal Applications" (2006-2014), que visou o desenvolvimento de sistemas solares térmicos com materiais polímeros. Referem-se também os seguintes projetos de investigação financiados por fundos europeus, onde são tratados aspetos de integração específicos (direcionados para determinada localização geográfica ou tipo de edifício) ou relativos aos sistemas térmicos (menos estudados que os fotovoltaicos):

- **PVACCEPT** (2001-2004)
  Este projeto visou o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos adequados à aplicação em edifícios antigos, sítios históricos, espaços urbanos e contextos paisagísticos. Incluía estudos de aceitabilidade dos sistemas e de ciclo de vida (PVACCEPT, 2005).
- **"PV-NORD"** (2002-2004)
  Este projeto visou a disseminação de soluções BIPV na Europa do norte. Um painel internacional composto por críticos de arquitetura e arquitetos projetistas avaliou a qualidade da integração de diversos casos de estudo. Como resultado obtiveram-se recomendações e orientações de projeto, incluindo orientações genéricas para as questões elétricas e de como estas se ligam ao processo de projeto arquitetónico, assim como orientações para a gestão do ciclo-de-vida dos sistemas fotovoltaicos. Foi também abordada a gestão dos sistemas ligada à gestão geral do edifício utilizando as Tecnologias de Informação e Comunicação (European Commission, 2013).
- **"NEGST – New generation of solar thermal systems"** (2004-2007)
  O principal objetivo deste projeto consistiu no desenvolvimento de sistemas solares térmicos de baixo custo para AQS e aquecimento ambiente, para fazer face às políticas energéticas europeias. Uma parte do projeto foi dedicada à integração em edifícios, visando os requisitos da envolvente, a integração com outras instalações, a simplificação da instalação, e questões estéticas e arquitetónicas (através da disseminação de casos de estudo e boas práticas) (Drück e Streicher, 2008).
- **"Resource- and Cost-effective integration of renewables in existing high-rise buildings"** (2008-2012)
  Este projeto visou o desenvolvimento de componentes (fotovoltaicos e térmicos) multifuncionais para fachadas de edifícios altos, que incorporassem os benefícios relativos ao baixo custo de operação e às emissões reduzidas, considerando o ciclo de vida do edifício. Assim como o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão de modo a encontrar o melhor conceito de integração (Kuhn, 2009).
- **"Building Integration of Solar Thermal Systems (BISTS)"** (2013-2017)
  Este projeto visa fomentar e acelerar o desenvolvimento dos sistemas solares térmicos integrados em edifícios, através da revisão crítica, experimentação, simulação e demonstração de soluções viáveis de incorporação e integração na envolvente tradicional dos edifícios. Foca-se no desenvolvimento de componentes multifuncionais orientados para a envolvente do edifício e na sua caracterização. A ação considera três regiões europeias genéricas: Mediterrâneo sul, centro continental e norte marítimo (Kalogirou, 2012).
- **SmartFlex Solar Facades** (2013-2016) e **Construct PV** (2013-2017)
  Estes dois projetos visam o fabrico de elementos construtivos fotovoltaicos personalizáveis a uma escala industrial, sendo o Construct PV apenas direcionado para a integração em zonas opacas da envolvente (Ulbikas e Lenkimas, n. d., Construct PV, n. d.).

Nestes programas e projetos de investigação, procurou-se inicialmente potenciar a qualidade arquitetónica e técnica, a viabilidade económica e avaliar as barreiras não-técnicas à implementação, sobretudo de sistemas fotovoltaicos. Pretendeu-se contribuir para a melhoria da integração construtiva, da fiabilidade, da manutenção e do desempenho geral da integração, paralelamente a questões de mercado e de disseminação de produtos. Ou seja, a abordagem consistiu sobretudo na disseminação de conhecimento, destinada a projetistas e ao público geral, de potenciação do sector industrial, através de novas soluções, e de penetração no mercado. De uma forma generalizada, em todos os programas referidos foram compiladas bases de dados a partir da seleção e análise de casos de estudo e boas práticas.

A qualidade da integração é um tema transversal, pois é tida como um fator essencial na promoção dos sistemas e soluções, assim como na disseminação e aceitação das tecnologias. A baixa qualidade geral da integração dos SSA, associada ao facto das tecnologias solares possuírem um impacto importante na imagem de um edifício, constitui um dos principais motivos para a recusa da utilização dos SSA por parte dos projetistas. Nesse sentido, os desenvolvimentos recentes visam familiarizar os projetistas com as opções e implicações da inclusão destes sistemas. Resultam da constatação que a consideração da incorporação destes sistemas em fases avançadas de projeto origina o seu subaproveitamento, uma vez que apenas é considerado o cumprimento de requisitos energéticos, independentemente do conceito do edifício, ou do potencial de uma utilização mais abrangente dos sistemas que possibilite um contributo sinergético entre estes e o edifício. Neste último aspeto têm-se desenvolvido sobretudo os aspetos relativos à integração construtiva e formal que contemplam a criação de mecanismos que facilitem a inclusão destes sistemas em fases iniciais da conceção, através de métodos e ferramentas de cálculo, dimensionamento e visualização simplificados, visando a melhoria da integração arquitetónica e construtiva, e a obtenção de sinergias a partir da influência das tecnologias solares na conformação do volume do edifício.

A investigação mais recente visa aprofundar estas questões, quer para produtos, quer para contextos específicos (a nível geográfico ou de determinada solução construtiva), e abordar outras questões como a gestão dos sistemas na gestão do edifício. Na literatura identifica-se um interesse crescente pela integração de SSA, através de estudos de modelação e simulação. Salienta-se que a diversidade de sistemas (fotovoltaicos, térmicos e híbridos) e a variedade de possíveis aplicações no edifício provocam uma grande dispersão do tipo de abordagem. Contudo, estes estudos são efetuados com ênfase no edifício e/ou nos sistemas e dividem-se em simulações energéticas (produção de energia), térmicas, térmico/energéticas, óticas, ótico/térmicas, energéticas/iluminação natural, exposição solar, entre outras, e são efetuadas considerando o contributo dos sistemas em termos de revestimento de fachada/cobertura, como dispositivos de sombreamento, em parede de trombe, para aquecimento e arrefecimento solar, em soluções híbridas, em sistemas de concentração, como chaminé solar, entre outras aplicações. No entanto, a maioria dos estudos concentra-se nas modelações energéticas e/ou térmicas (COST Office, 2015, Hussain et al., 2013, Petter Jelle, Breivik e Drolsum Røkenes, 2012).

Recentemente também tem-se assistido a um crescente número de estudos que procuram avaliar a integração dos sistemas solares ativos em edifícios na perspetiva da sustentabilidade, principalmente no domínio dos BIPV. Todavia, verifica-se que as avaliações de sustentabilidade são orientadas para a vida útil dos sistemas e não para a vida útil do edifício, pois avaliam a viabilidade da integração num período de 20/25 anos, que corresponde à vida útil dos sistemas fotovoltaicos. Verifica-se também que a avaliação consiste sobretudo na demonstração da validade económica e energética, em função desse período de ciclo de vida, e recorrendo aos indicadores do tempo necessário para gerar a energia despendida no fabrico dos sistemas (EPBT – *energy payback time*) e emissões de gases estufa. Deste modo, a avaliação é efetuada em função de um ciclo de vida parcial (do componente) e não do

edifício, concentrando-se apenas em aspetos energéticos e económicos. Salienta-se, contudo, que estas avaliações, apesar de parciais, demonstram que os sistemas são eficientes em termos energéticos, designadamente em termos de *payback* energético e emissões de CO_2 e, inclusive, em termos económicos, se considerada uma análise abrangente (para além do custo dos sistemas e do benefício da energia gerada).

Apesar do crescente interesse científico por este tema, os processos metodológicos abrangentes para a integração de SSA na envolvente de edifícios são ainda incipientes, pois são direcionados a tecnologias específicas ou a contextos particulares e, apesar da crescente divulgação das estratégias de integração, não existe uma relação entre as estratégias e os indicadores de sustentabilidade que sirva de orientação à conceção, o que faria sentido pela importância que a geração de energia assume nos indicadores de sustentabilidade. Apesar de existirem vários manuais para a integração de SSA em edifícios (sobretudo direcionados aos sistemas fotovoltaicos) que abordam os assuntos de forma generalizada, estes visam sobretudo a disseminação de conhecimento geral.

3.3 METODOLOGIAS PARA A INTEGRAÇÃO ARQUITETÓNICA DE SSA

A importância de uma abordagem multidisciplinar em fase de projeto, que considerasse o edifício como um sistema, no qual os sistemas solares (não só ativos, mas também passivos) constituíssem uma parte integrada, foi abordada por Hestnes (1999). Através do trabalho desenvolvido pela equipa que integrou no programa IEA-SHC Task 23 "Optimization of Solar Energy Use in Buildings" (Hestnes et al., 2001), foram definidos critérios, que demonstravam preocupações de sustentabilidade, desempenho e qualidade arquitetónica. Dos estudos efetuados posteriormente e, em particular, direcionados à especificidade dos sistemas solares ativos, destacam-se as seguintes propostas (das quais se salienta o seu carácter recente), devido à sua abrangência e profundidade e ao facto de, em alguns casos, serem direcionadas à atividade de projeto:

Coletores térmicos

- "General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment" (Golić, Kosorić e Furundžić, 2011);

Módulos fotovoltaicos

- "BIPV evaluation benchmark model" (Yu et al., 2009);
- "Design methodology for building integration of photovoltaics" (Kosoric, Wittkopf e Huang, 2011);
- "Sistema di valutazione del livello di integrazione fotovoltaica - BIPV.tool" (Bonomo, 2012);
- "Development of a holistic evaluation system for BIPV facades" (Schuetze, Willkomm e Roos, 2015).

3.3.1 "GENERAL MODEL OF SOLAR WATER HEATING SYSTEM INTEGRATION IN RESIDENTIAL BUILDING REFURBISHMENT"

A metodologia "General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment" (Golić, Kosorić e Furundžić, 2011) trata um problema específico - a integração de coletores térmicos destinados a AQS na reabilitação de edifícios de habitação. Todavia, possui uma abordagem abrangente que inclui aspetos funcionais, estéticos, energéticos, económicos e ecológicos,

assim como um faseamento que permite a sua adequação às fases do processo de projeto. O modelo proposto é composto por 5 fases (Figura 3.5): na 1ª fase é avaliado o "Potencial do edifício" e o "Grau de viabilidade"; na 2ª fase é escolhido o "Tipo de sistema"; na 3ª fase são geradas e otimizadas as variantes de projeto; e finalmente, nas últimas duas fases, são avaliadas as variantes geradas anteriormente e é efetuada a escolha da solução final.

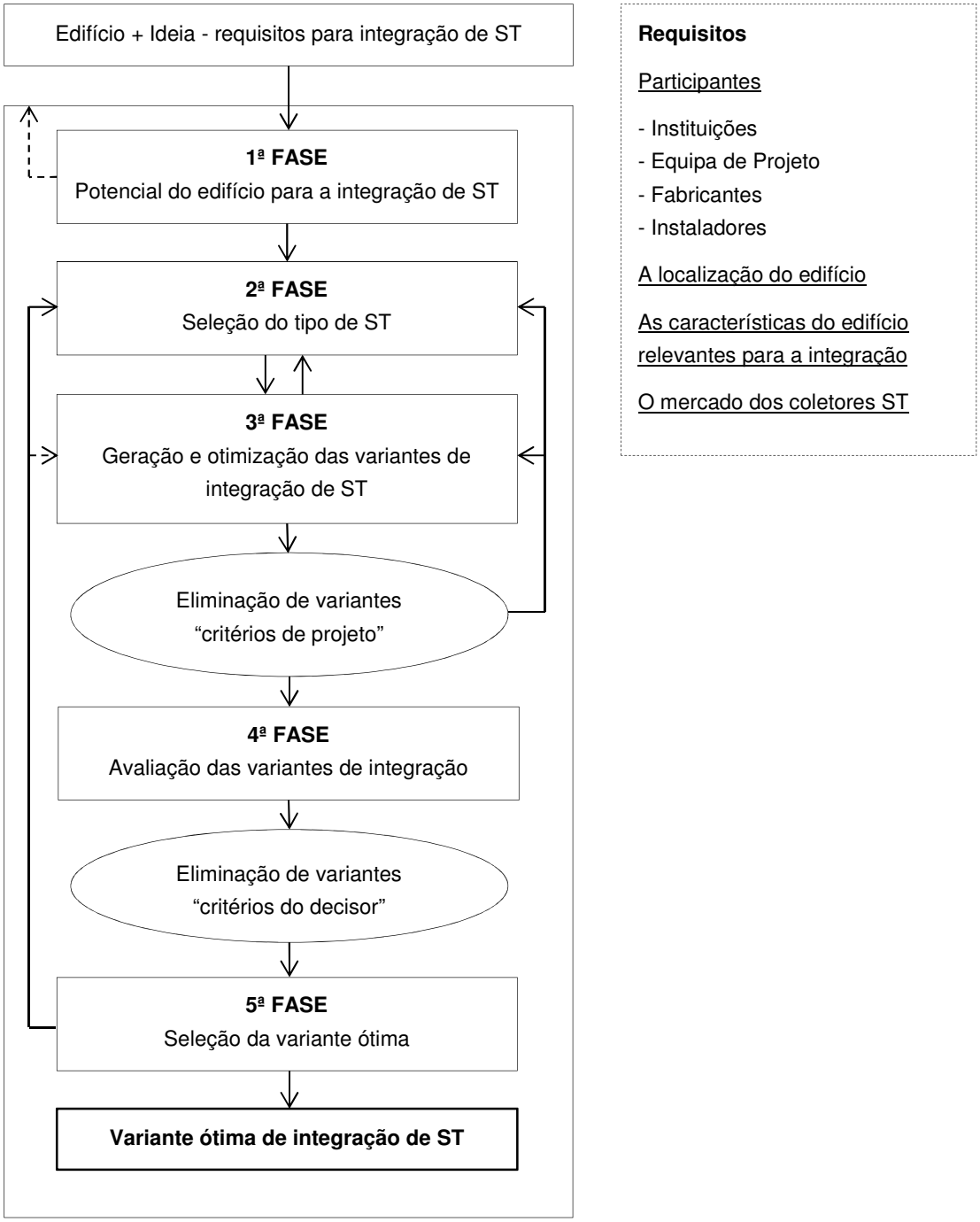


Figura 3.5 – Esquema do processo metodológico (Golić, Kosorić e Furundžić, 2011).

Salienta-se a importância dada ao decisor, como grupo complexo e hierárquico (pode ser constituído pelo projetista, pelo dono de obra, ou por um conjunto de intervenientes em que estes se incluem), na definição dos critérios prioritários a serem satisfeitos (tais como, estabelecer o custo máximo do sistema solar térmico, ou definir objetivos de produção de energia), e que constituem critérios com influência na avaliação das variantes, através dos passos de eliminação "critérios de projeto" na 3ª fase, e "critérios de decisor" na 4ª fase (Figura 3.5).

Na 1ª fase é avaliado o "Potencial do edifício" através de um conjunto de critérios baseados nas características do edifício relevantes para a integração de coletores térmicos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Conjunto de critérios para a avaliação do "Potencial do edifício"

Grupos de critérios	**Critérios**
A - Clima e contexto urbano	1 - Radiação global na localização do edifício (kWh/m^2)
	2 - Panos de cobertura com orientações favoráveis (sul, sudoeste e sudeste)
	3 - Panos de fachada com orientações favoráveis (sul, sudoeste e sudeste)
	4 - Efeito de sombreamento na cobertura por elementos do contexto (outros edifícios, árvores, etc.)
	5 - Efeito de sombreamento nos panos de fachada por elementos do contexto (outros edifícios, árvores, etc.)
B - Capacidade do edifício residencial	6 - Dimensão do edifício
	7 - Consumo médio diário de água quente por ocupante (litros/ocupante/dia)
	8 - Utilização regular do edifício durante o verão
	9 - Tipo de combustível utilizado no sistema de aquecimento de água existente
	10 - Tipo de sistema de aquecimento de água existente
	11 - Estado do sistema de aquecimento de água existente
	12 - Tipo de sistema de aquecimento ambiente existente
C - Critérios arquitetónicos relevantes para a integração de coletores térmicos	13 - Organização arquitetónica e espacial do edifício residencial (layout e distâncias entre divisões que requerem água quente)
	14 - Aplicabilidade de coletores térmicos nas superfícies da cobertura, razão entre o consumo de água quente diário e superfícies da cobertura favoráveis à integração (l/m^2) - "C_R ratio"
	15 - Aplicabilidade de coletores térmicos nas superfícies da cobertura, razão entre o consumo de água quente diário e superfícies de fachada favoráveis à integração (l/m^2) – "C_F ratio"
	16 - Facilidade de montagem de coletores térmicos na cobertura e fachada
	17 - Facilidade de montagem de coletores térmicos na fachada

Cada critério é valorizado num de três graus (mínimo, médio e máximo). Como exemplo, o critério individual "1 - Radiação global na localização do edifício (kWh/m^2)" é classificado da seguinte forma:

- Mínimo – radiação baixa (abaixo de 1200kWh/m^2);
- Médio – radiação média (entre 1200 e 1500kWh/m^2;
- Máximo – radiação elevada (acima de 1500kwh/m^2).

E o critério "2 - Panos de cobertura com orientações favoráveis (sul, sudoeste e sudeste) " da seguinte forma:

- Mínimo – não favorável, nenhuma água da cobertura com orientação favorável;
- Médio – moderadamente favorável – uma água com orientação favorável;
- Máximo – pelo menos duas águas da cobertura com orientação favorável.

A cada grau é atribuída uma pontuação, neste último exemplo "-3" (mínimo), "0" (médio) e "3" (máximo). Do resultado final é extraído o "Potencial de Integração" (que varia entre o mínimo de "-15" e o máximo de "38" pontos) e o "Grau de viabilidade" que consiste num rácio entre o resultado do "Potencial de integração" de um caso específico e o "Potencial de integração" máximo total (para determinar o resultado é recomendada a utilização da teoria dos conjuntos difusos[6]).

A segunda fase inicia após uma decisão positiva por parte do decisor em função do "Potencial de integração". Nesta fase é escolhido o tipo de coletor térmico com base no clima do local (radiação solar), nas características da envolvente, e na versatilidade dos produtos solares térmicos disponíveis no mercado, terminando com o dimensionamento do sistema (área de coletores e tanque). Esta fase pode ser revista depois da fase seguinte, ou o processo iniciar na fase seguinte.

A terceira fase consiste no estabelecimento de variantes, através da localização dos sistemas térmicos na envolvente e na determinação das possíveis soluções que podem conformar. As soluções são depois confrontadas com os critérios de eliminação, normalmente relacionados com o desempenho dos sistemas (como exemplo de um possível critério - 70 l/m^2 como razão ótima entre a produção de água quente e a área de coletores solares térmicos). Salienta-se que a 2ª e 3ª fases dependem da experiência e criatividade do decisor, com base nos requisitos definidos.

Na quarta fase as variantes são avaliadas por um conjunto de critérios funcionais, estéticos, energéticos, económicos e ecológicos (Tabela 3.2), sendo excluídas as variantes que não satisfazem os critérios de eliminação do decisor (como exemplo de um possível critério - máximo de 10 anos como período de retorno do investimento), sendo depois utilizado um modelo de decisão multicritério (com base na teoria dos conjuntos difusos). O peso de cada critério depende dos interesses do decisor e deve ser definido especificamente para cada avaliação.

[6] A lógica difusa, ou *Fuzzy Logic* consiste numa estrutura matemática capaz de converter informações vagas, em geral descritas numa linguagem natural, num formato numérico, de modo a serem utilizadas em ferramentas de decisão multicritério. A Lógica Difusa, com base na teoria dos "conjuntos nebulosos", ou *Fuzzy Set,* tem se revelado mais adequada para gerir incertezas e imperfeições da informação do que a teoria das probabilidades, devido à capacidade de lidar com termos linguísticos e variáveis subjetivas

Tabela 3.2 – Critérios para a avaliação das variações da integração de coletores térmicos

Grupos de critérios	**Critérios individuais**
Aspetos funcionais e estéticos	
Critérios estéticos	
Compatibilidade das características físicas dos coletores térmicos e a envolvente do edifício	Compatibilidade dimensional dos coletores térmicos em relação à envolvente do edifício
Compatibilidade da aparência material dos coletores térmicos em relação à envolvente do edifício	Compatibilidade de cor
	Compatibilidade das características da superfície (textura, relevo, etc.)
	Compatibilidade de brilho e reflexo
	Compatibilidade do nível de transparência
Compatibilidade física e estética das juntas	Compatibilidade das características físicas e estéticas das selagens e juntas dos coletores térmicos em relação à envolvente do edifício
Inserção/adaptação dos coletores térmicos à envolvente	Naturalidade da integração
	Relação entre a cor e a materialidade dos coletores e a da envolvente
	Harmonia do design
	Inserção no contexto do edifício
	Inovação do design
Sucesso do conceito de visualização da integração	Sucesso do conceito de visualização da integração em relação ao edifício e ao seu contexto
Critérios de física das construções	
Características físico-mecânicas	Características mecânicas dos coletores
	Desempenho em relação a líquidos (permeabilidade à água, absorção de água, etc.)
	Desempenho dos coletores em relação ao vapor
	Deformação e destruição (vento, terramoto, fogo, temperatura, ações dinâmicas, etc.)
	Características térmicas (resistência térmica, estabilidade dimensional, etc.)
	Características acústicas dos coletores
Critérios para montagem	
Facilidade de montagem e qualidade das juntas	Facilidade de montagem
	Qualidade das juntas (construção, desempenho, manutenção)

Tabela 3.2 - (continuação)

Grupos de critérios	Critérios individuais
Aspetos de desempenho energético	
	Produção anual de energia/custo total (kWh/€)
	Produção anual de energia/área de instalação (kWh/m^2)
	Satisfação anual das necessidades de água quente (%)
	Número de meses com produção excessiva de energia térmica (1-12)
Aspetos económicos	
	Custo total (€)
	Custos de operação e manutenção (€)
	Período de retorno simples (anos)
	Contributo de benefícios não financeiros (socioeconómicos, arquitetónicos, ecológicos)
Aspetos ecológicos	
	Redução anual de CO_2 pela utilização de coletores térmicos (kg)

O procedimento proposto trata questões da integração "vitruviana" relativas às dimensões funcional, construtiva e formal. Contudo, 12 dos 29 critérios de avaliação individuais são relativos a questões ligadas a aspetos formais (Classe de critérios energéticos), alguns dos quais de elevada subjetividade. Do ponto de vista da "sustentabilidade das obras de construção", a abordagem também é parcial (considera sobretudo aspetos económicos, limita a dimensão ambiental à redução de CO_2, e não abrange a dimensão social), e as questões de ciclo de vida não são abordadas de uma forma direta.

De salientar que o modo como os critérios foram estabelecidos não garante que os sistemas solares térmicos desempenhem uma função adicional (sendo que esta questão surge apenas de forma indireta através da Classe de critérios da física das construções). Tal está patente no caso de estudo avaliado (Golić, Kosorić e Furundžić, 2011), onde não é claro se os coletores térmicos substituem elementos construtivos, ou se são apenas sobrepostos à envolvente existente. Contudo a aproximação às fases de projeto, a avaliação do "Potencial do edifício", e a definição de critérios de eliminação, são ferramentas úteis e importantes num processo de integração.

3.3.2 "BIPV EVALUATION BENCHMARK MODEL"

Yu et al. (2009) propuseram um modelo de avaliação de sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios segundo quatro indicadores: geração de eletricidade; integração construtiva; benefícios da integração do sistema fotovoltaico; e estética da superfície. Estes indicadores foram determinados através de uma revisão do estado da arte que visou os sistemas fotovoltaicos, a sua manutenção e gestão, questões arquitetónicas, e casos de excelência em termos de integração de sistemas fotovoltaicos na envolvente. A tabela seguinte reúne os indicadores e respetivos fatores de avaliação.

Tabela 3.3 – Indicadores e fatores de avaliação da integração de sistemas fotovoltaicos (Yu et al., 2009).

Indicadores	**Fatores de avaliação**	
Geração de eletricidade (G)		O benefício do sistema fotovoltaico
Integração construtiva (BI)	bi1	Tipo de módulo fotovoltaico
	bi2	Tipo de instalação fotovoltaica
	bi3	Tipo de estrutura/características construtivas do edifício
	bi4	Manutenção e gestão do painel fotovoltaico como envolvente
	bi5	Manutenção e gestão técnica do sistema fotovoltaico
Benefícios da integração (PVI)	pvi1	A proporção da envolvente revestida com módulos fotovoltaicos
	pvi2	A quantidade de partes diferentes da envolvente com módulos integrados
	pvi3	A quantidade de funções que os módulos desempenham na envolvente
Estética da superfície (A)	ai1	Unificação e harmonia
	ai2	Facilidade de reconhecimento
	ai3	O monumento
	ai4	A aplicação do distintivo local

O indicador "Geração de eletricidade (G)" é avaliado em confronto com o máximo de energia produzida em condições de orientação e inclinação ideais do local do projeto.

Os indicadores "Integração construtiva" e "Benefícios de integração" possuem 8 fatores de avaliação, os quais se dividem em 4 níveis que representam diferentes graus de funcionalidade ou desempenho. Como exemplo, o fator de avaliação "pvi2 - A quantidade de funções que os módulos desempenham na envolvente", do indicador "Benefícios de integração", divide-se em:

- Nível 1 - Outros (sem funções de iluminação, isolamento ou estanquidade);
- Nível 2 - Cumpre pelo menos um requisito;
- Nível 3 - Cumpre pelo menos dois requisitos;
- Nível 4 - Cumpre pelo menos três requisitos.

A cada nível é atribuído um valor (Tabela 3.4). O nível 3 corresponde à solução corrente (sendo pontuado com 1.00), e o nível 4 à situação privilegiada, ou seja, à solução na qual os sistemas são integrados tendo em conta procedimentos acima da prática corrente (pontuado com 1.05).

Tabela 3.4 – Pontuação dos diferentes níveis (BI) e (PVI).

Nível	1	2	3	4
Fator	0.90	0.95	1.00	1.05

Na Tabela 3.5 está patente a divisão do peso de cada indicador. No entanto, o modo como os pesos são atribuídos não é claramente explícito no documento de referência (Yu et al., 2009).

Tabela 3.5 – Modo de cálculo dos indicadores

Indicadores	
Geração de eletricidade (G)	O valor máximo de G é 65, a pontuação dada à geração de eletricidade resulta do restante face ao total possível dos restantes indicadores (BI x PVI x A)
Integração construtiva (BI)	BI = bi1 x bi2 x … x bi5 ≤ 1,28
Benefícios da integração (PVI)	PVI = pvi1 x pv12 x pvi3 ≤ 1,16
Estética da superfície (A)	A = ∑ai, A ≤ 0,04

A estimativa do benefício da integração fotovoltaica (BPE) é determinada da seguinte forma:

$$BPE = G \times BI \times PVI \times (1 + A) \quad (1)$$

A classificação final é balizada através de quatro níveis: básico; razoável; bom; e excelente. Estes intervalos são determinados tendo em conta a pontuação geral, a média e o desvio padrão. Uma boa avaliação deve corresponder a um resultado "Excelente", ou seja pontuado acima de 80,0.

Este método trata sobretudo questões de integração "vitruviana". De uma forma geral, não abrange as questões de "sustentabilidade das obras de construção", nem de ciclo de vida, exceto no indicador "Integração construtiva (BI)", na previsão de aspetos relacionados com a manutenção e gestão dos sistemas fotovoltaicos, e no fornecimento de energia em caso de calamidade (previsto nos níveis de avaliação do "Tipo de instalação fotovoltaica").

Também não é estabelecida uma relação com a atividade de projeto. Salienta-se que nos "Benefícios da integração" é privilegiada a área e a quantidade de partes da envolvente com sistemas fotovoltaicos integrados na pontuação final. Contudo, este é um fator que depende de cada projeto, das suas necessidades específicas e do contexto onde se insere, pelo que esta abordagem não se revela universal numa avaliação da integração.

3.3.3 "DESIGN METHODOLOGY FOR BUILDING INTEGRATION OF PHOTOVOLTAICS"

Na proposta "Design methodology for building integration of photovoltaics" (Kosoric, Wittkopf e Huang, 2011), é apresentada uma metodologia de projeto para a integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios, em fases iniciais de conceção, de modo a selecionar a melhor alternativa, com base nos critérios estabelecidos, através de um método de decisão multicritério. Os critérios para avaliação consistem nos objetivos de projeto, nos requisitos arquitetónicos (valor arquitetónico), nos requisitos do investidor (valor arquitetónico e desempenho técnico-económico), e condicionantes técnicas (Tabela 3.6).

O processo divide-se em 3 fases: escolha do local de integração; geração e otimização das alternativas de projeto; e processo de avaliação (Figura 3.6).

Tabela 3.6 – Critérios e respetiva valorização

Categoria dos critérios	**Grupos de critérios**	**Critérios individuais**	**Unidades**
Valor arquitetónico (0,5)	Eficácia da integração (0,2)	Integração na arquitetura existente (0,1)	Qualitativo (1-5)
		Integração no ambiente construído (0,05)	Qualitativo (1-5)
		Integração no ambiente construído de Singapura (0,05)	Qualitativo (1-5)
	Inovação (0,05)	Inovação (0,05)	Qualitativo (1-5)
	Expressividade exterior e interior (0,1)	Expressividade exterior (0,05)	Qualitativo (1-5)
		Expressividade interior (0,05)	Qualitativo (1-5)
	Contributo funcional (0,05)	Contributo funcional (0,05)	Qualitativo (1-5)
	Coerência arquitetónica (0,05)	Coerência arquitetónica (0,05)	Qualitativo (1-5)
	Efeito motivacional nos utilizadores (0,05)	Efeito motivacional nos utilizadores (0,05)	Qualitativo (1-5)
Desempenho tecno-económico (0,5)		Geração de energia anual (0,2)	MWh
		Custo total do sistema (0,2)	€
		Complexidade da intervenção construtiva (0,1)	Qualitativo (1-5)

Na primeira fase dá-se a escolha do local de integração em função do clima, do contexto urbano (inclinação, orientação e sombreamento) e das características arquitetónicas (posição, visibilidade do interior, acessibilidade, função, estética). Estes critérios definem o potencial de integração e determinam as zonas da envolvente a integrar os sistemas fotovoltaicos. A segunda fase inicia com a ideia geral de integração. São estabelecidas as alternativas de projeto, tendo em conta a produção de energia e os custos de cada solução. Para cada local da envolvente é efetuada a escolha da posição exata, do tipo de sistema (tipo de tecnologia, forma e dimensão, cor, transparência, caixilho), assim como é definida a inclinação e as opções de montagem. Na terceira fase, as alternativas são avaliadas através dos critérios estabelecidos (Tabela 3.6), e é determinada a solução ótima através de um método de decisão multicritério (com o objetivo de estabelecer um compromisso entre estratégias por vezes conflituosas). É ressalvado que o peso dos critérios influencia os resultados, e que estes deverão ser atribuídos de forma a refletir os objetivos do projeto e do investidor.

Esta proposta incide sobre os aspetos de integração "vitruviana", com evidente destaque dos aspetos formais, patente nos critérios referentes ao "valor arquitetónico", que são valorizados qualitativamente e dependem de um elevado grau de subjetividade. Neste aspeto, salienta-se que o propósito desta metodologia inclui uma componente forte de demonstração e sensibilização, o que justifica esta incidência. As questões da "sustentabilidade das obras de construção" não são abordadas, excetuando a dimensão económica, relativamente ao custo total. A metodologia proposta segue um faseamento, sendo assim adequável ao processo de projeto.

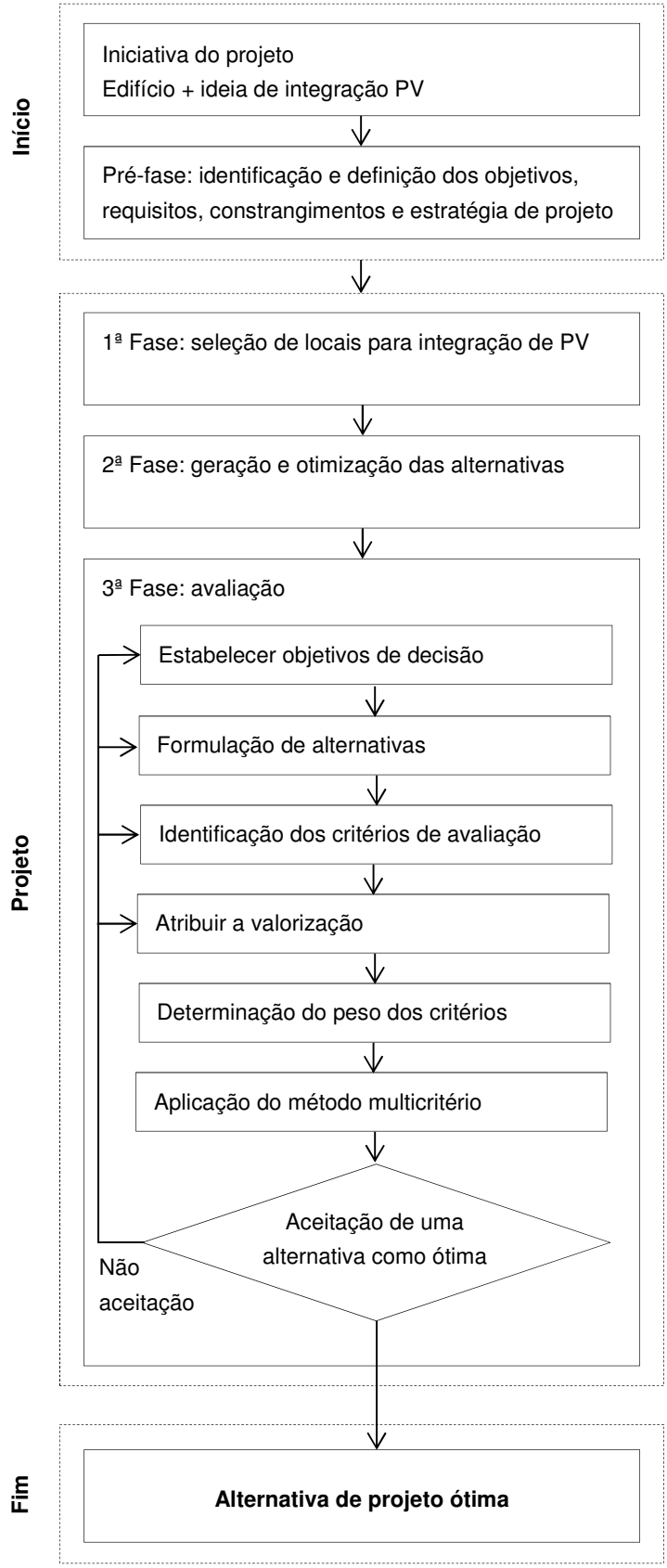


Figura 3.6 – Fluxo do processo de projeto

3.3.4 "SISTEMA DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI INTEGRAZIONE FOTOVOLTAICA (BIPV.TOOL)"

Bonomo (2012) propõe um processo de avaliação do nível de integração dos sistemas fotovoltaicos, denominado "BIPV.Tool", destinado a ser aplicado em fase de projeto ou a edifícios construídos. O sistema baseia-se numa grelha de valorização multicritério, na qual cada critério é ponderado através de "requisitos de valoração" associados a uma escala de pontuação (entre -1 e 5). Os diversos critérios são quantitativos ou qualitativos, e a sua pontuação possui um peso relativo. Estes critérios agrupam-se em 7 "Classes de integrabilidade", que possuem um determinado peso final (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Classes de integrabilidade e respetivos critérios

Classes de integrabilidade		**Critérios**	**Peso relativo e pontuação**	
5%	Normativa	Possibilidade de acesso às tarifas de incentivo	50%	-1;5
		Acesso a tarifas prémio	30%	3;5
		Normativas especiais	20%	2;5
30%	Morfológico-figurativa	Papel linguístico e morfogenético	20%	-1;5
		Reconhecimento da "pele" fotovoltaica e relação dialética com a envolvente	15%	-1;5
		Coordenação morfológica-dimensional da superfície fotovoltaica	20%	-1;5
		Controlo figurativo à escala do componente	15%	3;5
		Inovação	15%	3;5
		Papel figurativo das partes complementares: cabos e ligações	5%	-1;5
		Papel figurativo das partes complementares: estruturas e sistemas de aplicação	5%	-1;5
		Papel figurativo das partes complementares: inversores e baterias	5%	-1;4
15%	Tecnológica-construtiva	Tipologia de integração	40%	3;5
		Papel construtivo	30%	2;5
		Facilidade de acoplagem	30%	2;5
15%	Edifício-desempenho	Grau de satisfação dos requisitos	60%	-1;5
		Interferência na qualidade tecnológica	25%	-1;5
		Estratégia de inovação tecnológica	15%	1;5
15%	Bioclimática-ecológica	Satisfação das necessidades de energia elétrica	40%	-1;5
		Contributo renovável do sistema fotovoltaico no consumo energético global	40%	-1;5
		Reciclagem	15%	-1;5
		Energia incorporada no sistema fotovoltaico	5%	0;5

Tabela 3.7 - (continuação)

Classes de integrabilidade		Critérios	Peso relativo e pontuação	
15%	Instalação	Escolha do material fotovoltaico	10%	0;5
		Maximização da energia produzida	20%	0;5
		Posicionamento adequado dos módulos	20%	-1;5
		Limitação de sombreamento dos módulos	10%	-1;5
		Limitação da sujidade sobre os módulos	10%	-1;5
		Controlo de temperatura dos módulos	20%	-1;5
		Controlo do fator de albedo (coeficiente de reflexão)	10%	3;5
5%	Contextual-paisagística	Carácter paisagístico do contexto da intervenção	30%	2;5
		Intervenção no grau de qualidade contextual	70%	-1;5

Como exemplo da análise e pontuação dos critérios, refere-se o "Papel linguístico e morfogenético" relativo à "Classe de integrabilidade morfológico-figurativa", descrito na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Requisitos de valoração de um critério da "Classe de Integrabilidade morfológico-figurativa"

Papel linguístico e morfogenético	**20%**
Para além da expressividade do revestimento envolvente, o fotovoltaico pode contribuir para a génese da forma do organismo arquitetónico através da síntese de alguns parâmetros de integrabilidade fotovoltaica (inclinação, orientação, ausência de sombreamento, albedo,…) com outros de natureza bioclimática ou arquitetónica.	
Requisitos de valoração	Pontuação
Sistema fotovoltaico aplicado de modo *dissonante* das características morfológicas e linguísticas da envolvente (inclinação diversa, …).	-1
Sistema fotovoltaico sobreposto de modo *pouco significativo* relativamente à morfologia, privilegiando a funcionalidade (ex. módulos inclinados sobre cobertura plana).	2
Sistema fotovoltaico *morfologicamente integrado, mas com papel secundário ou marginal* na expressão da forma da envolvente (ex. aplicação em varandas).	3
Sistema fotovoltaico *protagonista da morfologia* da envolvente (cobertura, fachada) e/ou dos espaços interiores (controlo solar, envidraçados).	4
Envolvente *tecnomorfa*, expressão morfogenética de carácter significativo da integrabilidade do sistema fotovoltaico.	5

O resultado final é obtido sob a forma de "classificação do nível de integração", replicando o sistema de pontuação da classificação energética de "A+" a "G".

O sistema de avaliação "BIPV.Tool" é abrangente, tratando questões da integração "vitruviana" e da "sustentabilidade das obras de construção", relativamente às dimensões ambiental e económica,

podendo ser aplicado nas diversas fases da conceção. Contudo, não conforma um instrumento-guia, como forma de acompanhamento paralelo da atividade de projeto. A forma como a valorização é efetuada nem sempre é a mais adequada face aos prossupostos da atividade de projeto. Como exemplo, a expressão "significativa" dos sistemas fotovoltaicos é valorizada de forma absoluta (Tabela 3.8), e estes podem ser integrados não tendo esse papel, um vez que este aspeto corresponde a uma opção de projeto, e não a uma validação do sucesso da integração. Também a inclusão de sistemas de acumulação de energia é penalizada no critério "Energia incorporada no sistema fotovoltaico", sendo, no entanto, valorizada na "sustentabilidade das obras de construção" em termos de segurança e autonomia em caso de falha da rede elétrica. Na mesma linha de atuação, é valorizada a utilização de módulos filme fino, devido à baixa energia incorporada no fabrico destes sistemas, sem considerar a solução construtiva especifica, ou seja, a restante composição da envolvente, e cingindo-se a um contexto tecnológico que poderá alterar-se rapidamente no futuro.

3.3.5 "HOLISTIC EVALUATION SYSTEM FOR BIPV FACADES"

Este processo de avaliação foi desenvolvido no âmbito do projeto MULTIELEMENT II, no Instituto Fraunhofer, e destina-se a fachadas de escritórios e de edifícios administrativos que integrem sistemas fotovoltaicos (Schuetze, Willkomm e Roos, 2015). Tem como objetivo facilitar a certificação de fachadas BIPV no quadro das avaliações de sustentabilidade, tais como a DGNB alemã.

A avaliação é efetuada por comparação a uma fachada convencional, através de critérios técnicos, económicos, de sustentabilidade e de projeto (Tabela 3.9). Para cada projeto/fachada é definida a importância dos critérios principais e individuais, sendo atribuída uma pontuação (de "5 - Muito alta" a "1 - Muito baixa").

Tabela 3.9 – Critérios principais e individuais

Critério principal (A)	**Critério individual (B)**
Projeto (design)	Contemporâneo
	Corporativo
	Funcional
	Ambiente construído
	Referência a outros componentes do edifício
Flexibilidade	Dimensões
	Cor
	Material
	Fluxo de energia
	Flexibilidade pela variabilidade funcional (multifuncionalidade)
Ecologia e sustentabilidade	Balanço energético
	Impacto ambiental
	Reciclagem

Tabela 3.9 - (continuação)

Critério principal (A)	Critério individual (B)
Produção	Produção para variedade
	Produção "standard"
	Prefabricação de elementos multifuncionais
	Componentes do edifício
	Variação transporte e montagem
Economia	Custo construção
	Custo manutenção e substituição
	Custos de compensação
	Vida útil
	Custos de ciclo de vida
Física das construções e construção	Segurança contra incêndio
	Qualidade iluminação natural
	Proteção climática
	Proteção acústica
	Isolamento térmico
	Estrutura

Para a avaliação dos critérios individuais são utilizadas *cheklists,* onde são definidos os modos de valorização, utilizando a mesma escala de "5" a "1" (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 – *Checklist* do critério individual "Referência a outros componentes do edifício"

Critérios individuais (IC) "Referência a outros componentes do edifício"		
Solução	**Cumprimento dos requisitos**	**Valoração**
Muito boa	O desenho da fachada forma um conjunto harmónico com outros componentes de construção relativamente a propriedades como proporção, material e cor	5
Boa	O desenho da fachada cria uma referência distinguível em relação aos outros componentes de construção	4
Satisfatória	O desenho da fachada cria uma referência satisfatória em relação aos outros componentes de construção	3
Pobre	O desenho da fachada é perturbador e cria uma referência dificilmente identificável com os outros componentes de construção	2
Muito pobre	O desenho da fachada é inapropriado e não tem referência aos outros componentes de construção	1

O método de avaliação proposto é descrito na Tabela 3.11, que representa a matriz de avaliação. Inicialmente é determinada a importância dos critérios principais "A" e dos critérios individuais "B". A conformidade com os requisitos de cada critério individual é definida através das *checklists*, e o resultado da sua avaliação é indicado na coluna "C". Os valores relativos à média aritmética são registados na coluna "D" para os critérios individuais, e na coluna "E" para os critérios principais. Finalmente, na coluna "F" é calculado o valor médio do projeto/fachada. A matriz de avaliação foi desenvolvida numa folha de cálculo eletrónica, a partir da qual é gerado um diagrama de avaliação que permite a visualização gráfica dos resultados.

Tabela 3.11 – Determinação dos valores para a avaliação da fachada

Critérios principais	**Critérios individuais**	**Avaliação dos critérios individuais**	**Impacto médio dos critérios individuais**	**Valor médio dos critérios principais**	**Valor do impacto médio do projeto/fachada**
A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Importância	**Importância**	***Checklist***	**D=(A+B+C)/3**	**$E=(D_1+\ldots+D_n)/n$**	**$F=(E_1+\ldots+E_n)/n$**
5 (muito alta) a 1 (muito baixa)	5 (muito alta) a 1 (muito baixa)	5 (muito alta) a 1 (muito baixa)	5 (muito alta) a 1 (muito baixa)	5 (muito alta) a 1 (muito baixa)	5 (muito alta) a 1 (muito baixa)

Depois de determinados os critérios principais e os individuais, podem ser identificadas interações entre critérios de dois tipos: "interação paralela" e "interação reversa". Na "interação paralela" a avaliação positiva de um determinado critério dá origem a um resultado positivo noutro critério. Na "interação reversa" uma avaliação positiva de determinado critério corresponde a um resultado negativo noutro critério.

É salientado que cada edifício é dependente do contexto específico em que se insere. Nesse sentido, é indispensável a definição de regras estritas de modo a permitir que uma avaliação de fachadas diferentes seja diretamente comparável. O contexto e as condições gerais externas devem ser determinadas e consideradas a partir do início de uma avaliação.

Foi também concebida uma ferramenta de decisão para o desenvolvimento e estimativa das alternativas, assim como um breve guia de apoio ao projeto com base nas *checklists* (devido às características específicas dos sistemas BIPV, como o potencial funcional para além da geração de energia, o balanço energético e os custos de ciclo de vida).

Esta metodologia é relativamente abrangente, são consideradas questões relativas à integração "vitruviana" e à "sustentabilidade das obras de construção", incluindo questões do ciclo de vida. Acompanha o processo de conceção, sendo a valorização dos critérios efetuada em função de cada projeto específico.

3.3.6 SÍNTESE

Todas as metodologias referidas apresentam um conjunto de critérios valorizados de forma qualitativa e quantitativa, e visam um resultado final que permite o auxílio à conceção e/ou avaliação final (edifícios novos ou existentes). Numa análise à abrangência dos critérios, verifica-se que estes não preenchem todas as questões colocadas do ponto de vista da integração "vitruviana" e da

"sustentabilidade das obras de construção". A Tabela 3.12 sintetiza essas relações a uma escala macro. Evidentemente que cada linha da coluna "Categorias de integração e de sustentabilidade" subdivide-se em vários critérios cuja correspondência não coincide inteiramente com as restantes colunas, que representam as metodologias analisadas. Em alguns casos, essa correspondência é apenas parcial ou indireta. Por outro lado, surgem também nas metodologias analisadas algumas questões que estão fora do âmbito do contexto da integração "vitruviana" e da "sustentabilidade das obras de construção", contudo estas cingem-se sobretudo a questões de inovação e efeito motivacional.

Tabela 3.12 - Categorias a que pertencem os critérios das metodologias analisadas

Categorias de integração e de sustentabilidade			**Metodologias analisadas**				
			"General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment"	"BIPV evaluation benchmark model"	"Design methodology for building integration of photovoltaics"	"Sistema di valutazione del livello di integrazione fotovoltaica"	"Development of a holistic evaluation system for BIPV facades"
Energia			■	■	■	■	■
Integração "vitruviana"	Funcional		■	■	■	■	■
	Construtiva		■	■	■	■	■
	Formal		■	■	■	■	■
Sustentabilidade das obras de construção	Social	Acessibilidade					
		Adaptabilidade					
		Saúde e conforto					■
		Pressões na vizinhança					
		Manutenção		■			
		Segurança e proteção		■			■
	Ambiental		■			■	■
	Económico	Custo	■		■	■	■
		Valor financeiro	■				■
Adequação às fases de projeto			■		■		■
Aspetos não previstos na integração "vitruviana" + "sustentabilidade das obras de construção"			Inovação		Inovação Efeito motivacional Integração no ambiente construído	Inovação Integração paisagística	

Três das metodologias analisadas atribuem a valorização aos critérios em função da sua importância em cada projeto específico. Este procedimento permite a aproximação da avaliação à realidade, pois

cada projeto possui uma série de condicionantes que tornam o seu modelo de avaliação singular e não comparável. No caso das valorizações pré-definidas, a avaliação é sobretudo direcionada para um tema (que transparece no modo como a valorização é efetuada), e não de forma direta para a otimização da solução de projeto e para auxilio à decisão num processo complexo. Como exemplo, no modelo "BIPV.Tool", a expressão linguística da utilização dos sistemas fotovoltaicos é valorizada positivamente, contudo, num processo de conceção, tanto a visibilidade dos sistemas como a sua dissimulação são válidas como estratégia de projeto, pois dependem de cada processo concetual.

Nesse sentido, o carácter de inovação não constitui um requisito fundamental, a sua consideração surge nestas metodologias por estarem de certa forma ligadas à disseminação e promoção da integração de SSA na envolvente de edifícios. Todavia, não constituindo um requisito fundamental, pode fazer parte da ambição do promotor ou do projetista. Neste âmbito, a definição de critérios de eliminação, como proposto por Golić, Kosorić e Furundžić (2011), permite adaptar a avaliação a cada contexto de projeto. Da mesma forma, as interações entre critérios - "interação paralela" e "interação reversa" – no modelo desenvolvido no Instituto Fraunhofer, podem potenciar explorações de sinergias durante a fase de projeto.

Yang (2015) identificou alguns aspetos que constituem barreiras relativas à disseminação de BIPV, resultantes da falta de consideração de determinados aspetos ao longo do ciclo de vida dos sistemas. Algumas das questões relacionam-se diretamente com os SSA como produtos da construção e estão a ser resolvidos pela indústria. Outras relacionam-se com a atividade de projeto, sobretudo com aspetos de ciclo de vida, operação e manutenção. Neste contexto, algumas questões foram abordadas nas metodologias analisadas, tais como:

- Posicionamento inapropriado (orientação e inclinação, sombreamento);
- Escolha incorreta dos sistemas BIPV, módulos e componente "BOS" (necessidade de recorrer a técnicos nas fases iniciais de projeto);
- Capacidade resistente insuficiente para suportar os sistemas BIPV (sobretudo em coberturas existentes);
- Tensões mecânicas nos BIPV devido a ações de sobrecarga.

Contudo, outras questões, algumas das quais se enquadram na dimensão social da "sustentabilidade das obras de construção", não foram abrangidas. Destacam-se os seguintes pontos:

- Questões relacionadas com a saúde e segurança dos utilizadores (transferência de calor, segurança contra incêndio, conforto acústico);
- Dificuldade de substituição dos módulos;
- Processos de manutenção definidos de forma não clara;
- Não consideração de como facilitar manutenção e reparação (facilidade de acesso a fixações e cabos);
- Corrosão galvânica;
- Falta de códigos e regulamentos de construção específicos.

Verifica-se assim um campo em aberto nos processos metodológicos existentes, tendo em conta uma integração abrangente de SSA na envolvente de edifícios, considerando os aspetos funcionais, construtivos e formais, e as dimensões da "sustentabilidade das obras de construção".

4

A INTEGRAÇÃO "VITRUVIANA"

4.1 INTRODUÇÃO

No presente Capítulo é definido o conceito de integração de sistemas solares ativos na envolvente de edifícios. A partir dessa contextualização conceptual são definidos os requisitos e parâmetros relacionados com a integração "vitruviana", nas suas dimensões funcional, construtiva e formal, tendo como referência os "Requisitos básicos das obras de construção" (Regulamento UE N.º 305/2011).

4.2 A INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES ATIVOS NA ENVOLVENTE

4.2.1 O CONCEITO DE INTEGRAÇÃO

Partindo do princípio que um sistema solar ativo integrado corresponde a um produto de construção, analisam-se as seguintes definições de "produto de construção". No regulamento que estabelece as condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção (Regulamento UE N.º 305/2011), um "produto de construção" consiste num "produto ou *kit* fabricado e colocado no mercado para incorporação permanente em obras de construção ou em partes delas e cujo desempenho influencia o desempenho das obras de construção no que se refere aos seus requisitos básicos". Na normalização europeia de sustentabilidade (CEN, 2010a) é apresentada uma definição de material de edificação (*building fabric*), na qual os produtos que constituem o edifício, ou seja, os produtos integrados, consistem naqueles em que a sua ausência reduz o desempenho do edifício e a sua desmontagem ou substituição constitui uma operação de construção. Na recente normalização da integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios (CENELEC, 2014a), a definição de "BIPV" é efetuada neste sentido, ou seja, os módulos fotovoltaicos são considerados integrados quando constituem um produto de construção e providenciam uma função de acordo com a diretiva dos produtos de construção, ou seja, quando constituem um pré-requisito para a integridade da funcionalidade do construído e, no caso da sua desmontagem, devem ser substituídos por produtos de construção apropriados.

Através destas definições, a integração é entendida como um conjunto de elementos, componentes e/ou sistemas que formam um todo funcional e construtivo – o edifício. Neste sentido, a integração está intimamente relacionada com a ideia do próprio edifício como sistema. A partir desta noção, do edifício como um sistema composto de subsistemas, o objetivo fundamental da integração, tomando como referência Bachman (2003), consiste na eliminação de recursos redundantes, através da combinação estratégica dos sistemas, implantados de acordo com os seus atributos compartilhados de espaço, imagem e/ou função. A integração tem assim como objetivo otimizar as relações e conseguir um todo maior que as partes, compatibilizando os elementos, componentes e/ou sistemas através das

suas funções, necessidades de espaço (disposições construtivas) e imagem (disposições visuais ou formais).

No que respeita à integração de sistemas solares ativos na envolvente dos edifícios, salienta-se que no contributo do grupo de trabalho IEA-SHC Task 41 "Solar Energy and Architecture" (Wall, 2012), a integração é adjetivada como "arquitetónica". O título de uma das suas sub-tarefas é precisamente "Critérios para a integração arquitetónica" (Farkas et al., 2013). Neste grupo de trabalho a integração arquitetónica é entendida a partir dos princípios de Vitrúvio (2009), consistindo na qualidade que resulta de uma integração simultaneamente controlada e coerente dos pontos de vista funcional (*utilitas*), construtivo (*firmitas)* e formal (*venustas*). Neste sentido, a integração arquitetónica, ao incluir os aspetos formais, vai além das anteriores definições regulamentares e normativas (ou dá-lhes uma importância maior ao considerá-los de forma isolada) estando em consonância com o objetivo da integração definido por Bachman (2003). Este ponto é relevante, uma vez que os aspetos formais são considerados, como foi referido anteriormente, um dos fatores principais para uma fraca aceitação social e profissional da inclusão destes sistemas nos edifícios.

4.2.2 O SUBSISTEMA ENVOLVENTE E OS SSA

O entendimento do edifício como sistema é um método para o domínio da sua complexidade, na medida em que possibilita, através de uma desmontagem, a compreensão das várias partes que o compõem e das relações entre essas partes, consistindo assim numa abordagem conceptual à construção. Na norma ISO 6241 (ISO, 1984), que define os princípios e fatores a considerar na normalização do desempenho dos edifícios, é apresentada uma divisão física em função da funcionalidade, na qual o edifício é definido como um sistema composto por vários subsistemas (Tabela 4.1), entre os quais a envolvente (que considerando as potenciais localizações de integração dos SSA será composta pelos subsistemas "envolvente" e "divisórias exteriores à envolvente"). Estes subsistemas, por sua vez, são compostos por componentes, montagens e elementos.

Tal como é referido na norma, os subsistemas, assim agrupados, contemplam diferentes partes físicas e funções, contudo, não são estanques entre si. Como exemplo, apesar das instalações constituírem um subsistema, estas encontram-se normalmente disseminadas por todo o edifício, ou seja, também fazem parte de um ou mais dos restantes subsistemas. Reciprocamente um componente ou montagem pode também fazer parte de um ou mais subsistemas. No caso dos sistemas solares ativos, apesar de serem componentes que fazem parte das instalações, a sua integração na envolvente torna-os componentes importantes na composição desta, podendo inclusivamente desempenhar várias das suas funções[7], sendo este um requisito para serem considerados produtos de construção. A agregação e mudança de escala são assim relativas, pois um subsistema é um conjunto de elementos, que por sua vez constitui um sistema em si e, simultaneamente, um componente de um sistema maior – o edifício. Neste sentido, a envolvente constitui um subsistema do edifício e, como tal, um sistema composto relativamente autónomo, permitindo a sua decomposição, quantificação e análise individualizada.

[7] A envolvente e as instalações são os principais subsistemas responsáveis pelo controlo da eficiência energética. Dependendo do seu grau de complexidade, a envolvente pode recorrer a poucos dispositivos enquadráveis em instalações e, no limite - dependendo da conformação e composição da envolvente como interface entre o ambiente controlado interior e o ambiente exterior - ser considerada uma instalação (como no caso da fachada sul do edifício Solar XXI referido no Capítulo 2).

Tabela 4.1 - Subsistemas do edifício, adaptado da norma ISO 6241 "Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered" (ISO, 1984)

Subsistema		**Exemplos de montagens ou componentes**
Estrutura	Fundação	Sapata, lintel, estaca
	Superestrutura	Pilar, viga, laje, casca
Envolvente exterior	Zona enterrada	Laje térrea, parede de cave
	Zona acima nível terreno	Parede, cobertura
		Porta, janela, claraboia
Divisórias exteriores à envolvente	Vertical	Parede, guarda
	Horizontal	Varanda, pala, alpendre
	Escada	Escada, rampa
Divisórias interiores à envolvente	Vertical	Parede, armário
	Horizontal	Pavimento
	Escada	Escada, rampa
Instalações	Hidráulicas	Abastecimento de água, drenagem de águas residuais e pluviais (tubagem, sanitários, caixas de visita)
	Ventilação e aquecimento	Circuitos de ar/água/combustível, ductos, chaminé, caldeira
	Gás	Distribuição, tubagens
	Eletricidade	Cabos, interruptores, quadros, transformadores, iluminação
	Telecomunicações	Sistemas de telefone, rádio, televisão, internet
	Transporte mecânico e eletromecânico	Elevadores, escadas rolantes, equipamento de limpeza de fachadas
	Transporte por gravidade e pneumático	Aspiração central
	Segurança	Incêndio, intrusão

A envolvente de um edifício como sistema físico que separa o ambiente exterior do ambiente interior é tipicamente composta pelos seguintes conjuntos de elementos construtivos:

- Cobertura (zona opaca e vãos);
- Fachada (zona opaca e vãos);
- Elementos exteriores à envolvente (varandas, palas, …);
- Paredes enterradas;
- Laje térrea.

Cada conjunto de elementos é tridimensional, multicamada e multimaterial, e estende-se da superfície interior à superfície exterior. A envolvente total é composta por todos os conjuntos de camadas

contíguas que a conformam (Straube, 2006). Por princípio, é possível a utilização de sistemas solares ativos em qualquer superfície do edifício exposta à radiação solar, e a sua localização consiste, obviamente, na primeira camada à superfície exterior da envolvente (em determinados casos os SSA poderão constituir a segunda camada, como em situações que se localizam atrás de um vidro). Nesse sentido, em relação às superfícies expostas à radiação solar, a envolvente limita-se aos seguintes grupos: cobertura; fachada; e elementos exteriores à envolvente (Figura 4.1).

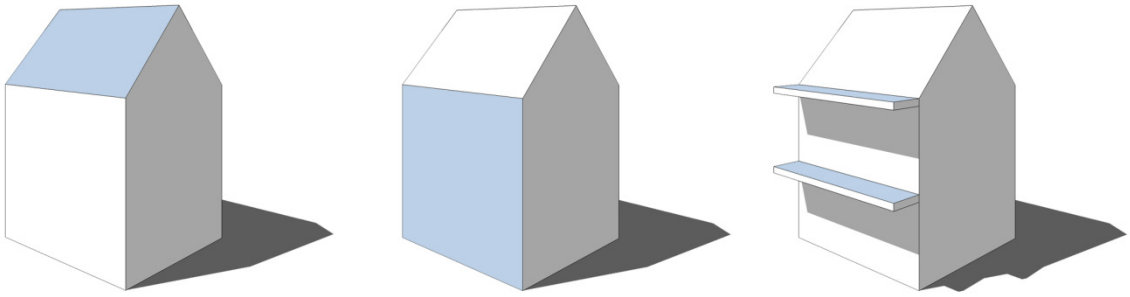
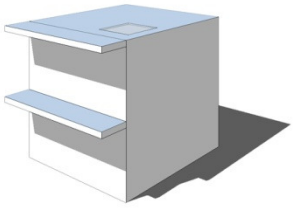
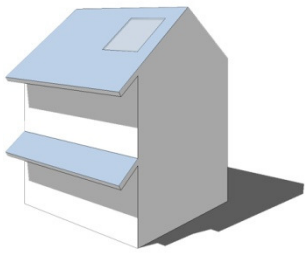
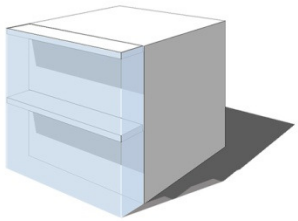


Figura 4.1 – Localização para integração dos SSA: cobertura; fachada; e elementos exteriores à envolvente

Dentro de cada grupo são possíveis várias conformações volumétricas (com influência na exposição solar, em termos de orientação e inclinação). Cobertura e fachada possuem diferenças significativas em termos de função e construção, assim como em relação às ações que estão sujeitas, como é exemplo significativo o grau de exposição solar (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Influência da inclinação e orientação do edifício e a radiação solar, valores anuais

Inclinação	**0°** (cobertura plana)	**35°** (otimizada)			**90°** (fachada)		
Radiação solar [(a)] Wh/m^2/dia	4600	5360			3510		
Orientação (azimute)	-	Oeste (90°)	Sul (0°)	Este (-90°)	Oeste (90°)	Sul (0°)	Este (-90°)
Energia (PV) [(a)] kW/h	12000	11100	13800	11100	6790	9120	6880
Localizações na envolvente do edifício							

(a) Dados de simulação: localização – Porto, 41°9'24"N 8°37´26´´W, altitude 87m; sistema fotovoltaico de silício cristalino, integrado em edifício, com uma potência de 10 kWp e total de perdas de 29,2% (13,2 a 15,4% temperatura e baixa irradiância, 2,7 a 5,4% efeitos de reflectância angulares, 14.0% cabos, inversores e outros (JRC-IET, 2015).

Uma vez que o conceito de integração está associado ao de edifício enquanto sistema, caracteriza-se a envolvente enquanto subsistema integrado do edifício, relativamente às suas funções e configuração. A função primária da envolvente é a de proteção, segurança e abrigo das ações a que está sujeita, sobretudo das condições climáticas exteriores, como o vento, o sol e a chuva, mas também de outras ações exteriores, interiores e da própria envolvente. A envolvente é, deste modo, um sistema mediador entre as influências internas e externas, sendo composta por materiais e elementos construtivos cujas características influenciam essa mediação, assim como os processos dinâmicos que acomoda, como a ventilação ou a iluminação natural. Também possui uma carga simbólica inerente importante, pois geralmente constitui a parte pública do edifício com maior visibilidade, possuindo assim qualidades formais que constituem funções de representação e comunicação importantes, com uma dimensão social e cultural relevante. A complexidade e autonomia da envolvente, como tema de projeto, residem nesta acumulação de funções e qualidades, associada à sua importância como subsistema no edifício.

Deste modo, a configuração da envolvente é um exercício que pretende dar resposta às ações a que está sujeita e dotá-la de determinadas funções e qualidades, no cumprimento de uma quantidade considerável de exigências e requisitos, entre os quais:

- Estabilidade e resistência mecânica;
- Proteção climática;
- Estanquidade (água, vento, neve);
- Conforto térmico (isolamento, controlo de sobreaquecimento, inércia térmica);
- Segurança contra incêndio;
- Segurança e proteção;
- Ventilação natural e mecânica;
- Iluminação natural e artificial;
- Relação visual interior/exterior;
- Conforto acústico;
- Requisitos visuais;
- Higiene;
- Durabilidade;
- Requisitos económicos;
- Comunicação (representação e afirmação simbólica - poder, segurança, riqueza, publicidade);
- (…).

Segundo Straube (2006), a função principal da envolvente, de separação física entre ambientes distintos, pode ser decomposta em quatro subcategorias funcionais: suporte, controlo, acabamento e distribuição[8] (Tabela 4.3). A quantidade de ações a que a envolvente está sujeita é considerável e cada ação afeta, pelo menos, uma subcategoria funcional da envolvente (suporte, controlo, acabamento e distribuição). Como exemplo, ações térmicas podem ter influência ao nível do controlo, mas também consequências estruturais (ao nível do suporte). Estas subfunções são desempenhadas pela articulação de elementos/componentes que formam o sistema envolvente (dependendo das situações pela conformação global ou parcial da envolvente). Estas subcategorias ajudam a definir a integração "vitruviana" de SSA na envolvente, nomeadamente nos aspetos de integração construtiva,

[8] Straube (2006) refere 3 subcategorias funcionais, considerando a "distribuição" uma quarta que também poderá ser aplicada. Neste caso optam-se pelas 4 subcategorias, uma vez que cada vez mais as instalações, e em particular a integração dos SSA, fazem parte da envolvente, podendo, no limite, em determinadas configurações, considerar-se a envolvente uma instalação.

subdividindo-a em suporte, controlo e distribuição, sendo que o acabamento coincide com os aspetos formais.

Tabela 4.3 - Subcategorias funcionais da envolvente (Straube, 2006)

Suporte	Suportar, resistir, transferir e acomodar todas as ações estruturais impostas pelo ambiente exterior/interior e pelo edifício (envolvente incluída).
Controlo	Controlar, regular e moderar todas as ações devido à separação entre o ambiente exterior e interior – maioritariamente o fluxo de massa (ar, humidade, etc.) e energia (calor, som, etc.).
Acabamento (exterior e interior)	As superfícies que compõem a interface da envolvente com o ambiente exterior e interior devem responder aos requisitos de performance relevantes (visuais, estéticos, desgaste, etc.).
Distribuição	Distribuição de serviços/instalações como energia, água, comunicações, nas suas várias formas (gás, eletricidade, ventilação) para a envolvente, a partir desta, ou no seu interior.

Na configuração da envolvente, esta tem de atingir certos níveis de desempenho relativamente a aspetos essenciais, que se estendem aos materiais e componentes de construção que a compõem, assim como às técnicas e processos de construção. Os sistemas solares ativos integrados na envolvente fazem parte da sua composição e, como tal, são componentes sujeitos aos requisitos da envolvente e contribuem para o seu desempenho. Apesar dos sistemas solares ativos serem desenvolvidos para utilização exterior, a integração em edifícios implica questões adicionais na salvaguarda do seu desempenho energético, e na compatibilização com a envolvente, designadamente no cumprimento dos seus requisitos, assim como da legislação de construção aplicável, de forma a obter um desempenho geral satisfatório.

Dependendo das características dos SSA, do tipo de solução construtiva da envolvente e dos seus requisitos de desempenho, estes poderão desempenhar uma ou mais funções nas zonas opacas e envidraçadas, de acordo com o papel que lhe é atribuído. Devido às diferentes conformações e características de funcionamento das várias tecnologias solares, umas são mais indicadas para determinadas soluções funcionais, construtivas e/ou formais que outras. Deste modo, de acordo com as características dos sistemas existentes (materialidade, dimensão, conformação, acabamento, etc.) surgem aplicações de compatibilidade ou incompatibilidade com situações correntes da envolvente. Como exemplo, o nível de desempenho dos módulos fotovoltaicos cristalinos é menor se não for possível dissipar o calor gerado pelo funcionamento das células, enquanto o desempenho dos coletores térmicos planos é maior se possuírem isolamento posterior. Estas características condicionam diretamente a relação energética e construtiva dos sistemas na envolvente, indicando vantagens na utilização de módulos fotovoltaicos cristalinos em situações que a ventilação posterior seja possível, como revestimento exterior em fachadas ventiladas (envolvente fria) ou integrados em estruturas de sombreamento exteriores à envolvente. Por outro lado, a integração na envolvente de coletores térmicos planos sem ventilação posterior, pode contribuir para diminuir as perdas de calor, uma vez que os coletores aquecem mesmo quando expostos a baixos níveis de radiação solar, inclusivamente no inverno, o que permite reduzir a diferença de temperatura entre o espaço interno e a superfície exterior nessa estação (o mesmo ocorre na utilização de módulos fotovoltaicos semitransparentes ou translúcidos em fachadas cortina). Nestes casos, o comportamento da envolvente modifica-se de forma

radical ao nível da física das construções (Probst, 2009) uma vez que, em geral, o vapor de água desloca-se do interior para o exterior, sendo colocada uma barreira para-vapor na face interior da camada quente, de modo a evitar condensações nas camadas seguintes ao longo da parede. Ao colocar um coletor térmico plano como camada final exterior, o vapor de água passa a deslocar-se nos dois sentidos consoante a temperatura do coletor. Nesta situação de "envolvente quente" é necessário considerar questões como a espessura do isolamento, o sobreaquecimento no verão e a possibilidade de minimizar as perdas no inverno. Salienta-se que a indústria já fornece coletores especificamente desenvolvidos para fachada que podem ser integrados na envolvente sem perigo de condensação.

Os coletores solares térmicos e os módulos fotovoltaicos também possuem características semelhantes em termos funcionais e formais, ambos podem desempenhar funções adicionais como revestimento final e proteção dos agentes atmosféricos e, como tal, podem constituir um elemento estruturante na composição da envolvente do edifício. No entanto, essa capacidade depende da sua finalidade, do tipo de tecnologia e da superfície disponível. No caso dos coletores solares térmicos, o dimensionamento depende das necessidades. Em utilizações como aquecimento e arrefecimento, a área de coletores necessária é maior que num sistema destinado a AQS. No caso dos sistemas fotovoltaicos, em situações urbanas onde é possível vender a totalidade da produção, uma forma de obter o máximo rendimento do sistema será cobrir toda a superfície disponível.

Na tabela seguinte sintetizam-se algumas das principais diferenças entre os SSA correntes no mercado, com implicações na conceção da envolvente.

Tabela 4.4 - Diferenças entre coletores térmicos e módulos fotovoltaicos, adaptado de Probst (2009)

	Coletores térmicos	**Módulos fotovoltaicos**
Circuito solar	Secção das tubagens, vedação água.	Flexibilidade cabos elétricos, secções reduzidas facilmente integráveis.
Forma	Cenário internacional a mudar.	Maior diversidade existente.
Suporte posterior	Isolamento térmico posterior para evitar perdas de calor (coletores planos).	Células requerem ventilação posterior para eficiência otimizada.
Permeabilidade à luz	Tubos de vácuo, através do seu distanciamento. Coletores perfurados em desenvolvimento.	Várias possibilidades (afastamento das células, células perfuradas, células translúcidas, módulos semitransparentes).
Sobreprodução	Possibilidade de estagnação. O dimensionamento depende das necessidades.	Em cenário de ligação à rede, o problema é desconsiderado. O dimensionamento depende de outros fatores.
Influência de sombras	Perdas proporcionais à dimensão da sombra.	Produção de eletricidade fortemente influenciada pelo sombreamento com riscos de dano do sistema.
Isolamento térmico	Coletores planos possuem isolamento e podem contribuir para o isolamento do edifício.	Melhor desempenho se os sistemas forem ventilados.

4.3 CRITÉRIOS PARA A INTEGRAÇÃO "VITRUVIANA"

Os SSA ao serem integrados na envolvente devem cumprir os requisitos inerentes aos produtos de construção, balizados através dos "Requisitos básicos das obras de construção", de acordo com o regulamento europeu dos produtos de construção (Regulamento UE N.º 305/2011):

- Resistência mecânica e estabilidade;
- Segurança contra incêndio;
- Higiene, saúde e ambiente;
- Segurança e acessibilidade na utilização;
- Proteção contra o ruído;
- Economia de energia e isolamento térmico;
- Utilização sustentável dos recursos naturais.

Apesar dos SSA ainda não possuírem, de uma forma generalizada e acessível, informação comparável à tipicamente disponibilizada pelos materiais de construção correntes, este é um cenário em mudança, sobretudo em relação aos sistemas fotovoltaicos. Na norma "EN 50583 Photovoltaics in buidings" (CENELEC, 2014b, a), os sistemas BIPV são balizados através dos regulamentos a ter em conta em função do tipo de módulos (vítreos e não vítreos), da solução construtiva e dos "Requisitos básicos das obras de construção" (Regulamento UE N.º 305/2011). Alguns fabricantes já fornecem informação relativa a aspetos pertinentes, como o desempenho acústico, e verifica-se uma crescente atividade de investigação em termos da caracterização dos produtos em função das propriedades relevantes para a integração (como a capacidade resistente dos módulos e as propriedades térmicas, óticas e acústicas).

Para além dos requisitos como produtos da construção (BIPV e BIST), os SSA ao integrarem a envolvente devem também cumprir os requisitos a que essa parte do conjunto construído está sujeita. Neste aspeto, os requisitos dependem da solução construtiva e do papel que os sistemas desempenham. No contexto da norma "EN 50583-1 Photovoltaic in buildings" (CENELEC, 2014a), as funções do edifício para as quais os sistemas fotovoltaicos podem contribuir (e por analogia, os sistemas solares térmicos) são uma ou mais, das seguintes:

- Rigidez mecânica ou integridade estrutural;
- Proteção climática primária (chuva, neve, vento, granizo);
- Redução do consumo de energia (através de medidas como sombreamento, iluminação natural, isolamento térmico);
- Proteção contra incêndio;
- Proteção contra o ruído;
- Separação entre o ambiente interior e exterior;
- Segurança e abrigo.

Estas funções são essencialmente idênticas aos "Requisitos básicos das obras de construção", embora seja atribuído maior ênfase ao desempenho primário da envolvente – o de proteção e abrigo às condições climáticas e ambiente exterior, designadamente através dos pontos "Proteção climática" e "Separação entre o ambiente interior e exterior". Neste sentido, a legislação italiana, através do "Guida alle applicazioni innovative finalizzate all'integrazione architettonica del fotovoltaico" (GSE Gestore

dei Servizi Energetici, 2012) refere que os módulos fotovoltaicos "não convencionais" ou a superfície fotovoltaica, juntamente com o sistema de montagem (no caso de "componente especial")[9] são considerados integrados quando substituem elementos construtivos tradicionais e garantam, para além da produção energética, as seguintes funções essenciais da envolvente:

- A estanquidade à água e a impermeabilização da estrutura edificada;
- Propriedades mecânicas comparáveis aos elementos construtivos que substituem;
- Uma resistência térmica que não comprometa o desempenho do edifício.

De salientar que na norma "EN 50583-1 Photovoltaic in buildings" (CENELEC, 2014a) é indicado que as propriedades eletrotécnicas inerentes aos fotovoltaicos, tais como função de antena, geração de energia, ou proteção eletromagnética, entre outras, não qualificam, isoladamente, os fotovoltaicos como integrados em edifícios pelas funções intrínsecas aos sistemas que lhe adicionam.

Deste modo, pela influência que alguns SSA podem estabelecer no contexto do edifício, destacam-se os requisitos e critérios específicos a considerar na integração "vitruviana", partindo dos "Requisitos básicos das obras de construção", sendo indicado quando existem definições regulamentares. Nesse sentido, definem-se as seguintes categorias de integração, baseadas nos princípios de Vitrúvio:

- Energética;
- Multifuncional;
- Construtiva (suporte, controlo e distribuição);
- Formal.

Pela especificidade funcional dos SSA como componentes geradores de energia, opta-se por uma categoria independente à integração funcional para a definição dos parâmetros energéticos de integração[10]. A integração de SSA relaciona-se assim com os "Requisitos básicos das obras de construção", nos aspetos de integração energética (produção de energia, redução do consumo de energia), integração funcional (acessibilidade na utilização), e construtiva, designadamente nos aspetos de suporte (resistência mecânica e estabilidade) e controlo (proteção climática e separação entre o ambiente interior e exterior, proteção contra incêndio, proteção contra o ruído, segurança, e higiene e saúde). A integração "vitruviana" não abrange alguns dos "Requisitos básicos das obras de construção", tais como a "Higiene, saúde e ambiente" nas questões relativas ao "ambiente", e a "utilização sustentável dos recursos naturais". No entanto, estas questões também fazem parte da "sustentabilidade das obras de construção" e serão abordadas no Capítulo seguinte. Por outro lado, a integração "vitruviana" abrange as questões formais que normalmente são desconsideradas como requisitos básicos de desempenho (Figura 4.2).

[9] A legislação italiana considera como módulo fotovoltaico "não convencional" os módulos flexíveis, as telhas fotovoltaicas e os módulos semitransparentes para fachada, e como "componente especial" os módulos fotovoltaicos sem caixilho aplicados sobre uma estrutura de suporte, como a aplicação em fachada ventilada.

[10] Na integração energética, exclui-se as questões técnicas específicas relativas aos parâmetros elétricos no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos (ligações em série e paralelo, otimização do inversor, eficiência elétrica de todo o conjunto BOS, entre outros aspetos) e de otimização da produção nos sistemas térmicos, uma vez que dizem respeito a especialidades específicas e tratarem-se de questões independentes de uma solução integrada ou adicionada à envolvente.

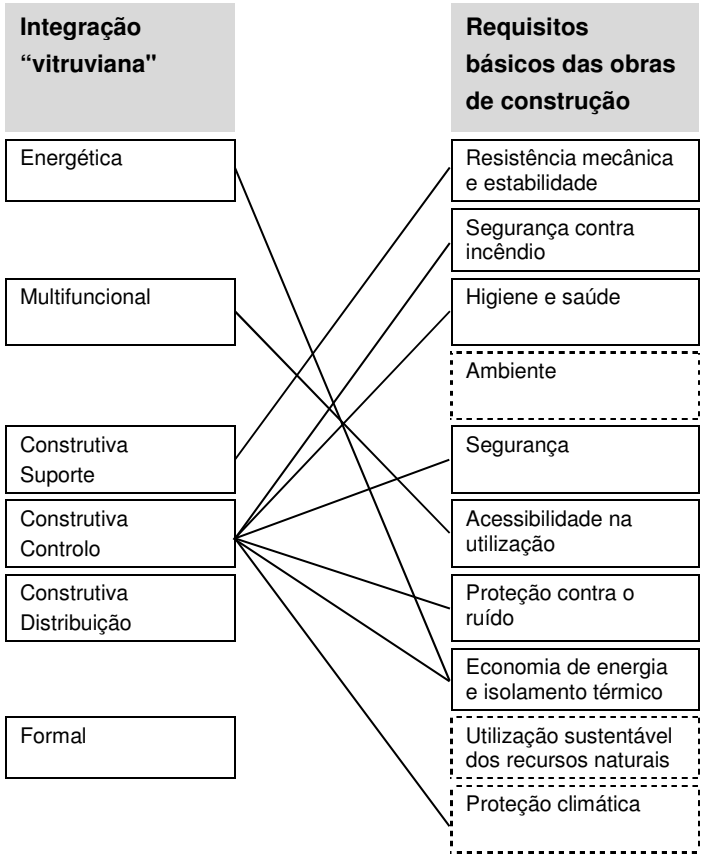


Figura 4.2 - Relação entre os aspetos de integração "vitruviana" e os requisitos básicos da construção (de acordo com a diretiva dos produtos de construção)

4.4 INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

As questões energéticas devem constituir uma condicionante inicial de projeto de forma a obter um elevado grau de eficiência. No entanto, os edifícios são frequentemente projetados subestimando essa condicionante, sendo o desempenho energético verificado numa fase posterior e prescritas instalações que colmatam as eventuais necessidades. Isto significa que aspetos do edifício como a orientação, a volumetria, a relação entre envidraçados e a zona opaca, a organização interior, entre outros, são desconsiderados na sua relação com o sítio em termos de benefício energético. A componente energética surge, neste cenário, como uma consultadoria posterior que repara e torna possíveis opções de projeto tomadas previamente. Recorrendo à distinção de Reyner Banham (1969) entre "soluções operadas por energia" e "soluções estruturais", esta atitude enquadra-se na primeira, que consiste nas soluções que tendem a utilizar mais energia e a adicionar mais uma camada para resolver cada problema que surge na conceção do edifício. Por outro lado, as "soluções estruturais" fundem as questões de energia com os aspetos construtivos e com as intenções arquitetónicas. São designadas de estruturais porque a forma do edifício e a sua construção induzem o desempenho energético eficiente. A apreensão desta diferença é fundamental na conceção contemporânea sustentável.

Devido às metas regulamentares de eficiência energética e ao seu progressivo aumento de severidade, os edifícios tenderão idealmente a ser novamente concebidos considerando, de forma intrínseca, aspetos locais (o sítio e o clima), o que promoverá a utilização dos componentes solares nos locais do

edifício onde faça sentido energético, funcional e formal. Através da conceção arquitetónica podem-se chegar a formas que procuram potenciar a captação de radiação solar por parte dos SSA, em consonância com outras estratégias bioclimáticas e arquitetónicas. Bonomo (2012) utiliza o termo "tecnomorfo" para definir a expressão morfogenética de aspetos significativos da integração de sistemas fotovoltaicos na forma construída (Figura 4.3 e Figura 4.4). Ou seja, os SSA podem contribuir para a génese da forma através de síntese de alguns parâmetros de integração, designadamente: orientação e inclinação otimizada dos sistemas; evitar o seu sombreamento; evitar acumulação de sujidade; prever o controlo da temperatura (nos sistemas fotovoltaicos); e potenciar a radiação incidente nos sistemas.



Figura 4.3 – Módulos fotovoltaicos integrados na fachada inclinada do Albergue Monte Rosa, em Zermatt, na Suiça (à esquerda), e cobertura inclinada que compatibiliza módulos fotovoltaicos, coletores térmicos e iluminação natural na casa Sunlight, em Pressbaum, na Áustria (à direita)

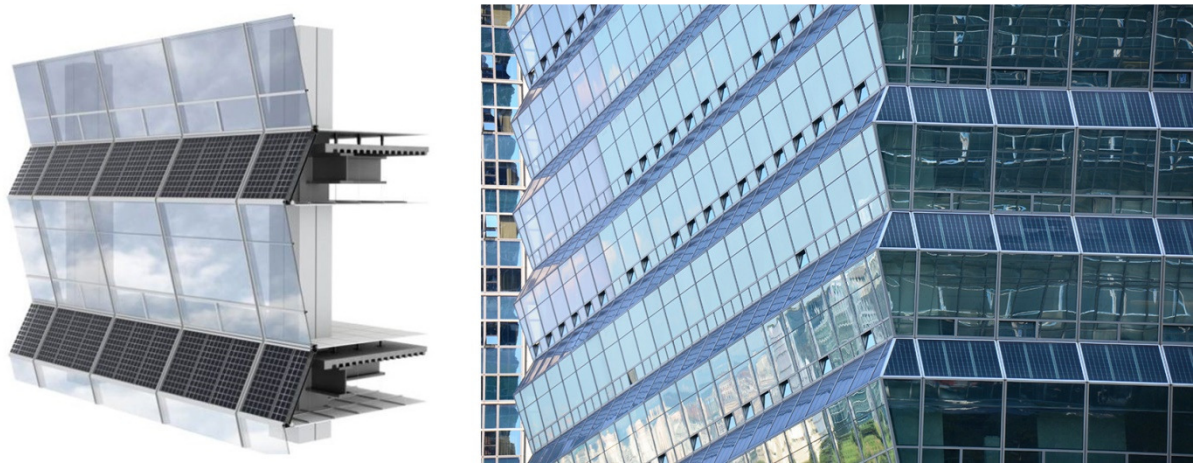


Figura 4.4 – Pormenor da integração de módulos fotovoltaicos na fachada cortina do edifício da Federação das Indústrias Coreanas, em Seul, na Coreia do Sul

Por outro lado, as condições físicas para a integração dos sistemas solares ativos na envolvente de um edifício, na maioria das situações, não são as ideais para o desempenho otimizado destes sistemas. No entanto, a aplicação ideal em termos de produção energética não é um princípio limitador. Como exemplo, no caso da integração de sistemas fotovoltaicos numa cobertura plana, apesar da superfície

coletora possuir um ângulo de inclinação reduzido (horizontal), ou seja, possuir uma menor incidência da radiação solar em relação à inclinação ótima, permite um melhor aproveitamento da superfície disponível, independentemente da orientação do edifício, alcançando uma maior potência (Wp por m^2) em relação aos sistemas adicionados com inclinação otimizada, que necessitam de espaço entre si. No entanto, a capacidade de autolimpeza é menor, comparativamente a uma cobertura inclinada, sendo necessária uma limpeza regular, devido à maior tendência para a acumulação de sujidade.

Considerando outro exemplo, Matuska e Sourek (2006) verificaram que a utilização de coletores térmicos planos em fachada (90°), apesar de requerer mais área do que numa cobertura inclinada (45°) para um desempenho energético idêntico, possui vantagens, tais como a redução dos períodos de estagnação e dos ganhos de energia sem utilização, a manutenção de uma temperatura de funcionamento do sistema mais constante ao longo do ano, e a aproximação da curva da temperatura à curva das necessidades de AQS (Figura 4.5). Neste tipo de aplicação, o desempenho térmico da envolvente não é prejudicado se o isolamento for salvaguardado, sendo até possível melhorá-lo ligeiramente em situação de inverno.

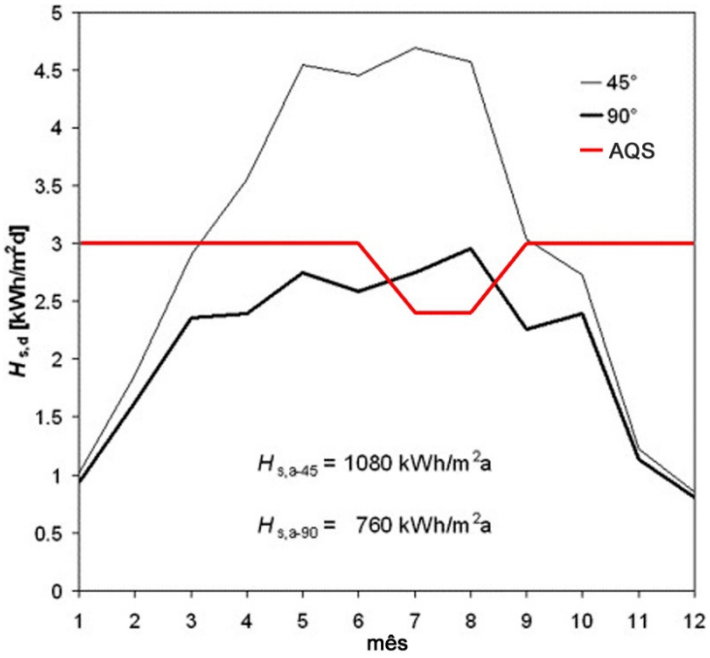


Figura 4.5 – Radiação solar anual em cobertura (45°) e fachada (90°) e as necessidades de AQS (Matuska e Sourek, 2006)

Salienta-se também que é possível conciliar estratégias bioclimáticas em determinadas aplicações integradas dos SSA, interferindo de forma expressiva no desempenho energético do edifício, potenciando a redução das necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial (podendo influenciar positivamente o cumprimento dos requisitos de "Economia de energia e isolamento térmico"). Tal verifica-se no caso da recuperação de calor em soluções híbridas PV/T (como no caso de fachada ventilada ou de duplo pano de vidro, com aproveitamento do calor gerado), ou em soluções envidraçadas como fachadas cortina, fachadas de duplo pano de vidro, ou coberturas envidraçadas, como grandes claraboias, onde são utilizados sistemas solares ativos semitransparentes que influenciam a iluminação natural e os ganhos solares. A Figura 4.6 ilustra as implicações da

adoção de BIPV semitransparentes em climas tropicais, onde os ganhos de calor e as necessidades de arrefecimento são questões críticas no desempenho energético de um edifício.

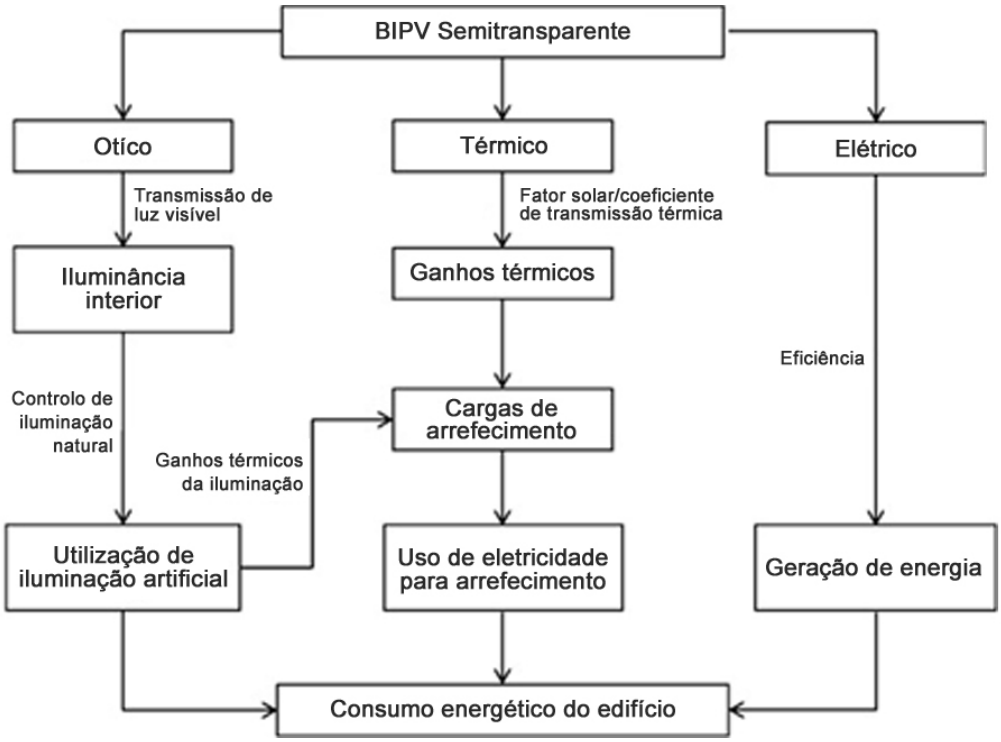


Figura 4.6 – Efeito no consumo de energia da integração de sistemas fotovoltaicos semitransparentes em edifícios tropicais (Ng, Mithraratne e Kua, 2013)

Deste modo, ao integrar os SSA na envolvente deve-se ter em conta as propriedades térmicas e as qualidades físicas, como a transparência, de modo a permitir a iluminação natural, ganhos solares ou controlo solar (que dependem das condições climáticas locais e dos níveis de conforto a atingir). Para determinar a influência dos SSA nos ganhos solares e no comportamento térmico é importante o conhecimento de algumas características específicas dos sistemas. No entanto, tal como referido anteriormente, muitos destas características não são ainda conhecidas, a normalização está em curso, e apenas alguns fabricantes fornecem informação sobre propriedades térmicas e visuais dos módulos BIPV, tais como: coeficiente de transmissão térmica (U-value); fator solar (g-value); ou a transmissão luminosa. No entanto, vários autores demonstram que os módulos fotovoltaicos semitransparentes podem contribuir positivamente para o balanço energético. Fung e Yang (2008) estudaram os afastamentos das células cristalinas em módulos BIPV semitransparentes e chegaram à conclusão que essa relação influencia diretamente a quantidade de radiação solar admitida num espaço interior tendo assim impacto nos ganhos solares (quanto maior a área preenchida por células, maior a redução de ganhos solares). Peng et al. (2015) verificaram que as fachadas envidraçadas de pano duplo com fotovoltaicos integrados, neste caso de silício amorfo, permitiam ganhos solares mais baixos, e uma maior produção de energia quando ventiladas, e maior isolamento térmico, quando não ventiladas.

A integração energética passa assim, por uma análise específica de cada caso, de um balanço entre as necessidades e a capacidade de geração de energia, na procura da solução arquitetónica, conciliando as repercussões (positivas e negativas) nas restantes dimensões da integração. Deste modo, são

importantes as condicionantes relativas ao sítio (localização) em termos de radiação solar e sombreamento, assim como os parâmetros de orientação e inclinação que a envolvente, ou que os elementos que compõem a envolvente conformam. A quantidade de energia produzida pode ser estimada e quantificada, e esse valor pode ser comparado para diferentes soluções de fachada e cobertura, em função das necessidades.

Na integração energética, os parâmetros são assim divididos em 3 grandes grupos: a produção de energia; o contributo dos SSA no desempenho energético do edifício; e a conceção da envolvente de forma a potenciar o benefício dos SSA. Este último grupo trata a relação entre projeto solar e a forma do edifício, com clara influência ao nível formal.

Tabela 4.5 – Integração energética

Grupos de integração energética	Parâmetros	Descrição
Produção de energia	Produção energética anual (kWh/a)	Produção total de energia no período de um ano.
	Relação entre a energia gerada e as necessidades (eletricidade, AQS, …)	Otimização do balanço energético.
Contributo para o desempenho energético	Iluminação natural Sombreamento Ganhos solares Isolamento térmico Ventilação Outros	O desempenho depende não só das características dos componentes, mas também da forma como são articulados em projeto. Contributo das soluções que os SSA conformam na redução do consumo energético (tais como recuperação de calor em sistemas híbridos PV/T, ou ganhos solares através recorrendo a sistemas semitransparentes).
Morfogénese	Posicionamento adequado	Quantidade de energia captada em função da orientação e inclinação dos sistemas.
	Sombreamento	Limitar sombreamento pelo próprio edifício, elementos da vizinhança e topografia.
	Sujidade	Limitar a acumulação de sujidade nos SSA.
	Temperatura (sistemas fotovoltaicos)	Prever o controlo de temperatura no desempenho dos fotovoltaicos, sobretudo nos sistemas cristalinos.
	Coeficiente de reflexão - Albedo	Potenciar a radiação incidente nos sistemas.

4.5 INTEGRAÇÃO MULTIFUNCIONAL

A funcionalidade reporta-se ao modo como cada edifício é construído de acordo com as necessidades funcionais e a utilização que lhe é atribuída, ou seja, a adequação a um programa funcional. A integração funcional de SSA na envolvente implica assim que os sistemas potenciem essa

funcionalidade e utilização. Nesse sentido, implica também, por princípio, uma utilização multifuncional dos sistemas solares ativos, ou seja, que estes desempenhem outras funções da envolvente para além da sua função principal, que consiste em gerar energia.

A compatibilidade funcional pode ocorrer a vários níveis, tais como acabamento exterior, proteção climática ou proteção acústica, e os SSA ao desempenharem outras funções podem substituir componentes construtivos tradicionais. Existem vários tipos de integração e diferentes papéis que os SSA podem desempenhar na envolvente. Na tabela seguinte listam-se, de uma forma não exaustiva, as possibilidades funcionais.

Tabela 4.6 – Algumas possibilidades multifuncionais dos SSA na envolvente

Localização e conformação		Cobertura plana ou inclinada e fachada vertical ou inclinada		Elementos exteriores à envolvente - verticais, horizontais ou inclinados
Tipo		Opaca	Envidraçada	Opacos/translúcidos
Térmica		Cobertura fria/quente	Iluminação natural/ganhos diretos	Proteção solar
Coletores térmicos	Não vítreos	Revestimento final Recuperação de calor [(a)]		Sombreamento [(a)]
	Planos vítreos	Revestimento final	Revestimento final Iluminação natural Filtragem de luz Sombreamento	Sombreamento [(a)]
	Tubos de vácuo		Iluminação natural Filtragem de luz Sombreamento	Sombreamento Guarda-corpos
Módulos fotovoltaicos	Cristalinos	Revestimento final	Revestimento final Iluminação natural [(b)] Filtragem de luz [(b)] Sombreamento [(b)]	Sombreamento [(a)]
	Filmes finos	Revestimento final	Revestimento final Iluminação natural [(b)] Filtragem de luz [(b)] Sombreamento [(b)]	Sombreamento [(a)]
	Células orgânicas		Iluminação natural Filtragem de luz	Sombreamento [(a)]
BIPV/T	Módulos	Revestimento final		
	Configuração da envolvente	Recuperação de calor/ventilação [(a)]		

(a) Através da articulação construtiva dos sistemas com a envolvente.

(b) Através do afastamento das células.

Obviamente a Tabela anterior é indicativa e simplifica as interações funcionais que dependem das características específicas de cada sistema e da forma como são articulados na configuração da envolvente. Tal está patente na função de revestimento final, que pode compatibilizar a proteção climática ou o conforto acústico, ou na função de providenciar iluminação natural, que pode ser conseguida através de elementos semitransparentes ou translúcidos, tais como células de filme fino, células cristalinas espaçadas entre si, ou ainda através do espaçamento de células de filme fino (criando um efeito de transparência e translucidez). Do mesmo modo, a proteção solar pode ser efetuada limitando a entrada de luz recorrendo a estas soluções que o tipo de célula permite, mas também através da conformação de soluções arquitetónicas tais como pérgulas, palas, ou *brise-soleil*, recorrendo a módulos e coletores semitransparentes ou opacos. Assim, tal como referido no ponto anterior relativamente à integração energética, nas aplicações em que os SSA conformam soluções de ventilação com recuperação de calor, as possibilidades funcionais dependem não só das características dos componentes, mas também da forma como são articulados em projeto através das soluções construtivas.

Dependendo dos sistemas e das funções que desempenham, estes podem também atribuir vantagens adicionais à envolvente, em relação a determinados materiais de revestimento tradicionais, tais como: redução da frequência de manutenção; menor necessidade de substituição de elementos; ou redução da quantidade de energia embebida.

Deste modo, a multifuncionalidade é avaliada sobretudo de forma indireta através das restantes categorias de integração (energética, construtiva e formal). Como avaliação direta, propõe-se a ponderação do papel a desempenhar pelos SSA, valorizando a interferência positiva no desempenho não energético do edifício e as qualidades que lhe adicionam.

Tabela 4.7 – Integração multifuncional

Parâmetro	Descrição
Contributo para o desempenho não energético	Valorização da interferência dos SSA no desempenho não energético do edifício e das qualidades que lhe adicionam.

Também abrangidos pela funcionalidade estão os critérios de "acessibilidade na utilização" (relativos aos requisitos de "Segurança e acessibilidade na utilização" dos "Requisitos básicos das obras de construção"). No âmbito da acessibilidade avaliam-se as disposições que facilitam o acesso e o uso das instalações, especialmente para pessoas com necessidades especiais (mobilidade condicionada, idosos, crianças). Estes requisitos de acessibilidade universal relacionam-se com questões de aproximação, entrada e movimentação no edifício e acesso aos serviços disponibilizados neste.

A acessibilidade universal relaciona-se com a integração de SSA na envolvente na medida em que devem ser previstos e universalmente operáveis os interruptores e sistemas de controlo relacionados com o funcionamento da envolvente, no caso dos sistemas solares ativos conformarem soluções que se enquadrem nessas operações e sejam passíveis de ser regulados manualmente (tais como sistemas de ventilação, aquecimento ou de proteção solar operáveis). Na legislação portuguesa é possível obter indicações neste sentido, com base no "Regime da acessibilidade aos edifícios e estabelecimentos que recebem público, via pública e edifícios habitacionais" (Decreto-Lei n.º 163/2006), relativas à operabilidade de botões, teclas e outros elementos similares. Na "Secção 4.12 - Comandos e controlos", é estabelecida uma série de regras, descritas na Tabela 4.8, sendo a acessibilidade universal dos sistemas de controlo exemplificada na Figura 4.7.

Tabela 4.8 – Requisitos de acessibilidade na utilização

Requisito	**Descrição**
Acessibilidade a interruptores e sistemas de controlo	Devem ser previstos e universalmente operáveis os interruptores e sistemas de controlo relacionados com o funcionamento da envolvente no caso dos sistemas solares ativos conformarem soluções que se enquadrem nessas operações. Segundo o Regime de acessibilidade aos edifícios (Decreto-Lei n.º 163/2006), os interruptores e sistemas de controlo devem: • Estar situados de modo que exista uma zona livre para operação que satisfaça o especificado na secção "4.1 - Zonas de permanência" do Regime de acessibilidade; • Estar a uma altura, medida entre o nível do piso e o eixo do comando, que satisfaça o especificado na secção "4.2 – Alcance" do Regime de acessibilidade; • Ter uma forma fácil de agarrar com uma mão e que não requeira uma preensão firme ou rodar o pulso; • Poder ser operados sem requerer uma força superior a 22 N; • Ter pelo menos uma das suas dimensões não inferior a 0,02 m. (É salvaguardado que podem existir comandos e controlos que não satisfaçam as regras especificadas, se as características dos equipamentos assim o determinarem, ou se os sistemas elétricos, de comunicações ou outros não forem para uso dos utentes).



Figura 4.7 – A localização do registo de ventilação superior no edifício Solar XXI, por este se situar a uma altura superior a 1,20 m (medida entre o nível do piso e o eixo do comando), de acordo com a secção "4.2 Alcance" (Decreto-Lei n.º 163/2006), seria considerado uma não conformidade (contudo não o é, pois o sistema é operável através de uma vareta).

4.6 INTEGRAÇÃO CONSTRUTIVA

A integração construtiva diz respeito à compatibilidade construtiva entre os SSA e os restantes componentes que compõem a envolvente. Está associada ao cumprimento dos "Requisitos básicos das obras de construção", subdividindo-se nos aspetos de suporte (resistência mecânica e estabilidade), controlo (proteção climática, segurança contra incêndio, higiene e saúde, segurança, e proteção contra o ruído) e distribuição. Previamente à abordagem a estes requisitos define-se o grau de integração, em função da integração construtiva.

4.6.1 GRAU DE INTEGRAÇÃO

O grau de integração construtiva dos SSA na envolvente é um conceito cuja definição diverge entre vários autores. Hegger et al. (2008) e Weller et al. (2010) definiram três possibilidades: segregação, incorporação e amálgama[11] (Figura 4.8 e Figura 4.9).

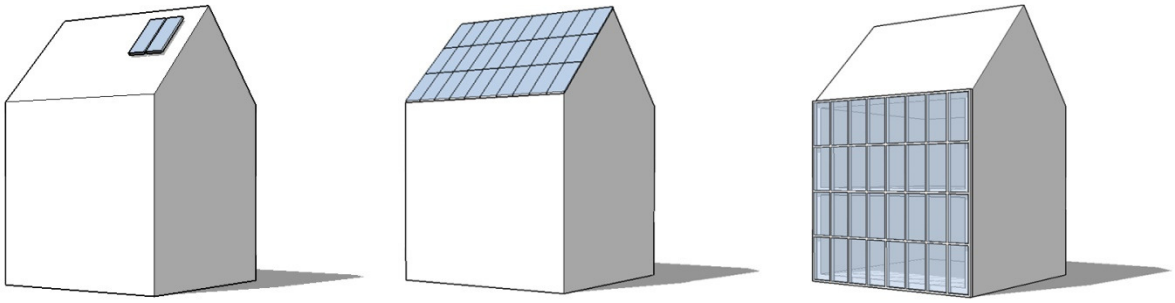


Figura 4.8 – Segregação, incorporação e amálgama.



Figura 4.9 – Da esquerda para a direita: coletor plano adicionado à cobertura - segregação; coletor plano incorporado na fachada - incorporação (Hegger et al., 2008); e fachada cortina preenchida por módulos fotovoltaicos cristalinos vidro/vidro – amálgama

A segregação consiste na sobreposição do sistema solar ao edifício limitando-o à sua função primária, captar e converter a energia solar. A incorporação consiste na utilização dos SSA como alternativa a outros componentes da construção, ou seja, os SSA estão integrados construtivamente na envolvente, desempenhando funções adicionais à geração de energia, e formalmente fazem parte do desenho do edifício através da sua modulação, proporção, cor, entre outros aspetos (como na utilização de módulos fotovoltaicos como revestimento final de uma cobertura inclinada, composta por várias

[11] Weller et al. (2010) utilizam os termos "adição, substituição e integração", todavia são conceptualmente correspondentes aos termos "segregação, incorporação e amálgama", na definição das relações construtivas.

camadas – estrutura, isolamento, acabamento interior). A amálgama consiste na situação em que os SSA constituem a própria envolvente, ou seja, construtiva e formalmente a envolvente do edifício é definida pelos sistemas numa camada (como no caso da utilização de módulos fotovoltaicos vidro/vidro numa fachada cortina).

Bonomo (2012) refere que estas três estratégias são válidas, todas elas podem atingir níveis de qualidade altos ou baixos. No entanto, este autor define a integração sob uma perspetiva diversa. Considera como integração total a situação em que os sistemas fotovoltaicos fazem parte de elementos pré-fabricados que, apesar de associados a outros componentes, constituem um sistema de fachada ou cobertura total. E considera como sistemas adicionados as aplicações que não fazem parte da composição da envolvente, tais como sistemas de sombreamento (palas, *brise-soleil*) ou complementares, como revestimentos finais (telhas fotovoltaicas ou revestimento de fachadas ventiladas). Nesse sentido, apresenta a seguinte divisão para os sistemas adicionados: independentes - quando são adicionados aos edifícios pré-concebido; sobrepostos – quando adicionados, mas seguindo a geometria compositiva do volume arquitetónico; e integração complementar - quando constituem a última camada, como numa situação de revestimento (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Sistemas independentes, sistemas sobrepostos e sistemas complementares, segundo (Bonomo, 2012)

Confrontando a regulamentação com este contexto concetual diverso, a norma "EN 50583-1 Photovoltaic in buildings" (CENELEC, 2014a), define que os módulos fotovoltaicos são considerados integrados quando constituem um produto de construção e providenciam uma função de acordo com a diretiva dos produtos de construção, ou seja, quando constituem um pré-requisito para a integridade funcional do construído, devendo ser substituídos por um produto de construção apropriado no caso da sua desmontagem. No entanto, na mesma norma também são considerados como componentes BIPV os módulos fotovoltaicos acoplados a materiais tradicionais, como revestimentos metálicos ou telas de impermeabilização (ressalvando que a desmontagem destes módulos acoplados "estruturalmente ligados" deve incluir a desmontagem do produto adjacente para se enquadrarem nesta definição). No entanto, nos revestimentos tradicionais modificados com a inserção de células fotovoltaicas (de pequena dimensão, como telhas cerâmicas e ardósias, ou de grande dimensão como revestimentos metálicos ou telas de impermeabilização), como o revestimento tradicional serve de suporte ao sistema solar, o funcionamento da cobertura mantem-se idêntico ao proporcionado pelo revestimento tradicional (apesar de, em alguns casos, os SSA poderem modificar o desempenho do seu substrato). Ou seja, estas aplicações garantem a manutenção da solução construtiva (à qual as células são acopladas) no que respeita ao tipo de fixações e à sua modularidade. No entanto, anulam o contributo funcional por parte dos sistemas fotovoltaicos para além das suas funções intrínsecas (geração de energia, função de antena ou proteção eletromagnética) que, segundo a norma, não devem ser consideradas como funções adicionais, gerando assim um contrassenso. A sua aplicação também não

se traduz num resultado formal idêntico à restante cobertura ou fachada, pois o revestimento tradicional serve de substrato, tornando-se impercetível na leitura visual da cobertura ou fachada (Figura 4.11). Este tipo de solução apenas garante uma continuidade da coordenação modular e do modo de aplicação do material de suporte.



Figura 4.11 – Telhas cerâmicas com células fotovoltaicas acopladas, apesar de garantir a coordenação modular e manter o método construtivo da cobertura, o resultado não possui continuidade formal (Eldridge, 2013)

São assim percetíveis as variações e contradições conceptuais na definição da integração. Do ponto de vista do objetivo que se persegue, e de forma a clarificar e adaptar operativamente os conceitos à metodologia a elaborar, considera-se a incorporação e a amálgama como diversos graus de complexidade da integração. Esta opção justifica-se no sentido em que a integração de um sistema solar ativo ao edifício envolve sempre um processo de adequação. Como exemplo, apesar dos SSA constituírem a envolvente numa situação de amálgama, de acordo com Hegger et al. (2008) e Weller et al. (2010), como no caso de uma fachada cortina preenchida com módulos fotovoltaicos semitransparentes, estes inserem-se num sistema que ultrapassa o produto em si e que se adequa a um produto de construção que responde às exigências e requisitos da envolvente, neste caso através de um conjunto envidraçado complexo (composto por vidro duplo ou triplo e cujas características são específicas para o desempenho da envolvente, ou seja, diferentes dos vidros utilizados nos módulos standard). Por outro lado, um SSA utilizado numa estrutura exterior à envolvente, como numa pala de forma a proteger um vão da radiação solar, e integrado no desenho do edifício, apesar de, segundo Bonomo (2012), construtivamente constituir uma situação de "adição", é integrado do ponto de vista funcional e formal (Figura 2.41 a Figura 2.46). Ou seja, o aspeto construtivo não pode ser dissociado das restantes categorias de integração ou do contributo para o desempenho, como classifica Bonomo (2012), nem os produtos acoplados considerados BIPV, sem atribuírem um real contributo funcional.

Face ao exposto, propõe-se a definição do grau de integração a partir do papel que os SSA desempenham construtivamente e do modo como esse papel interfere no desempenho do edifício. A adição (tal como a segregação), equivale ao grau zero da integração, pois consiste na sobreposição do sistema solar ao edifício limitando-o à sua função primária - captar e converter a energia solar. Frequentemente esta atitude não é arquitetonicamente satisfatória em termos construtivos e formais. Construtivamente o sistema solar é independente da envolvente, constituindo apenas uma carga

adicional, e formalmente não se relaciona com o edifício. Este tipo de utilização é a mais frequente, quer nos sistemas fotovoltaicos, quer nos sistemas solares térmicos, sobretudo nas instalações em coberturas de edifícios existentes. É tida como uma solução de custo reduzido, no entanto, neste tipo de aplicação é necessária uma estrutura de suporte adicional à composição da cobertura (sistemas de lastro e/ou estruturas de fixação com recurso a perfis metálicos em coberturas planas, e perfis metálicos e fixações compostas de ganchos, telhas especiais e outros acessórios em coberturas inclinadas), para além de que parte dos componentes do sistema fica exposta. Numa cobertura plana, apesar da liberdade para orientar os coletores/módulos de uma forma otimizada, se não existirem outros constrangimentos, as fixações e a impermeabilização da cobertura são aspetos sensíveis - é necessário ter em conta os esforços de tração resultantes da ação do vento, para além dos afastamentos entre filas de coletores/módulos requererem algum espaço disponível de modo a evitar o próprio sombreamento. Este tipo de aplicação também impede a manutenção da cobertura de uma forma facilitada. Em termos formais, as soluções de adição correspondem frequentemente a um "corpo estranho" dissonante da linguagem arquitetónica do edifício, e economicamente a adição corresponde sempre a um suplemento de custo em relação à envolvente.

No que concerne à integração, esta contempla uma maior abrangência de situações, uma vez que possibilita graus de complexidade e de incorporação diversos. Os SSA podem substituir outros componentes da envolvente, assim como constituir a própria envolvente, pontualmente ou preenchendo integralmente uma ou mais superfícies da fachada e/ou cobertura. Nesta última situação, os SSA desempenham um papel estruturante na configuração da envolvente que pode ser essencial na definição formal do edifício. Ao serem concebidos integrados, os sistemas solares podem desempenhar funções adicionais, como proteção climática, revestimento final, isolamento térmico, sombreamento, ou filtragem de luz, e conferem características formais através da sua materialidade. Por oposição a um sistema adicionado, salienta-se a possibilidade de redução de constrangimentos no que se refere ao peso, à necessidade de estruturas de montagem adicionais e à mão de obra.

Tabela 4.9 – Grau de integração

Parâmetro	Descrição
Grau de integração	Os SSA como pré-requisito para a integridade funcional da envolvente (para além das funções intrínsecas aos sistemas): • Adição – sobreposição dos SSA ao edifício; • Acoplagem - uma função da envolvente é duplicada pelos SSA ou os SSA não possuem um contributo funcional real (como no caso de uma telha tradicional com células fotovoltaicas acopladas); • Integração – os SSA são um pré-requisito para a integridade funcional da envolvente.

4.6.2 SUPORTE

Em termos de suporte devem ser tomadas precauções gerais a nível construtivo relativas à capacidade de resistir, transferir e acomodar todas as ações estruturais impostas aos sistemas solares ativos como parte da envolvente (resistência mecânica e estabilidade). As ações dos coletores/módulos, em função das soluções que conformam, devem ser transmitidas de forma correta à estrutura do edifício através de estruturas de montagem e fixações apropriadas, de acordo com os respetivos Eurocódigos estruturais.

Os SSA, enquanto produtos de construção, devem satisfazer os respetivos requisitos de resistência mecânica e estabilidade e serem escolhidos em função das suas características e tipo de aplicação. No caso dos módulos vítreos, a escolha do tipo de vidro (e das soluções construtivas) nas aplicações em fachada e cobertura deve ser efetuada de acordo com os requisitos da envolvente. Nesse sentido, a normalização BIPV (CENELEC, 2014a) distingue os módulos que possuem pelo menos uma camada de vidro dos que não possuem vidro (como produtos BIPV com base em telas de impermeabilização polímeras, folhas metálicas e outros materiais), classificando-os em diferentes categorias, que dependem do tipo de instalação em função da solução construtiva (integração/acesso/inclinação), listando as referências normativas relevantes para cada categoria, de modo a evitar a queda e o estilhaçamento de vidro.

Deste modo, em termos de suporte, devem ser verificadas as fixações e estruturas de suporte dos SSA, assim como a conformação material dos sistemas, em função dos requisitos de resistência mecânica e estabilidade (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Integração construtiva – suporte (resistência mecânica e estabilidade)

Requisitos	Descrição
Fixações, estruturas de suporte e elementos de correlação	A pormenorização das fixações e juntas deve ser compatível com as expansões dos sistemas e de outros materiais da envolvente. Os materiais da envolvente em contacto com os sistemas solares ativos devem suportar as suas temperaturas de funcionamento.
Adequação das camadas dos SSA em termos de resistência	A escolha do tipo de SSA é adequada aos requisitos da envolvente em termos de resistência (como as características do tipo de vidro em módulos vítreos).

4.6.3 CONTROLO

Em termos de controlo devem ser tomadas precauções a nível construtivo que tenham em atenção aspetos gerais e específicos da tecnologia solar em relação aos requisitos de "proteção climática", "segurança contra incêndio", "higiene e saúde", "segurança", e "proteção contra o ruído".

4.6.3.1 Proteção climática

Os coletores/módulos devem suportar o desgaste climático, nomeadamente chuva, vento, neve e radiação solar. As soluções de fachada e cobertura devem ser projetadas e dimensionadas para a zona climática correspondente.

Tabela 4.11 – Proteção climática

Parâmetro	Descrição
Proteção climática	Os coletores/módulos devem suportar o desgaste climático, nomeadamente chuva, vento, neve e radiação solar. As soluções de fachada e cobertura, incluindo fixações e juntas, devem ser projetadas e dimensionadas para a zona climática correspondente (ligação à integração construtiva – suporte, e à integração multifuncional, no contributo para o desempenho não energético).

4.6.3.2 Segurança contra incêndio

Os SSA, enquanto produtos de construção, devem cumprir o regulamento respetivo. Relativamente à sua integração na envolvente de edifícios, deve ser realizada de modo que, em caso de incêndio, as soluções construtivas garantam o abandono dos ocupantes do edifício em segurança, a limitação da deflagração e propagação do incêndio, assim como a segurança das equipas de socorro. Nesse sentido, a integração de SSA deve cumprir o regulamento de segurança contra incêndio em edifícios (Decreto-Lei n.º 220/2008), valorizando-se práticas e soluções acima dos requisitos mínimos. Todavia, existem especificidades inerentes aos SSA que devem ser tidas em conta, designadamente nas questões de propagação e na segurança da equipa de intervenção.

Para garantir a segurança das pessoas e da equipa de intervenção, os bombeiros e companhias de seguro têm recomendado uma clara identificação dos sistemas fotovoltaicos existentes numa edificação, através de sinalética informativa, possibilitando que se tomem as medidas necessárias durante um combate ao incêndio. Nas instalações em cobertura, deve ser garantido espaço de manobra, através de faixas de 30 a 50cm de largura (Certiel, 2012). A penetração da envolvente pelas condutas (cablagens ou tubagens) e das estruturas dos sistemas fotovoltaicos externas à edificação, deve ser efetuada com espaços vedados contra a propagação do fogo.

Tabela 4.12 – Segurança contra incêndio

Requisitos	**Orientações de projeto**
Propagação	Não instalar módulos fotovoltaicos próximo de locais perigosos ou potenciais fontes de gases ou outras substâncias inflamáveis (manter distância a pontos de extração).
	Penetrações externas vedadas contra a propagação.
Segurança da equipa de intervenção	Sinalização de sistemas fotovoltaicos (BIPV).
	Garantir espaço de manobra na cobertura (faixas de 30 a 50cm).

4.6.3.3 Higiene e saúde

Esta categoria abarca os requisitos de higiene e saúde dos trabalhadores, ocupantes e vizinhos, em todo o ciclo de vida do edifício. Neste contexto, as questões de qualidade do ar/ventilação, iluminação natural e da humidade em partes ou superfícies da obra de construção podem ser influenciadas por determinadas aplicações de SSA na envolvente.

Como referido anteriormente, os SSA podem contribuir para o esquema de ventilação, através de coletores de ar ou de soluções híbridas de ventilação a partir de soluções construtivas como fachadas ventiladas ou fachadas duplas de vidro. Relativamente à iluminação natural, o facto de alguns produtos SSA serem translúcidos ou semitransparentes permite a iluminação natural, assim como o controlo solar, evitando o encandeamento. Esta função é possível nos fotovoltaicos de filme fino e nos cristalinos (podendo o padrão de sombra dos módulos cristalinos não ser adequado em determinadas situações devido ao elevado contraste que originam em dias de sol). Relativamente à prevenção de humidade, deve ser tida em conta a transferência de vapor na utilização de SSA na envolvente de modo a evitar condensações internas e permitir a secagem da parede. Nesse sentido, as fixações devem evitar pontes térmicas e o coeficiente de transmissão térmica global não deve ser afetado negativamente. O caso com interferência mais direta será em utilizações em que os SSA constituem

vãos translúcidos ou semitransparentes, em soluções como fachada cortina ou coberturas de vidro, nas quais a temperatura radiante das superfícies influencia diretamente a temperatura interior (outras situações, como no caso de uma fachada ventilada, o seu contributo na temperatura da superfície interior é desconsiderado). Neste tipo de conformações, a utilização de sistemas fotovoltaicos pode ser vantajosa na medida em que conforma vãos envidraçados com uma temperatura superficial alta, contribuindo para uma baixa assimetria da temperatura radiante.

Tabela 4.13 – Higiene e saúde

	Parâmetros	**Descrição**
Qualidade do ar/ventilação	Contributo dos SSA para o esquema de ventilação	Contributo dos SSA para o esquema de ventilação, através de coletores de ar ou de soluções híbridas de ventilação (relaciona-se com integração energética).
Conforto visual	Iluminação natural Filtragem de luz/Proteção solar	As características dos SSA influenciam o tipo de iluminação e padrão de sombra que deve ser adequado ao contexto de utilização funcional dos compartimentos, contraste sombra/luz em afastamento de células cristalinas, difusa em filmes finos, etc.
Térmica	Contributo para a temperatura radiante das superfícies	Contributo para a redução da assimetria da temperatura radiante (relaciona-se com integração energética).

Do ponto de vista da integração de SSA, os parâmetros relativos à "Higiene e Saúde" relacionam-se com a integração energética, nomeadamente no "Contributo para o desempenho energético", pelo que serão considerados nesse parâmetro de integração.

4.6.3.4 Segurança

As soluções construtivas devem ser concebidas de modo a não representarem riscos inaceitáveis de acidentes ou danos durante sua a utilização e funcionamento, tais como escorregamento, queimadura, eletrocussão e lesões provocadas por explosão ou roubo.

Destaca-se o perigo de queimadura e choque no contacto com as superfícies dos sistemas elétricos. Nesse sentido, devem ser consideradas medidas de segurança de forma a evitar queimaduras ou choque nos sistemas ao alcance dos utilizadores (instalações em piso térreos, em janelas, em guarda-corpos), ou outros acidentes em caso de dano ou avaria (quebra e estilhaçamento).

No que respeita à segurança pessoal, destacam-se os aspetos construtivos relacionados com proteção contra intrusão e vandalismo. No caso da utilização de SSA, estes aspetos reportam-se à resistência das superfícies da envolvente ao vandalismo (impacto, fogo, *graffiti*).

Relativamente à segurança às ações acidentais - terramoto, explosão, fogo - e a previsão das suas consequências como o estilhaçamento de vidros, entre outros, a Proteção Civil elaborou uma "Avaliação Nacional de Risco" (PROCIV, 2014), que abrange os riscos associados às ações acidentais (assim como às mudanças climáticas) para o território continental. Estas questões relacionam-se com

aspetos de resistência estrutural tratados no ponto "4.6.2 Suporte" e de resistência ao fogo no ponto "4.6.3.2 Segurança contra incêndio".

Tabela 4.14 – Segurança

Requisitos	**Descrição**
Segurança no contacto	Segurança dos utilizadores ao toque (queimadura, choque).
Segurança pessoal	Resistência ao impacto da envolvente (relaciona-se com resistência mecânica e estabilidade). Resistência ao fogo da envolvente (relaciona-se com segurança contra incêndio). Superfícies resistentes ao *graffiti*.
Resistência às ações acidentais	Prevenir o estilhaçamento de vidro (coletores e módulos com vidros específicos), soluções construtivas que impeçam o contacto.

4.6.3.5 Proteção contra o ruído

Relativamente à proteção contra o ruído, consideram-se como condições acústicas suficientes as que cumpram os requisitos regulamentares exigíveis no RRAE – "Regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios" (Decreto-lei n.º 96/2008) em relação ao isolamento entre o interior e o exterior. Estes requisitos são estabelecidos por tipo de edifício e pela natureza dos espaços interiores, com variações quando a envolvente possui uma percentagem elevada de área envidraçada.

Na integração de SSA, salienta-se a influência da atenuação de som da envolvente, nesse sentido deve ser avaliado o contributo dos SSA para a redução do ruído aéreo do exterior (Tabela 4.15) e privilegiadas as práticas e soluções acima dos requisitos mínimos. Este parâmetro também contribui para a integração multifuncional, nomeadamente no "Contributo para o desempenho não energético", pelo que será considerado nesse parâmetro de integração.

Tabela 4.15 – Proteção acústica

Parâmetro	**Descrição**
Atenuação de ruído aéreo pela envolvente	Contributo dos SSA na atenuação de som pela envolvente (este parâmetro relaciona-se com a integração multifuncional, no contributo para o desempenho não energético).

No caso da utilização de SSA na conformação de envolventes envidraçadas, onde o requisito de atenuação de ruído aéreo pela envolvente é maior, salienta-se que os vidros laminados que incorporam células fotovoltaicas atingem maiores índices de isolamento acústico que os envidraçados duplos correntes, através das mesmas estratégias (Figura 4.12).

Produto	Vidro	Filme	Célula	Filme	Vidro	Peso	Rw (C; Ctr)
Vidro de segurança laminado sem células	4 mm	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	x	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	4 mm	20,2 kg/m²	37 (-1; -4) dB
Vidro de segurança laminado sem células	8 mm	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	x	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	8 mm	39,9 kg/m²	41 (-1; -3) dB
Vidro de segurança laminado sem células	10 mm	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	x	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	10 mm	50,5 kg/m²	42 (-1; -3) dB
Vidro de segurança laminado sem células	12 mm	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	x	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	12 mm	60,3 kg/m²	43 (-1; -3) dB
Vidro de segurança laminado com células	4 mm	PVB BGR 15-Folie	6" poly Zellen	PVB BGR 15-Folie	4 mm	20,51 kg/m²	35 (-1; -2) dB
Vidro de segurança laminado com células	4 mm	PVB BGR 15-Folie	6" poly Zellen	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	4 mm	20,51 kg/m²	37 (0; -2) dB
Vidro de segurança laminado com células	4 mm	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	6" poly Zellen	PVB Sound Control Plus (SC+) 0,76	4 mm	20,64 kg/m²	38 (-1; -3) dB

Figura 4.12 – Desempenho acústico de vidros laminados com e sem células cristalinas (Ertex-Solar, n. d.)

4.6.4 DISTRIBUIÇÃO

Apesar do papel preponderante que os coletores térmicos e os módulos fotovoltaicos poderão ter como elementos da envolvente, também são instalações e, como tal, fazem parte de um sistema que se prolonga no interior do edifício, por vezes ocupando áreas interiores de considerável dimensão. Nesse sentido, devem ser tomadas precauções a nível construtivo que tenham em atenção aspetos específicos da tecnologia solar, como o sistema hidráulico no solar térmico e o elétrico no fotovoltaico (Farkas et al., 2013, Probst, 2009), designadamente:

- Nos coletores térmicos devem ser estudadas as diferenças de pressão da água do circuito hidráulico, a diferentes alturas da fachada;
- Devem ser tomadas medidas para evitar estragos resultantes de fugas de água;
- Os caminhos de cabos/tubagens e componentes BOS devem ser localizados e integrados de modo a permitir o fácil acesso;
- Os cabos elétricos dos sistemas fotovoltaicos devem evitar o choque e curto-circuito e devem ser tomadas medidas para evitar risco de incêndio;
- Impermeabilização das furações e durabilidade das selagens dos caminhos de cabos e tubagens.

Relativamente às questões construtivas, salienta-se a necessidade da acessibilidade aos componentes "BOS" situados na envolvente, e dos caminhos de cabos e tubagens não colocarem em causa o desempenho da envolvente. Nesse sentido, a Tabela 4.16 reúne os parâmetros a avaliar na integração construtiva dos aspetos de distribuição.

Os componentes "BOS" a prever na envolvente encontram-se descritos na Tabela 4.17. Salienta-se que a envolvente do edifício ao ser constituída por várias camadas na resolução dos requisitos entre o ambiente interior e o ambiente exterior (como no caso das fachadas ventiladas ou das fachadas duplas), permite uma gradação desses ambientes ao longo da sua espessura, e também a possibilidade de albergar os caminhos de tubagens e/ou cablagens dos sistemas, assim como outros componentes complementares.

Tabela 4.16 – Integração construtiva - distribuição

Parâmetros	**Descrição**
Interferência nos requisitos de desempenho	A distribuição de energia (circuito solar) e as partes complementares (inversor, cabos, conexões, diodos, dispositivos de segurança), assim como furos e aberturas, não devem interferir nos requisitos de desempenho da envolvente (pontes térmicas, propagação incêndio).
Acessibilidade	O acesso aos geradores (módulos e coletores), ao percurso de distribuição de energia (circuito solar) e às partes complementares (inversor, cabos, conexões, diodos, dispositivos de segurança) deve ser facilitado de forma a possibilitar as operações correntes de manutenção e substituição.

Tabela 4.17 – Componentes dos sistemas fotovoltaicos e térmicos, adaptado parcialmente de Bonomo (2012)

Componentes			**Função**
Sistemas fotovoltaicos	Elementos principais	Gerador	Conversão de energia solar em energia elétrica.
		Inversor	Conversão da corrente contínua em corrente alterna.
		Bateria	No caso da necessidade de armazenamento de energia em sistemas isolados.
	Elementos complementares	Cabos e caminhos de cabos	Transporte de energia, otimizar rendimento, segurança elétrica.
		Conexões	
		Diodos	
		Dispositivos de segurança	
Sistemas térmicos	Coletor		Conversão energia solar em energia térmica.
	Depósito/acumulador		Armazenar energia.
	Tubagens		Transferir o calor até ao local de uso ou armazenamento.
Elementos complementares à construção	Estruturas de aplicação		Instalação dos módulos/coletores na envolvente.
	Elementos de correlação		Otimização da relação construtiva com os restantes elementos da envolvente (remates).

4.7 INTEGRAÇÃO FORMAL

Os sistemas solares ativos são frequentemente visíveis do exterior dos edifícios, inclusive em aplicações na cobertura. Essa visibilidade deve ser considerada na adequação funcional e construtiva dos sistemas ao edifício e contribuir na valorização desses aspetos, uniformizando e tornando coerente o conceito global do edifício.

No final dos anos 90 do século passado, o grupo de trabalho "IEA PVPS Task 7 – Photovoltaic power systems in the built environment" (Prasad e Snow, 2005) definiu os seguintes critérios arquitetónicos para a integração de sistemas fotovoltaicos:

- "Naturalmente integrado" – o sistema fotovoltaico é parte natural do edifício, sem este o edifício pareceria incompleto;
- "Arquitetonicamente agradável" – o sistema adiciona características atraentes ao projeto;
- "Boa composição" – a cor e a textura do sistema devem estar em harmonia com os restantes materiais (poderá optar-se por um desenho específico dos sistemas);
- "Grelha, harmonia e composição" – o dimensionamento dos sistemas é compatível com o do edifício e a sua grelha compositiva;
- "Contexto" – a imagem global do edifício deve estar em harmonia com o sistema (num edifício histórico, telhas fotovoltaicas provavelmente integram-se melhor que módulos de vidro convencionais);
- "Bem projetado" – importa não só o cumprimento de requisitos, como a estanquidade, mas também a elegância do detalhe;
- "Inovador" – os sistemas fotovoltaicos são uma tecnologia inovadora, novas ideias podem potenciar o valor dos edifícios.

Contemporaneamente a este grupo de trabalho, no "IEA-SHC Task 23 - Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings" (Hestnes et al., 2001) foram identificados os seguintes critérios de qualidade arquitetónica:

- Identidade;
- Escala/proporção;
- Integridade/coerência;
- Integração no contexto urbano.

Em ambos os casos descritos, revela-se significativa a procura de coerência entre a superfície geradora de energia e os restantes revestimentos do edifício em termos de composição e harmonia. Salienta-se também a preocupação com contexto urbano em que se inserem.

Apesar da integração formal assentar em critérios qualitativos, num inquérito realizado no âmbito da integração de coletores solares térmicos (Probst, 2009) comprovou-se que existe uma clara consistência entre a opinião de profissionais (arquitetos, engenheiros e fabricantes de sistemas de fachada) relativamente a estas questões, não sendo a coerência formal meramente o resultado de opiniões pessoais e divergentes. Os resultados obtidos demonstraram que a qualidade global da integração formal não depende de características parciais como a dimensão, a forma e a cor dos sistemas, mas de todas as características que afetam a aparência do edifício e que devem ser coerentes.

Este estudo esteve na base da definição das orientações e dos critérios de integração do grupo de trabalho "IEA-SHC Task 41 - Solar Energy and Architecture" (Farkas et al., 2013). A integração morfológica-figurativa parte assim da capacidade dos sistemas solares ativos participarem na estruturação e composição da linguagem arquitetónica do edifício. As características formais e materiais dos sistemas que afetam o aspeto do edifício e que devem ser coerentes com o seu desenho geral são:

- Dimensão e localização dos módulos – coerência com a composição arquitetónica de todo o edifício, depende da posição e dimensão das superfícies expostas, dos objetivos da produção de energia, do tipo de tecnologia solar, das necessidades arquitetónicas do edifício;
- Forma e dimensão dos módulos – devem ser compatíveis com a grelha compositiva do edifício e com as dimensões dos outros elementos da envolvente;
- Materiais visíveis dos módulos, textura superficial e cor – os SSA devem ser compatíveis com os restantes materiais, texturas e cores da envolvente, depende do tipo e qualidades do vidro, cor e material do absorsor ou das células;
- Tipos de junta – diferentes tipos de junta possuem diferentes expressões na grelha modular do sistema em relação com o edifício, depende do material (metal, EPDM), da cor, e do tipo de fixação (linear, pontual, visível, oculta).

Estas características são direcionadas aos SSA em si e à sua relação com os restantes elementos que compõem a envolvente. A atenção a estas características potencia a coerência numa lógica de desenho global do edifício. A estes aspetos julga-se importante associar a integração no contexto urbano, ou seja, os SSA devem também atribuir qualidades à envolvente que permitam uma integração urbana. Assim, para a integração formal importam as relações do edifício com o contexto urbano, a forma da própria envolvente, e as relações entre os SSA e a envolvente, em termos da superfície solar e dos componentes e partes complementares. Estes parâmetros determinam as opções formais dos SSA e dependem, na relação com o edifício, de conceitos de cor, materialidade, escala e proporção (Figura 4.13 e Figura 4.14).

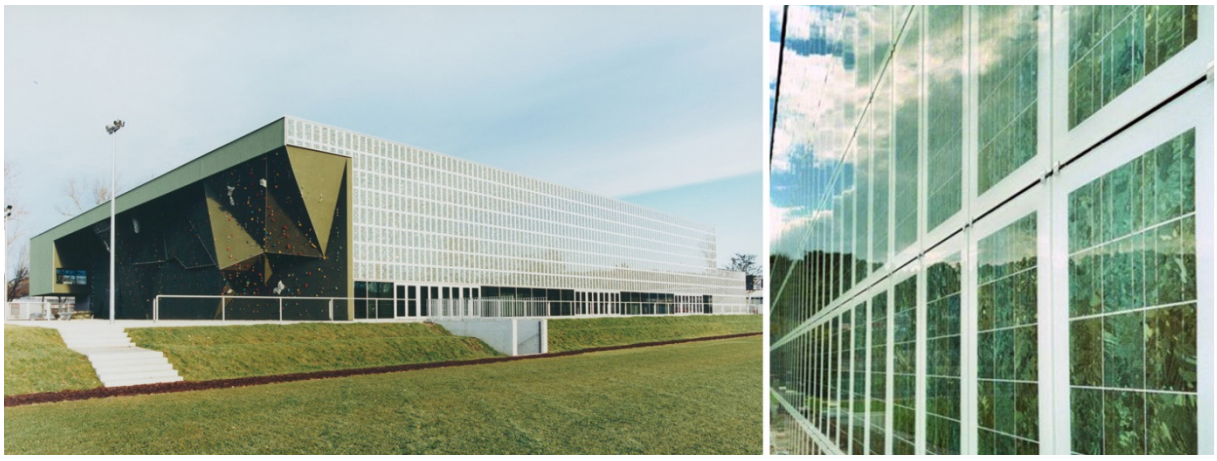


Figura 4.13 – Na fachada sudoeste do edifício Paul Horn Arena, em Tübingen, na Alemanha, foram utilizadas módulos fotovoltaicos personalizados de modo a integrar cromaticamente a fachada com o relvado adjacente, para tal foi utilizado um substrato branco e células policristalinas de cor verde (SUPSI e ISSAC, 2013)

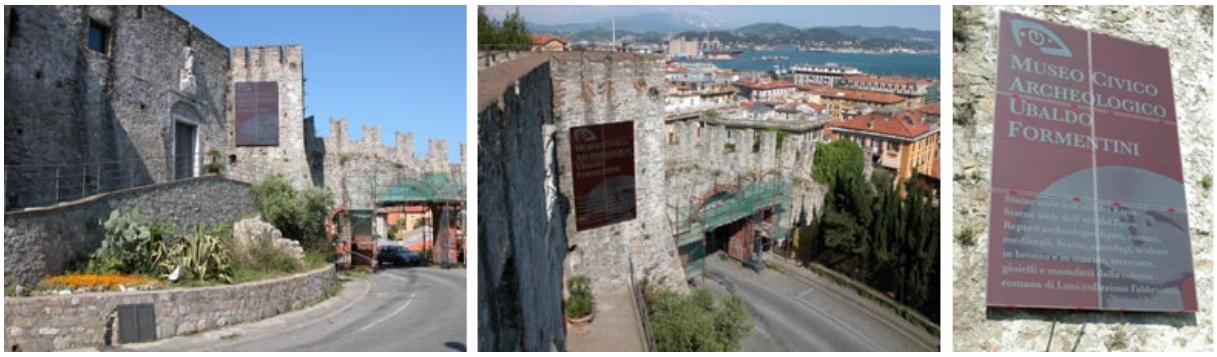


Figura 4.14 – Painel informativo no Castelo de San Giorgio em La Spezia, em Itália, composto por quatro módulos fotovoltaicos de filme fino que alimentam a sua iluminação noturna, foi possível integrar uma nova tecnologia num contexto histórico protegido através da seleção do tipo célula em função das suas características formais (PVACCEPT, n. d.)

Como exemplo, a coordenação dimensional de uma fachada ventilada é normalmente pensada em função das alturas de piso e dos espaçamentos dos vãos, em que a grelha resultante condiciona as dimensões do revestimento. No caso da integração de SSA num sistema construtivo destes, podem-se recorrer a sistemas personalizados, não só por questões dimensionais, mas também por outras questões funcionais e visuais (em fachadas cegas esta questão é facilitada). O dimensionamento deve ser compatibilizado entre os vários elementos da envolvente desde as fases iniciais de projeto, e verificadas as combinações possíveis com os restantes revestimentos e eventuais elementos *dummy* (elementos de revestimento não ativos que reproduzem o acabamento dos módulos ou coletores).

Nesse sentido, salienta-se que em Itália existe uma tarifa especial para sistemas fotovoltaicos integrados (GSE Gestore dei Servizi Energetici, 2012), na qual a definição de integração depende não só do desempenho de funções adicionais na envolvente, mas também do cumprimento de requisitos formais. Nesse sentido, os sistemas fotovoltaicos devem definir uma superfície homogénea do ponto de vista funcional e, no caso de constituírem apenas parte da envolvente, devem ser integrados com a parte restante (Figura 4.15), respeitando as seguintes condições:

- No caso da utilização de módulos fotovoltaicos "não-convencionais" (módulos flexíveis, telhas fotovoltaicas ou módulos semitransparentes), a porção da superfície não afetada pela instalação deve ser completada com elementos de cobertura com dimensões semelhantes aos módulos utilizados, inseridos de tal forma que garanta a continuidade e a regularidade da disposição geométrica dos elementos de cobertura de toda a superfície e de dispensar de elementos de ligação;
- No caso da utilização de "componentes especiais" (módulos fotovoltaicos sem caixilho aplicados sobre uma estrutura), todo o espaço entre a superfície solar e a superfície não afetada pela instalação do sistema deve ser tratado com elementos adequados, a fim de assegurar a continuidade dos elementos de ligação à superfície. Estes elementos devem ocupar o mínimo espaço possível.

Neste contexto é importante ter conhecimento de quais as opções de desenho permitidas pelos vários sistemas e que implicações acarretam, não só em termos de custo, como de eficiência do desempenho energético. Os elementos que permitem o controlo da expressão figurativa consistem em todos os materiais visíveis que compõem o módulo/coletor (Tabela 4.18 e Figura 4.16).

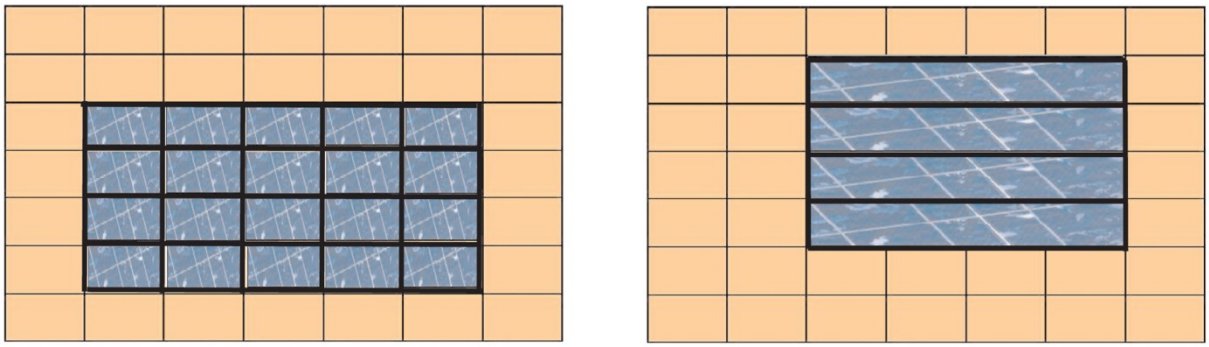


Figura 4.15 – Esquema de instalação parcial correta no que respeita à continuidade e disposição geométrica dos elementos de cobertura (GSE Gestore dei Servizi Energetici, 2012)

Tabela 4.18 – Características SSA, adaptado parcialmente de Bonomo (2012)

Escala de observação	**Nível de análise**	**Fatores de caracterização da linguagem**	**Parâmetros a considerar (depende do tipo de tecnologia)**
Componente (módulo fotovoltaico)	Célula	Características geométricas, morfológicas, dimensionais, cromáticas, materiais, (…).	Forma e dimensão, textura, cristalografia, cor, contatos elétricos, transparência.
	Estratificação do módulo	Características dos estratos e particularidades geométricas, dimensionais, cromáticas e de transparência do módulo e das partes complementares.	Vidro frontal, camada antirreflexo, encapsulamento, material posterior.
	Características do módulo		Forma e dimensão, densidade e disposição das células, tipo de caixilho, fixações, fundo, flexibilidade.
Componente (coletor térmico)	Absorsor	Características geométricas, morfológicas, dimensionais, cromáticas, materiais, (…).	Forma e dimensão do absorsor, cor, ligações ao circuito solar, transparência.
	Características do coletor	Características dos estratos e particularidades geométricas, dimensionais, cromáticas e de transparência do coletor e das partes complementares.	Forma e dimensão, material e textura superficial, tipo de juntas, fixações.
Edifício	Estratégias de projeto	Escolha em projeto da expressão do grau de reconhecimento linguístico dos SSA relativamente à perceção figurativa da envolvente.	Subjugação, domínio, integração, subordinação, e imitação.
Contexto	Estratégias urbanas	Escolha em projeto da expressão da linguagem do edifício em relação ao contexto onde se insere e à escala urbana.	

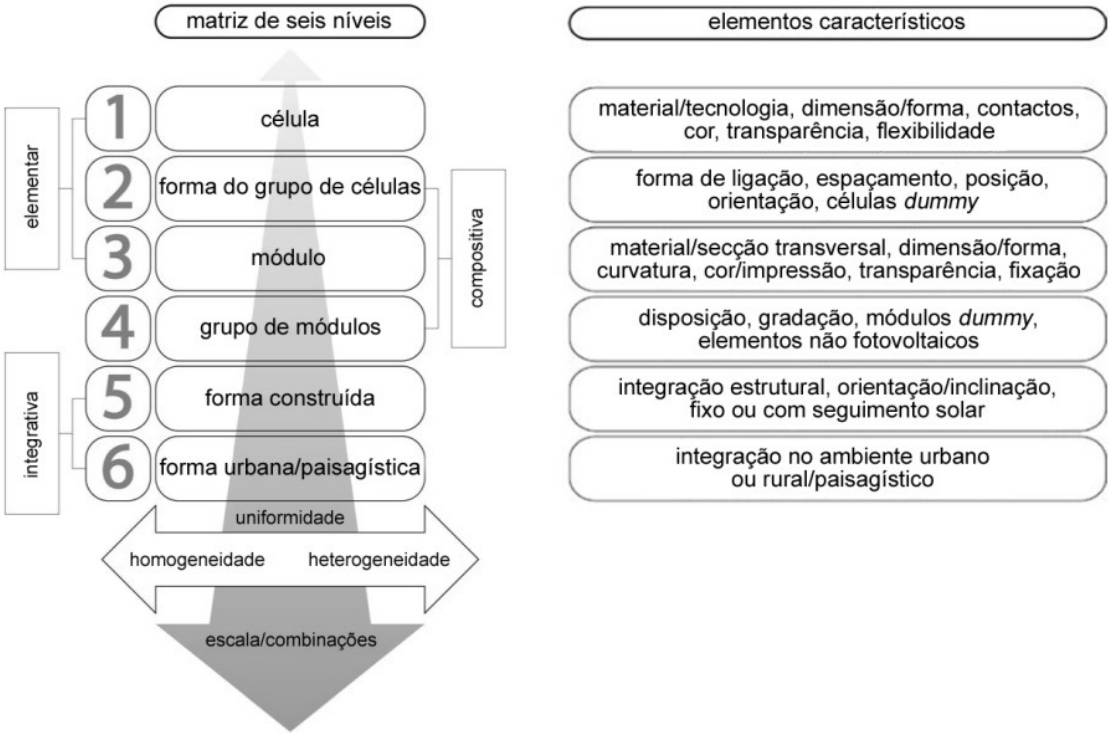


Figura 4.16 – Matriz de seis níveis para a integração de sistemas fotovoltaicos permeáveis à luz (Baum, 2011)

As estratégias de projeto indicadas ao nível da escala do edifício na Tabela 4.18 são de conceção arquitetónica (Weller et al., 2010) e traduzem conceitos em função do papel dos sistemas: subjugação; domínio; integração; subordinação; e imitação. De uma forma sintética, a subjugação consiste no sistema adicionado sem preocupação formal; o domínio consiste numa integração em que o impacto causado pelos SSA domina o edifício; a integração representa a harmonia entre elementos; a subordinação, consiste nos SSA passarem despercebidos na composição da envolvente; e a imitação, é uma aproximação entre os SSA e os restantes elementos. Apesar de Bonomo (2012) utilizar estas e outras estratégias semelhantes para fundamentar a avaliação da integração, parte-se do princípio que constituem recursos do projetista que podem fazer maior ou menor sentido consoante o contexto da intervenção, não devendo, por isso, serem alvo de classificação numa metodologia de integração.

Obviamente, as relações entre componente, edifício e contexto, não determinam, de forma objetiva, um resultado esteticamente atraente, mas criam referências úteis em termos de conceção. Estes critérios não se justapõem aos energéticos, funcionais ou construtivos, mas estabelecem uma relação de interdependência no conceito global da envolvente e são determinantes na sua qualidade formal e arquitetónica. Ao nível da integração formal verificam-se outras abordagens, que não possuem esta capacidade de relação em termos de coerência formal. Bayoumi e Fink (2014), ao estudarem um edifício em altura com o objetivo de maximizar o desempenho de uma fachada fotovoltaica, partem do pressuposto que a imagem de uma torre envidraçada é um objetivo formal universal e assumem-no como parâmetro de qualidade formal, definindo como critérios aspetos relativos ao desempenho de fachadas envidraçadas, como a fração envidraçada ou o fator solar. Contudo, esta estratégia apenas garante o desempenho térmico de uma área envidraçada e não a articulação formal dos SSA com a envolvente. Também em Portugal, no Guia de Reabilitação relativo ao centro histórico da cidade do Porto (Fernandes et al., 2010), são descritas 10 recomendações de instalação e integração arquitetónica

dos sistemas solares térmicos (direcionado para instalações típicas de AQS em contexto de utilização doméstica), das quais 6 são relativas a aspetos formais, nomeadamente:

- A área total dos coletores não deve ultrapassar os 10% da cobertura;
- Os coletores deverão ser instalados à face da vertente com a mesma inclinação da telha;
- Os coletores deverão ser alinhados pela cumeeira;
- Não devem ser instalados em vertentes com geometria triangular;
- Não devem ser instalados em vertentes viradas para a via pública;
- Apenas são permitidos sistemas de circulação forçada (de forma a esconder o acumulador).

Destaca-se a preocupação da integração da superfície coletora na volumetria da cobertura em questões de alinhamento. Contudo, a estratégia de integração no contexto urbano consiste na omissão de visibilidade a partir da via pública, o que se revela de importância relativa, pois os telhados nem sempre são visíveis a partir da via pública e, pela natureza topográfica do centro histórico, as várias vertentes dos telhados são omnipresentes na paisagem urbana a partir de vários locais e miradouros.

Centrando os critérios na forma e materialidade dos sistemas e na relação com o contexto em que se inserem (edifício e urbano), consideram-se os seguintes parâmetros e critérios para a integração formal (Tabela 4.19).

Tabela 4.19 – Integração formal

Escala	Parâmetros	Descrição
Contexto	Integração no contexto urbano	Relação contextual/paisagística da envolvente (fachada e cobertura) com o ambiente construído.
Edifício	Coordenação dimensional e visual da superfície coletora	Dimensão e localização do conjunto de módulos/coletores (trata a relação SSA/envolvente e depende da articulação dos objetivos da produção de energia, tipo da tecnologia solar, necessidades arquitetónicas do edifício).
Componente	Coordenação dimensional e visual do módulo/coletor	Forma e dimensão dos módulos/coletores Material e textura superficial dos materiais visíveis (tipo e qualidades do vidro, cor e material do absorsor ou das células, …).
	Coordenação dimensional e visual das partes complementares	Trata a relação das partes complementares (cabos, tubos, ligações, inversor, acumulador, estruturas, fixações) com a envolvente.

Refere-se ainda que as questões de morfogénese referidas na integração energética, podem resultar na exploração da expressividade do edifício em função da captação de energia (inclinação, orientação, sombreamento, albedo, outras) com possíveis benefícios em termos estéticos e arquitetónicos.

4.8 SÍNTESE DOS REQUISITOS E PARÂMETROS DE INTEGRAÇÃO "VITRUVIANA"

As Tabelas seguintes reúnem e reagrupam os requisitos e parâmetros compilados ao longo do capítulo.

Tabela 4.20 – Lista de requisitos para a integração de SSA na envolvente

Acessibilidade na utilização	
Acessibilidade a interruptores e sistemas de controlo	Devem ser previstos e universalmente operáveis os interruptores e sistemas de controlo relacionados com o funcionamento da envolvente no caso dos SSA conformarem soluções que se enquadrem nessas operações. Segundo o Regime de acessibilidade aos edifícios (Decreto-Lei n.º 163/2006), os interruptores e sistemas de controlo devem: • Estar situados de modo que exista uma zona livre para operação que satisfaça o especificado na secção "4.1 - Zonas de permanência" do Regime de acessibilidade; • Estar a uma altura, medida entre o nível do piso e o eixo do comando, que satisfaça o especificado na secção "4.2 – Alcance" do Regime de acessibilidade; • Ter uma forma fácil de agarrar com uma mão e que não requeira uma preensão firme ou rodar o pulso; • Poder ser operados sem requerer uma força superior a 22 N; • Ter pelo menos uma das suas dimensões não inferior a 0,02 m.
Suporte (resistência mecânica e estabilidade)	
Fixações, estruturas de suporte e elementos de correlação	A pormenorização das fixações e juntas deve ser compatível com as expansões dos sistemas e de outros materiais da envolvente. Os materiais da envolvente em contacto com os sistemas solares ativos devem suportar as suas temperaturas de funcionamento elevadas.
Adequação das camadas dos SSA em termos de resistência	A escolha do tipo de SSA é adequada aos requisitos da envolvente em termos de resistência.
Segurança contra incêndio	
Propagação	Não instalar módulos fotovoltaicos próximo de locais perigosos ou potenciais fontes de gases ou outras substâncias inflamáveis.
	Penetrações externas vedadas contra a propagação.
Segurança da equipa de intervenção	Sinalização de sistemas fotovoltaicos (BIPV).
	Garantir espaço de manobra na cobertura (faixas de 30 a 50cm).
Segurança	
Segurança no contacto	Segurança dos utilizadores ao toque.
Segurança pessoal	Resistência ao impacto da envolvente (relaciona-se com resistência mecânica. Resistência ao fogo da envolvente (relaciona-se com segurança contra incêndio). Superfícies resistentes ao *graffiti*.
Resistência às ações acidentais	Prevenir o estilhaçamento de vidro (coletores e módulos com vidros específicos), adotar soluções construtivas que impeçam o contacto.

No que respeita à síntese dos parâmetros (Tabela 4.21), as questões construtivas de controlo, relativas à "Higiene e Saúde" foram inseridas no contributo para o desempenho energético, assim como a proteção ao ruído englobada no "Contributo para o desempenho não energético".

Tabela 4.21 – Categorias e parâmetros de integração dos SSA na envolvente

Categorias de integração	**Sub-grupos**	**Parâmetros**
Energética	Produção de energia	Produção energética anual (PV/ST) kWh/a
		Relação entre a energia gerada e as necessidades % (eletricidade, AQS, …)
	Contributo para o desempenho energético	Iluminação natural Filtragem de luz Sombreamento, proteção solar Ganhos solares Isolamento térmico (U-value, g-value) Temperatura radiante das superfícies Ventilação - contributo para o esquema de ventilação Outros
	Morfogénese	Posicionamento adequado (orientação e inclinação)
		Sombreamento
		Sujidade
		Temperatura (PV)
		Coeficiente de reflexão - Albedo
Multifuncional	Contributo para o desempenho não energético	Proteção climática
		Proteção contra o ruído – contributo dos SSA na atenuação de ruído aéreo pela envolvente - RRAE (EN 12354)
Construtivo		Grau de integração (adição, acoplagem, integração)
	Distribuição	Acessibilidade (manutenção e substituição)
		Interferência funcional
Formal	Contexto	Integração no contexto urbano
	Edifício	Coordenação dimensional e visual da superfície coletora
	Componente	Coordenação dimensional e visual do módulo/coletor
		Coordenação dimensional e visual das partes complementares

5

A INTEGRAÇÃO NA PERSPETIVA DA SUSTENTABILIDADE

5.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo visa uma abordagem à integração dos sistemas solares ativos na envolvente de edifícios em função da normalização europeia da "sustentabilidade das obras de construção" (CEN, 2010a), elaborada pela comissão técnica CEN/TC 350 "Sustainability of construction works". Neste âmbito, são definidos os requisitos e parâmetros para a integração dos SSA na envolvente, com base nos indicadores sociais, ambientais e económicos de sustentabilidade, tendo em conta o ciclo de vida do edifício.

5.2 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, SOCIAL E ECONÓMICA

O objetivo principal da normalização da "sustentabilidade das obras de construção" consiste na verificabilidade, transparência e comparabilidade dos resultados que se obtém ao efetuar a avaliação com base nas mesmas características funcionais e técnicas do objeto da avaliação, ou seja, a partir de um equivalente funcional[12]. Na avaliação dos desempenhos social, ambiental e económico são quantificados impactes e aspetos utilizando indicadores quantitativos e qualitativos. Os resultados são obtidos em função de cenários[13] estabelecidos para o edifício em função das suas características dependentes do tempo ao longo do seu ciclo de vida. Deste modo é necessário definir, ao nível do edifício, o objeto da avaliação (que poderá ser o edifício integral ou parte deste) nos termos das suas características físicas e das suas características dependentes do tempo, estruturando um modelo que inclui a fronteira do sistema[14], o equivalente funcional e a definição dos cenários de acordo com o ciclo de vida. O equivalente funcional deve incluir os seguintes aspetos, mas não está limitado a estes:

- Tipo de edifício (habitação, escritório, etc.);
- Requisitos técnicos e funcionais relevantes;
- Padrão de utilização (ocupação);
- Vida útil requerida;
- Outros (como exposição ao clima e condições da envolvente próxima).

[12] O equivalente funcional consiste nos requisitos funcionais e/ou técnicos quantificados para um edifício, ou parte deste, de forma a ser utilizado como base de comparação.
[13] Os cenários consistem numa coleção de informações e suposições relativas a uma sequência expectável de possíveis eventos futuros, representando o ciclo de vida do edifício com base nos requisitos funcionais e técnicos. A informação utilizada nos cenários é baseada em premissas conhecidas ou assumidas, devendo ser claro se a informação é assumida, estimada, calculada ou baseada em medições.
[14] A fronteira do sistema é o interface na avaliação entre um edifício e o ambiente ou outros sistemas. A fronteira define o que está ou não incluído na avaliação.

A definição da fronteira do sistema e dos cenários tem em conta aspetos temporais. A sua definição segue um princípio de modularidade de ciclo de vida (Tabela 5.1) ao qual se relacionam os impactes ambientais, económicos e sociais.

Tabela 5.1 – Informação de ciclo de vida do edifício

A1-A3			A4-A5		B1-B7	C1-C4				D
PRODUTO			CONSTRUÇÃO		UTILIZAÇÃO	FIM DE VIDA				Potenciais benefícios e cargas
A1 Fornecimento de matéria-prima	A2 Transporte	A3 Manufatura	A4 Transporte	A5 Construção	**B1** Utilização **B2** Manutenção **B3** Reparação **B4** Substituição **B5** Remodelação **B6** Energia operacional **B6.1** Aquecimento **B6.2** Arrefecimento **B6.3** Ventilação **B6.4** AQS **B6.5** Iluminação **B6.6** Automatização - controlo **B7** Água operacional	C1 Desconstrução	C2 Transporte	C3 Processamento para reutilização, recuperação e/ou reciclagem	C4 Eliminação	D Potencial de Reutilização Recuperação Reciclagem

Os cenários são aplicados ao modelo para as fases de construção, uso, e fim de vida (módulos A4 a C4). São constituídos pelas características dependentes do fator tempo (período de estudo de referência, vida útil, período de substituição, horas de funcionamento, padrão de uso, entre outros) devendo ser indicado quando os cenários se relacionam com funções pontuais ou específicas. Os cenários a considerar devem descrever todas as atividades relevantes: atividades de gestão que incluam manutenção, reparação e limpeza; grau de controlo/automatização de sistemas para aquecimento, arrefecimento, iluminação, águas quentes sanitárias; atividades de manutenção; questões de alterações climáticas (alterações de padrões de chuva, vento, neve, radiação solar); planeamento de vida útil; informação de fabricantes; e o padrão de uso. Há uma ligação dos cenários à especificidade das condições internas e externas, da sua influência nas características dos produtos e da sua aplicação. Como exemplo, a libertação de substâncias depende do padrão de uso, da humidade, da velocidade do ar, da temperatura, entre outros aspetos. As assunções que formam os cenários são dinâmicas consoante o grau de definição em cada fase de projeto.

Como foi referido no Estado da Arte, a procura de validar os sistemas integrados BIPV na investigação científica é geralmente efetuada através de avaliações económicas e energéticas calculadas para o ciclo de vida dos sistemas solares (20/25 anos) e não para o ciclo de vida da envolvente e do edifício. Ou seja, relativamente à avaliação de sustentabilidade, e no contexto da definição de cenários, considera-se parcialmente o ciclo de vida, designadamente os módulos compreendidos entre as fases A1 e B2. Deste modo, estas avaliações estão centradas em aspetos

parciais da viabilidade económica e ambiental, pois consideram apenas o ciclo de vida dos produtos em si. De forma a considerar a sustentabilidade da utilização de SSA na envolvente, a avaliação deveria ser efetuada na perspetiva do edifício e, em particular, da envolvente.

A avaliação de sustentabilidade não estabelece valorizações, tendo apenas como objetivo a declaração do desempenho. Como considera o contributo dos produtos no ciclo de vida em função do programa, não condiciona a escolha de produtos à partida rotulados de sustentáveis, para que o contributo no desempenho do edifício ao longo do ciclo de vida também o seja.

Os resultados disponibilizam valores para diferentes indicadores, para os cenários assumidos e para as fases de ciclo de vida incluídos na avaliação. Devem ser organizados em dois/três grupos principais:

- Impactes e aspetos específicos para os materiais de edificação e estaleiro;
- Impactes e aspetos específicos para o edifício em operação;
- Opcionalmente, benefícios e cargas para além do ciclo de vida do edifício (reutilização, reciclagem, recuperação de energia e outras operações para lá do ciclo de vida).

Apesar da avaliação técnica e funcional não ser considerada no âmbito da avaliação de sustentabilidade, as características técnicas e funcionais são tidas em conta em função do equivalente funcional (que constitui a base de comparação dos resultados), pois estas condicionam a escolha do tipo de construção e a seleção de produtos, e influenciam assim a avaliação da sustentabilidade. Deste modo, os requisitos funcionais e técnicos, assim como a utilização prevista, devem ser descritos de forma a determinar a equivalência funcional de diferentes opções e tipos de edifício, constituindo uma base de comparação transparente e credível. A escolha da unidade de referência comum a comparar depende de um requisito específico de um aspeto técnico, funcional, ambiental, social ou económico, ou de uma combinação destes.

As características técnicas e funcionais são definidas no programa/caderno de encargos do cliente, nos requisitos regulamentares e nas especificações do projeto.

De seguida são descritos os indicadores sociais, ambientais e económicos, sendo salientadas as relações específicas que estabelecem com a integração de sistemas solares ativos na envolvente, fazendo referência quando estes coincidem ou se cruzam com aspetos da integração "vitruviana" e com os "Requisitos básicos das obras de construção" (Regulamento UE N.º 305/2011).

5.3 DESEMPENHO SOCIAL

Relativamente ao desempenho social (CEN, 2010c, IPQ, 2015b), a normalização apenas compreende a avaliação da fase de utilização, correspondente aos módulos B1 a B7 (sendo referido que os métodos que permitirão abranger as restantes fases serão desenvolvidos futuramente). No entanto, como o objeto de avaliação é descrito nos termos das suas características físicas e das suas características dependentes do tempo, as medidas tomadas em função de melhorar o desempenho social têm naturalmente consequências nos outros desempenhos (ambiental e económico), em todas as fases do ciclo de vida.

A avaliação do desempenho social é efetuada através das seguintes categorias[15]:

- Acessibilidade;
- Adaptabilidade;
- Saúde e conforto;
- Pressões na vizinhança;
- Manutenção;
- Segurança.

Estas categorias possuem indicadores que são avaliados por referência a regulamentos europeus, nacionais ou locais. Nem todos os indicadores são relevantes para cada avaliação, devendo-se, em cada caso, selecionar os indicadores adequados. Estas categorias abordam questões que se relacionam com a composição geral da envolvente e que devem ser observadas independentemente dos materiais e produtos que a conformam. Contudo, pela influência direta que alguns SSA podem estabelecer nestas categorias, em virtude da sua integração, existem aspetos específicos a considerar. Deste modo, procede-se à descrição das categorias de desempenho social, salientando os aspetos relevantes na integração de SSA na envolvente, sendo indicado quando existem requisitos regulamentares.

5.3.1 ACESSIBILIDADE

A "acessibilidade" relaciona-se diretamente com a "acessibilidade na utilização" dos "Requisitos básicos das obras de construção" da diretiva dos produtos da construção, tendo sido abordada previamente no ponto "4.5 Integração multifuncional".

5.3.2 ADAPTABILIDADE

A capacidade de adaptação é referida na normalização como um pré-requisito para uma longa utilização e vida útil do edifício, contribuindo para evitar a obsolescência técnica e funcional, podendo também oferecer vantagens em termos de desempenho económico e ambiental (devendo o edifício ser avaliado nesses aspetos e reavaliado na altura da mudança dos requisitos técnicos e funcionais). Nesta categoria avalia-se a capacidade do edifício ser modificado de modo a tornar-se apto a um propósito particular, como a adaptação ou a mudança do seu uso corrente. Nesse sentido, deve ser avaliada a capacidade do edifício acomodar os seguintes aspetos:

- Requisitos de utilizadores individuais;
- A mudança de requisitos de utilizadores individuais;
- Mudanças técnicas;
- Mudanças de uso.

Relativamente à integração de SSA na envolvente, se estes configurarem sistemas operáveis pelo utilizador, devem permitir articular requisitos individuais. No que respeita a mudanças técnicas, este é

[15] Na norma também é feita referência às categorias "fornecimento de materiais e serviços" e "envolvimento das partes interessadas", no entanto, estas ainda não possuem uma base de acordo que permita a sua inclusão na normalização.

um ponto fulcral, pois os SSA são componentes técnicos com uma vida útil inferior à do edifício, devendo assim ser enquadrada a capacidade da envolvente acomodar a mudança. Segundo Tripathy, Sadhu e Panda (2016) a substituição de produtos BIPV será um aspeto importante a considerar em projeto, devido à progressiva investigação e desenvolvimento no campo dos sistemas fotovoltaicos e produtos BIPV, que tem resultado na redução de custos, no incremento da eficiência e na melhoria da integrabilidade em edifícios.

Por analogia à engenharia de sistemas, a capacidade de mudança como atributo só faz sentido se atribuir valor ao sistema (Ross, Rhodes e Hastings, 2008), neste caso ao edifício como sistema. A mudança pode ser definida como uma transição no tempo de um estado para um estado alterado. A capacidade de mudança é determinada pela facilidade com que um sistema pode ser submetido a diversas alterações. Existem várias possibilidades para tornar um sistema apto à mudança, no entanto, a avaliação da razoabilidade de uma possibilidade em determinado período e contexto futuro é uma decisão subjetiva tomada por indivíduos baseada em determinadas circunstâncias no tempo presente, ou seja, depende do estabelecimento de cenários. Um conceito importante é o da perceção da capacidade de mudança, em termos de custo e esforço, e num edifício a previsão é sempre mais difícil do que num produto industrial. A capacidade de adaptação não é viável se abranger todos os aspetos do edifício, pois implicaria um grande investimento sem garantias. Se a mudança não é considerada aceitável, o edifício não possui essa capacidade. Num período superior a 50 anos o futuro é altamente imprevisível e ao longo do tempo, o custo e esforço de determinada possibilidade podem mudar. Deste modo, de acordo com Russel e Moffat (2001) a previsão de mudança deve ser limitada a:

- Acomodar mudanças previsíveis no futuro próximo;
- Aplicar princípios conhecidos que facilitam a mudança;
- Aplicar princípios de adaptabilidade por razões específicas;
- Aplicar princípios de adaptabilidade sem custo ou de custo reduzido.

Em relação aos pontos "acomodar mudanças previsíveis no futuro próximo" e "aplicar princípios de adaptabilidade por razões específicas", os SSA como sistemas tecnológicos possuem uma vida útil limitada, previsível e que poderá ser inferior à da envolvente, e certamente inferior à do edifício. Deve assim, ser previsto como acomodar e facilitar a mudança ao nível da envolvente, e quais os impactos no ciclo de vida do edifício. Uma configuração da envolvente que integre SSA e que se pretenda adaptável deve ser definida e especificada nesse sentido, ou seja, é considerada adaptável sob determinada perspetiva, baseada num cenário que deve ser garantido e conferir valor.

Na década de 80 do século passado, Brand (1994) apontava um período de 20 anos para a renovação da envolvente devido a diversos fatores, tais como o acompanhamento da moda e da tecnologia, e a reabilitação para um novo uso ou para aumentar o valor comercial do edifício. Salientou que as preocupações com as questões energéticas, na altura recentes, levavam à "reengenharia" da envolvente no que respeitava a permeabilidade ao ar e o isolamento térmico. Entretanto, no presente, as questões de eficiência energética tornaram-se incontornáveis, e surgiram as de produção de energia a partir de fontes renováveis. Se adicionarmos ao contexto atual as preocupações relativas às alterações climáticas (e o facto dos modelos previstos para o futuro porem em causa algumas das presentes boas-práticas de eficiência energética[16]), o futuro revela-se incerto. Nesta perspetiva, torna-se claro que a

[16] Uma ligeira mudança climática poder colocar em causa os pressupostos atuais com que se intervém na envolvente de edifícios de modo a torná-la energeticamente eficiente, uma vez que estes podem não ser os mais adequados num cenário ligeiramente diferente. No caso nacional, tal verifica-se na possibilidade das necessidades de arrefecimento tornarem-se maiores que as de aquecimento.

envolvente será objeto de intervenção, dentro do prazo da vida útil geral do edifício. Nesse momento (futuro) os pressupostos de intervenção serão outros e os sistemas tecnológicos seguramente diversos, e ocorrerão processos de adaptação (tal como sucede contemporaneamente na reabilitação energética de edifícios) com impacto considerável na reconfiguração da envolvente. Neste contexto, a adaptabilidade e o estabelecimento de cenários revelam-se essenciais.

Como os SSA constituem componentes tecnológicos com uma vida útil inferior à do edifício, recorrem-se a temas complementares, como a durabilidade, de forma a balizar a definição de cenários. Nesse sentido, tendo em conta o "Eurocódigo: Bases para o projeto de estruturas" (IPQ, 2009a) salienta-se que uma estrutura de um edifício corrente é projetada para uma vida útil de 50 anos (Tabela 5.2). De acordo com as recomendações europeias, os produtos de construção devem corresponder a esse período de vida, ou a metade caso sejam reparáveis ou substituíveis com algum esforço (Tabela 5.3). No que respeita o período mínimo de vida útil das instalações em função da acessibilidade para a manutenção, estas devem corresponder a um mínimo de 25 anos, no caso de um edifício com uma vida útil de 60 anos (Tabela 5.4).

Tabela 5.2 – Valores indicativos do tempo de vida útil do projeto (IPQ, 2009a)

Categoria do tempo de vida útil de projeto	Valor indicativo do tempo de vida útil do projeto (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias[(a)].
2	10 a 25	Componentes estruturais substituíveis, como vigas-carril, apoios.
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes.
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes.
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil.

(a) Estruturas desmontáveis que prevejam reutilização não são consideradas provisórias.

Tabela 5.3 – Vida útil dos produtos da construção em função da vida útil da construção (EOTA, 1999)

Vida útil das construções		Vida útil dos produtos de construção		
		Categoria		
Categoria	Anos	Reparável ou facilmente substituível	Reparável ou substituível com algum esforço	Vitalício[(a)]
Curto	10	10[(b)]	10	10
Médio	25	10[(b)]	25	25
Normal	50	10[(b)]	25	50
Longo	100	10[(b)]	25	100

(a) Quando não reparável ou substituível "facilmente" ou com "algum esforço".

(b) Em casos excecionais e justificados pode considera-se a reparação de alguns produtos com ciclos de vida de 3 e 6 anos.

Tabela 5.4 – Vidas úteis mínimas de componentes para vidas úteis dos edifícios baseadas na sua acessibilidade para manutenção (ISO, 2000)

Vida útil do edifício	Componentes estruturais ou inacessíveis	Componentes com substituição cara ou difícil	Componentes substituíveis principais	Instalações
Ilimitado	Ilimitado	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

Componentes de fácil substituição podem ter vidas úteis de 3 ou 6 anos.

Uma vida útil ilimitada deve ser raramente utilizada pois reduz significativamente as opções de projeto.

Os SSA correntes no mercado possuem vidas úteis e garantias[17] que coincidem com o período de tempo relativo à categoria "Reparável ou substituível com algum esforço" (Tabela 5.3) e das instalações (Tabela 5.4), embora também façam parte da envolvente. Nesse sentido, a forma como os SSA são integrados interfere na durabilidade, e na capacidade de adaptação, e deve ser ponderada nas restantes questões para determinar esse "esforço". Naturalmente deverão ser privilegiadas situações que excedam os tempos indicados, devendo estes serem considerados requisitos mínimos. Estas indicações balizam as questões de durabilidade em termos de definição de cenários, fundamentais para as previsão da adaptabilidade, pois influenciarão a avaliação da inclusão dos SSA na envolvente.

5.3.2.1 Estratégias e princípios de avaliação da adaptabilidade em edifícios

A capacidade de adaptação dos edifícios é um campo onde não existe regulamentação nacional ou internacional. Não obstante, é um tema que, no seu âmbito geral, acumula vários estudos de investigação científica desde a segunda metade do século XX. Verifica-se inclusive a existência de vários projetos experimentais construídos, sobretudo no que respeita a adaptabilidade do espaço interior - desde os apartamentos projetados por Mies van der Rohe em 1927 para o Weissenhofsiedlung, em Estugarda, na Alemanha (Figura 5.1), até ao conjunto residencial Lohbach, desenhado pelos arquitetos Baumschlager e Eberle em 2000, em Insbruque, na Áustria (Figura 5.2).

Sendo a adaptabilidade um modo de garantir uma longa vida útil através da transformação[18], Nielsen (2010) propõe como estratégias para a adaptabilidade: a generalidade, a flexibilidade e a estratificação (Figura 5.3).

[17] No relatório anual da IEA-SHC (Mauthner, Weiss e Spörk-Dür, 2015) é assumido um ciclo de vida de 25 anos para os coletores correntes - planos e tubos de vácuo (exceto no caso da China onde, de acordo com o CSTIF - Chinese Solar Thermal Industry Federation, a vida útil é considerada abaixo dos 10 anos). Nos sistemas fotovoltaicos, para as tecnologias maduras (silício cristalino e filmes finos) estima-se uma vida útil de 30 anos (Frischknecht et al., 2016), e espera-se o seu aumento para 35/40 anos até 2030 (IEA-ETSAP e IRENA, 2013).

[18] A adaptabilidade é um modo de garantir a durabilidade. No entanto, a durabilidade pode ser conseguida de duas formas: através da preservação dos edifícios ou da sua transformação. A preservação destina-se a alguns exemplos considerados culturalmente excecionais, enquanto a generalidade do ambiente edificado é sujeita a constante transformação por adaptação ou demolição. Nielsen (2010) acredita que as estratégias de transformação que permitirão os edifícios dispor de uma maior vida útil poderão, no futuro, mudar o modo de reconhecimento cultural da identidade dos edifícios.

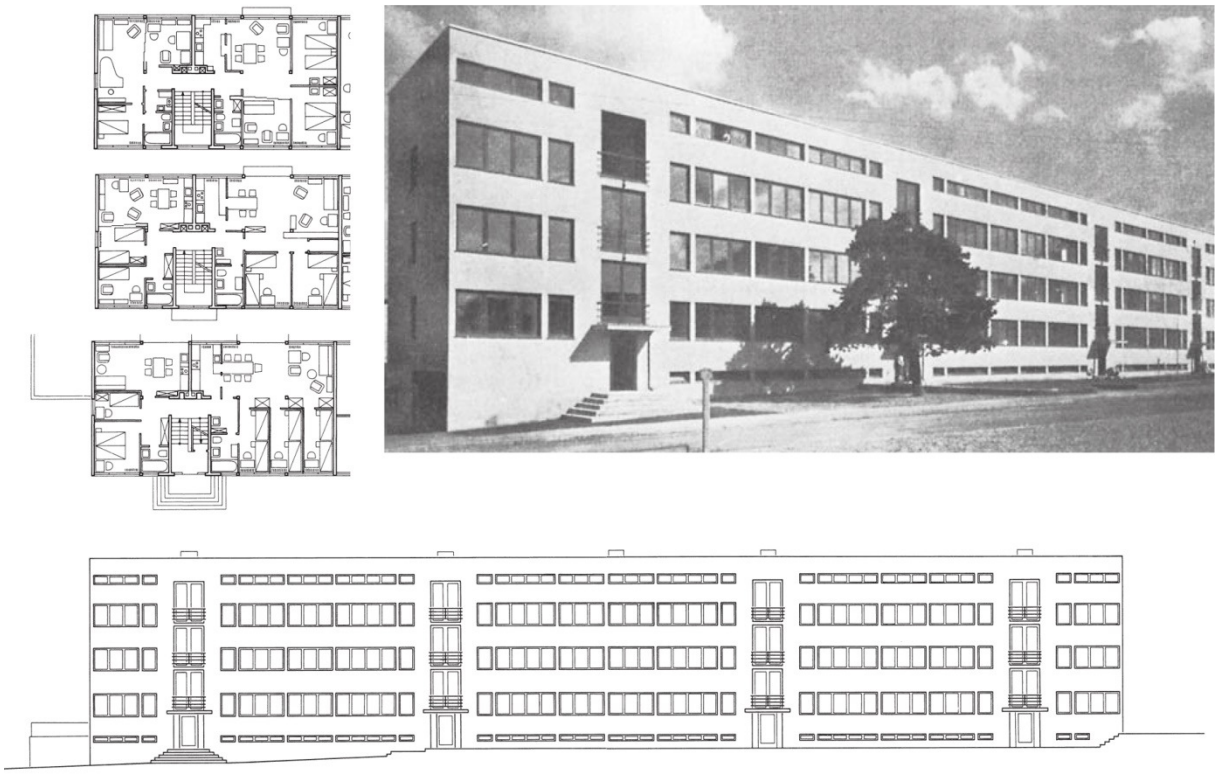


Figura 5.1 – Plantas com diferentes configurações para a mesma área, vista e alçado do bloco de habitação no Weissenhofsiedlung (Kirsch, 2013)

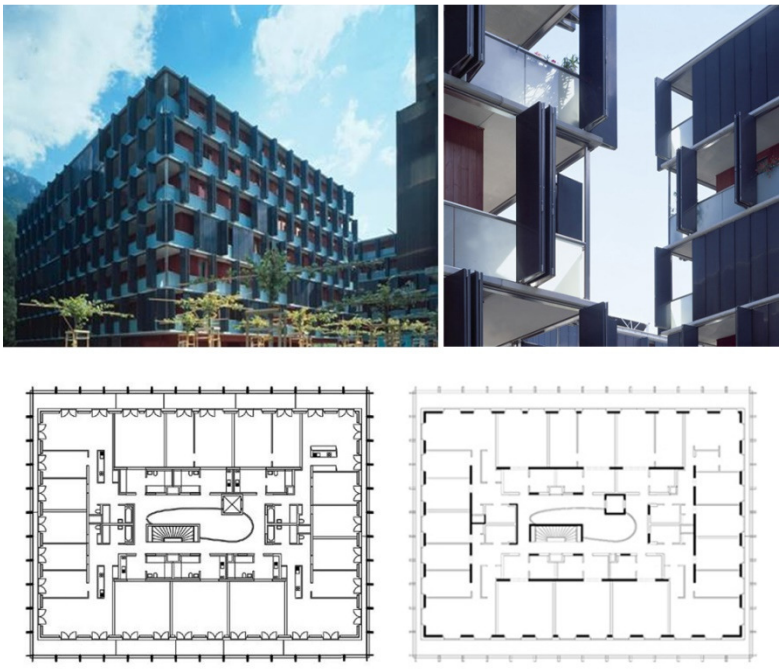


Figura 5.2 – Conjunto residencial Lohbach, vista geral e pormenor da fachada (em cima), planta do piso tipo (em baixo, à esquerda) e planta estrutural (em baixo, à direita) - o edifício possui os acessos verticais centralizados, as instalações (cozinhas e quartos de banho) formam um 1º anel ao redor desses acessos, as salas e os quartos um 2º anel, e a fachada um 3º anel (no qual as portadas uniformizam o exterior do conjunto) - esta configuração permite facilmente reconfigurar os apartamentos, ou reconverter o edifício, pela concentração dos elementos estruturais, das instalações e dos acessos (Baumschlager Eberle, 2000, Nextroom, 2003)

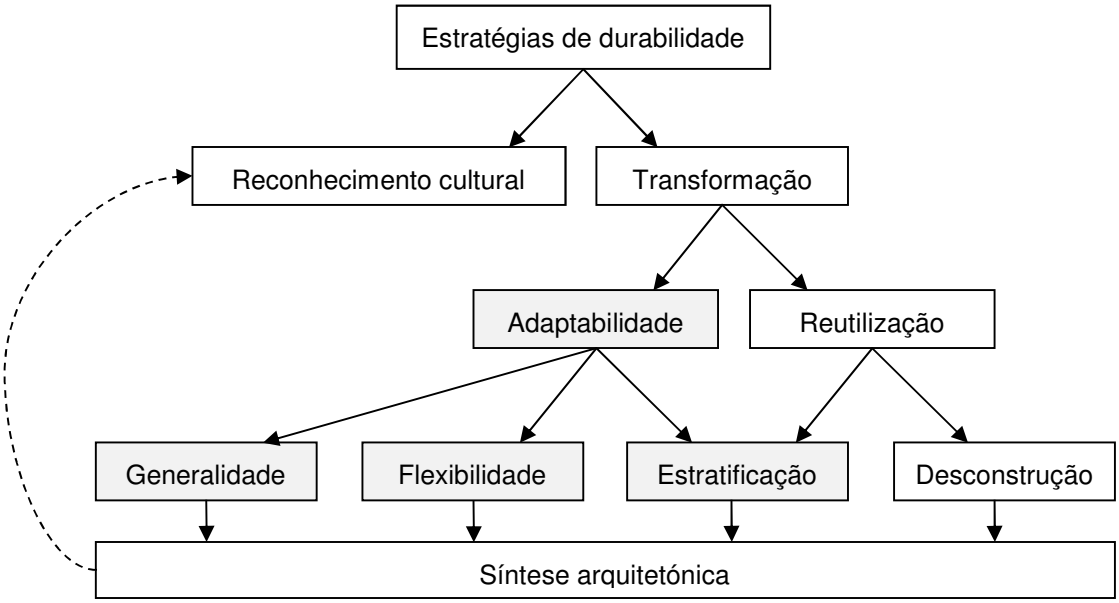


Figura 5.3 - O enquadramento da adaptabilidade nas questões de durabilidade, adaptado de Nielsen (2010)

A generalidade e a flexibilidade exigem um esforço adicional para criar condições mais abrangentes, ganhando-se robustez. Enquadram-se neste âmbito estratégias como redundância estrutural para permitir expansão do edifício (estrutura), espaços interiores multifuncionais (espaço interior), espaços técnicos para instalações (instalações), entre outras. Ao nível da envolvente, e numa lista que não pretende ser exaustiva, apontam-se algumas características que se preveem úteis num cenário de mudança (adaptado de Russel e Moffat (2001) e CEN (2010c)):

- Independência entre envolvente e estrutura, com interfaces projetados para a separação;
- Versatilidade da envolvente de forma a acomodar reconfigurações do espaço interior;
- Possibilidade de acesso ao sistema de fachada pelo interior e pelo exterior do edifício;
- Facilidade de desmontagem/demolição de elementos construtivos;
- Facilidade de acesso/desmontagem de tubagens e cabos;
- Provisão de espaço adicional para diferentes requisitos de tubagens/cabos numa mudança de uso;
- Provisões para possíveis equipamentos futuros.

Nesta lista, a questão da independência em função da adaptabilidade é transversal, sendo também claramente exposta no relatório da IEA "Annex 31 - Energy-Related Environmental Impact of Buildings" intitulado "Assessing buildings for adaptability" (Russel e Moffat, 2001), onde é indicado que o desacoplamento das camadas de forma a aumentar a capacidade de adaptação não pode interferir com a integração dos sistemas e materiais ao nível funcional, em termos de controlo de aquecimento, ventilação, humidade, iluminação, acústica, entre outos aspetos. O desafio é alcançar a interdependência funcional sem perder as características de independência que conferem a adaptabilidade, tais como redundância, robustez e facilidade de acesso para reparação e substituição.

Neste contexto, a estratificação é uma estratégia complementar que consiste numa sistematização concetual baseada na previsão da mudança e no ciclo de vida, definida ao nível da divisão do edifício em "camadas" ou "níveis"[19] (que na presente Tese se denominam de subsistemas), assim como a subdivisão desses subsistemas em camadas e elementos (que na presente Tese se denomina estratificação intra-subsistema). Esta sistematização parte do princípio de que estabelecendo uma relação entre componentes, ao nível da conceção e construção, ditada por vidas úteis semelhantes e pela independência, a capacidade de adaptação do edifício é maior, possibilitando mudanças com custos e recursos reduzidos. Esta estratégia complementa-se com tendências emergentes, como a desmontagem e a desconstrução, no sentido de aproveitar recursos através da sua reutilização ou reciclagem, tendências estas que já surgem nos "Requisitos básicos das obras de construção", nomeadamente na "Utilização sustentável dos recursos naturais" (Regulamento UE N.º 305/2011).

No domínio da estratificação (de subsistemas e intra-subsistema), destaca-se o trabalho de Habraken (1972), do grupo "Open Building" (CIB W104, 2006), de Leupen (2006), de Blok e van Herwijnen (2006) e de Durmisevic (2006). Estes autores partilham o entendimento da divisão do edifício através de um modelo simplificado composto por subsistemas definidos por afinidade de vida útil como ferramenta de análise. Em geral, ao nível do edifício, a estratificação segue os mesmos subsistemas referidos na Tabela 4.1 (Capítulo 4), e associa-se a critérios de hierarquia e dependência. Verifica-se que a definição das relações depende do que é considerado como objeto e objetivo da análise em função de um projeto ou contexto específico[20]. Como exemplo, Duffy (1990) aplicou esta estratégia aos edifícios de escritórios baseado nos períodos de desvalorização em função do mercado imobiliário (Tabela 5.5 e Figura 5.4 e Figura 5.5).

Tabela 5.5 – Os subsistemas e a sua vida útil no sector imobiliário de edifícios de escritórios

Subsistemas (camadas)	Descrição	Vida útil
Casca	Estrutura Envolvente	50 anos (Reino Unido) 35 anos (EUA)
Instalações	Aquecimento, ventilação, cablagens, tubagens, elevadores	15 anos
Cenário	Tetos falsos, paredes divisórias, iluminação, acabamentos	5 a 7 anos
Mobiliário/equipamento	Disposição de mobiliário e equipamento de escritório	Semanas/meses

[19] "Camadas" e "níveis" correspondem à tradução literal dos termos originais "layers" e "levels". No entanto, a tradução direta não é a mais apropriada pois a intenção no emprego dos termos originais é a de designar um conjunto de elementos que por sua vez são constituídos por diversas camadas ou níveis (no sentido construtivo). Neste sentido, opta-se pelo termo subsistema.

[20] Uma das ideias chave de Habraken (1972) consiste na definição dos diversos níveis que compõem o ambiente edificado em função da sua independência, eles são o "tecido urbano", a "construção base" e o "preenchimento". Este autor identifica níveis de responsabilidade das partes envolvidas através da definição de níveis de controlo/decisão. A comissão de trabalho CIB W104 "Open Building Implementation" (CIB W104, 2006) perpetua este entendimento dinâmico, desenvolvendo estratégias sobretudo ao nível da "construção base" e do "preenchimento". No caso de um edifício com inquilinos, esta separação dota as frações de maior capacidade de adaptação a diferentes funções e mudança de necessidades ao longo do ciclo de vida. A "construção base" é o nível mais alto (estrutura, envolvente, zonas e instalações comuns) e o "preenchimento" o nível mais baixo e dependente (divisórias interiores, equipamentos sanitários, alguns elementos de pavimento e da fachada). Se existir alteração no nível alto, o segundo inevitavelmente muda. No entanto, o segundo nível pode acomodar a mudança sem consequências no primeiro nível. Esta divisão permite, em termos conceptuais, a atuação sobre partes do edifício onde a mudança é previsível, neste caso no interior das frações, de uma forma facilitada. Leupen (2006) desenvolve os conceitos de "moldura" e "espaço genérico". Estes conceitos são de certa forma análogos aos definidos pelo grupo "Open Building", no entanto, assume que o que constitui a "moldura", ou seja, o permanente, pode variar em função da análise pretendida, isto é, da intenção do projeto, podendo ser constituída por qualquer um dos subsistemas (estrutura, envolvente, espaço interior e instalações).

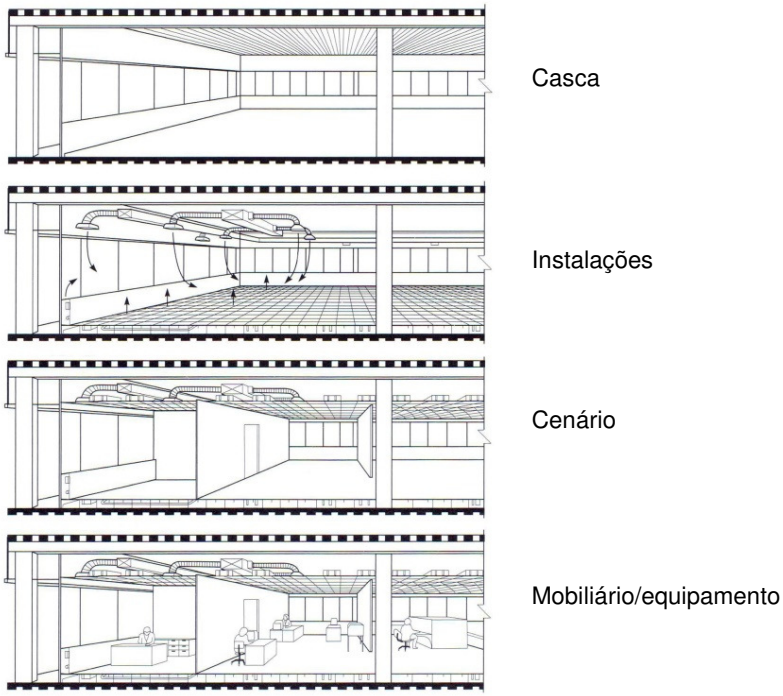


Figura 5.4 - Os subsistemas no sector imobiliário de edifícios de escritórios (Duffy, 1998)

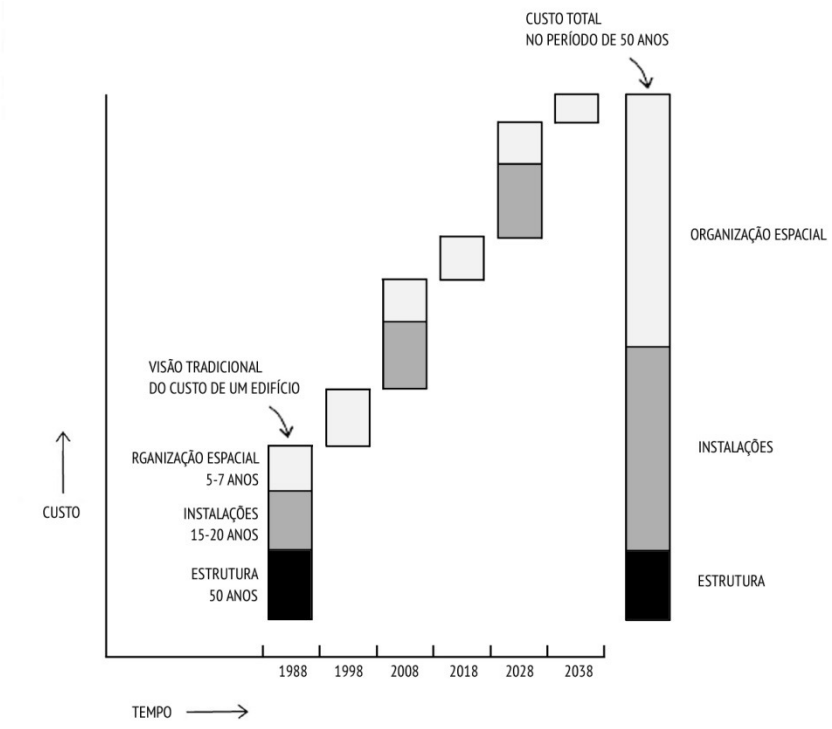


Figura 5.5 – Custo acumulado das mudanças num edifício de escritórios num período de 50 anos (Brand, 1994)

Neste exemplo a divisão resulta da necessidade dos edifícios de escritórios acomodarem requisitos de organização emergentes sem sofrerem modificações substanciais. Parte do princípio que os edifícios são permanentes, e que a sua organização e as atividades que suportam estão em constante mudança.

A adaptabilidade é assim entendida como um método ou processo baseado na independência dos elementos, abrangendo desse modo a incerteza e a possibilidade de incluir condicionantes futuras diversas, em cenários estabelecidos em função de contextos específicos. Os princípios para a avaliação da adaptabilidade segundo Russel e Moffat (2001) são os seguintes:

- Independência - os subsistemas ou camadas do edifício devem permitir a sua remoção ou atualização sem afetar o desempenho da articulação dos sistemas;
- Capacidade de atualização - escolher sistemas e componentes que antecipem ou acomodem requisitos de desempenhos mais severos;
- Compatibilidade de vida útil – não encapsular ou ligar de forma permanente componentes com vidas úteis muito distintas[21] e maximizar a vida útil das situações onde os requisitos de durabilidade são elevados como a estrutura ou o revestimento (revestimentos e fundações duráveis frequentemente favorecem reconversões em detrimento da demolição);
- Manutenção de registos (informação sobre os componentes e sistemas do edifício de modo a facilitar decisões futuras).

5.3.2.2 Estratégias e parâmetros de avaliação da adaptabilidade na integração de SSA

Na integração de SSA as estratégias para a adaptabilidade prendem-se com a composição da envolvente (e com a sua capacidade de decomposição). Relacionam-se sobretudo com questões de conceção construtiva e, em termos de sustentabilidade, com questões de balanço de ciclo de vida com repercussões nas dimensões social, económica e ambiental. Os cenários que se estabelecem são, neste sentido, fundamentais para considerar de forma adequada a capacidade de adaptação em projeto. No entanto, tal como referido anteriormente, a adoção de determinada estratégia é um meio para atingir determinados fins, e tem custos e benefícios, sendo que os custos da previsão de adaptabilidade deveriam ser inferiores aos de uma mudança tradicional numa solução menos adaptável (a diferença pode ser balançada contra a incerteza de quando será necessária a alteração) (Russel e Moffat, 2001).

Na integração de SSA na envolvente a estratificação divide-se em: níveis de controlo; subsistema; e intra-subsistema (envolvente).

a) Estratificação – níveis de controlo

Ao nível das decisões, a envolvente constitui uma situação particular, pois define a fronteira entre o domínio público e o privado. A sua modificação não é expedita (por comparação com uma parede divisória interior, e, no caso dos SSA, implica mão de obra especializada), necessita de uma licença (que dependendo da particularidade do edifício pode ter condicionantes diversas, a nível do PDM ou de outros instrumentos de ordenamento do território). Também possui características de expressão formal com importantes conotações culturais, sociais e de comunicação.

[21] Durmisevic (2006) aponta como estratégia para a desconstrução a separação física dos aspetos funcionais através de critérios de independência e intermutabilidade. Componentes e sistemas com ciclos de mudança diversos devem formar níveis temporalmente independentes, e elementos que possuem vida úteis desproporcionadas em relação ao conjunto que formam, devem ser facilmente acessíveis e substituíveis, assim como facilmente recicláveis. O estabelecimento de cenários é fundamental para esta análise. A autora, a partir da assunção que um edifício pode ser definido por conjuntos de materiais independentes, e que cada conjunto de materiais possui um elemento intermediário que funciona como elemento base de outras partes, refere que os edifícios podem ser definidos através de relações entre os intermediários. Como exemplo, ao nível do edifício a estrutura resistente é o elemento base para outros conjuntos, como fachada, cobertura, pavimentos, instalações, paredes divisórias, etc. Ao nível de um subconjunto, como a fachada, um elemento como uma subestrutura pode ser a base de todas as suas partes, tais como janelas, portas, isolamentos, acabamentos, etc. Num nível seguinte a janela seria o elemento base que liga todas as suas partes, e assim continuamente. Neste contexto, o tipo e geometria de ligação, e a sequência de montagem assumem grande importância. Os sistemas em aberto favorecem intermediários entre elementos, com fixações acessíveis que possibilitem o acesso e a substituição por oposição a configurações estáticas que frequentemente possuem ligações químicas e sequências de montagens dependentes.

b) Estratificação – subsistema

O subsistema envolvente é normalmente composto por partes de outros subsistemas, como a estrutura que partilha com o resto do edifício ou as instalações. Ou seja, a envolvente não constitui um subsistema completamente independente, assim como a sua interação com o todo, pois o seu desempenho influencia e determina os restantes sistemas do edifício. Blok e van Herwijnen (2006) definem de uma forma simples o grau de adaptabilidade do edifício pelas relações entre subsistemas. A adaptabilidade de um determinado subsistema é a sua capacidade de acomodar a mudança, com consequência nula ou mínima nos restantes subsistemas (que denominam de flexibilidade ativa) e a flexibilidade é a propriedade de um subsistema acomodar a mudança de outros subsistemas, sem a necessidade da sua mudança (que denominam de flexibilidade passiva ou robustez). Como exemplo, referem o caso de uma parede exterior portante (que combina os subsistemas estrutura e envolvente), nesta situação é impossível atuar num subsistema sem modificar o outro, não sendo assim totalmente flexível, podendo, no entanto, sê-lo em relação à organização espacial (divisórias interiores em relação à envolvente ou à estrutura).

c) Estratificação – intra-subsistema (envolvente)

De forma à envolvente possuir um desempenho satisfatório, esta é tendencialmente constituída por diferentes camadas apoiadas numa estrutura, cuja combinação responde aos requisitos a que está sujeita. O conceito de complementaridade, associado à conformação da envolvente através de várias camadas, garante a integração e inter-relação dos produtos (como exemplo, o desempenho acústico não será o resultado de uma camada específica, mas do conjunto de camadas que constitui a envolvente). Esta complementaridade resulta da dificuldade e complexidade de resolver todos os requisitos da envolvente num único elemento/componente (no entanto, a construção por camadas tende a tornar complexas as zonas de remate, e as relações entre subsistemas). Na seleção e articulação das camadas está a possibilidade de conferir a capacidade de adaptação à envolvente, ou seja, as relações entre camadas determinam o grau de adaptabilidade. Cada subsistema possui uma determinada vida útil geral, mas também é composto por camadas cujas vidas úteis são diversas. Por conseguinte, o modo de articulação das camadas e componentes pode potenciar um controlo maior na sua substituição ou na reformulação parcial ou total da fachada/cobertura. Ao decompor a envolvente num número de componentes independentes, esta torna-se mais flexível, porque pode facilmente ser reconfigurada/modificada de acordo com novos requisitos, ao mesmo tempo que o potencial de reutilização dos componentes aumenta.

Os SSA ao integrarem a envolvente devem ser articulados através dos pressupostos de independência e espaço. A avaliação da adaptabilidade da integração de SSA na envolvente dá-se sobretudo nas relações intra-subsistema[22]. Uma vez que, na sua maioria, os produtos BIPV e BIST conformam soluções de acabamento (revestimento final) ou de elementos exteriores à envolvente, a adaptabilidade das soluções construtivas tem de ser analisada a esse nível, devendo serem evitadas composições de difícil separação e que dificultem a manutenção, a reparação, a substituição ou a sua reformulação. Sob este ponto de vista, algumas soluções de integração de SSA na envolvente serão mais adaptáveis que outras.

Em síntese, os parâmetros de integração de SSA devem avaliar a adaptabilidade ao nível do utilizador, e ao nível da solução construtiva/funcional, em termos de independência, espaço, compatibilidade de vida útil, permitindo assim a comparação de soluções a estes níveis (Tabela 5.6).

[22] As definições de "construção base" e "preenchimento" do grupo "Open building" ajudam a suportar essa aptidão. Importa salientar o carácter relativo destas definições, ou seja, da relação relativa entre permanente e temporário que suportam, e transpô-las à envolvente. Assim, na envolvente de um edifício pode ser definida uma "envolvente base" e uma "envolvente de preenchimento". Esta separação conceptual poderá influir na conceção de edifícios novos, assim como na reformulação de envolventes existentes, e na sua avaliação.

Tabela 5.6 – Parâmetros de avaliação de adaptabilidade

Parâmetros	Descrição
Aspetos relacionados com o utilizador	Se os SSA configurarem sistemas operáveis pelo utilizador, devem permitir articular requisitos individuais.
Independência	O subsistema envolvente e as camadas que o compõem devem permitir a remoção ou atualização dos SSA e das suas partes complementares. Estratégias de estratificação: • Subsistema - a envolvente deve ser independente da estrutura, com interfaces projetadas para a separação; • Intra-subsistema - os SSA (geradores e partes complementares) devem ser independentes de outras camadas e componentes da envolvente, com interfaces projetados para a separação. Importância do tipo de fixação (reversível) e sequência de montagem (ligação ao ciclo de vida). Colocam-se as seguintes questões: Os SSA partilham elementos (funcionais, construtiva, formais) com outras camadas da envolvente? Que alterações provoca a substituição dos componentes SSA na fachada e no desempenho do edifício?
Espaço/capacidade de atualização	Seleção de sistemas e componentes e conceção de soluções que antecipem ou acomodem requisitos de desempenhos mais severos, através das seguintes estratégias: • Versatilidade e facilidade de reconfiguração (entre subsistemas, como permitir alterações no espaço interior, e ao nível da envolvente, como permitir o crescimento, redução ou alteração da camada composta pelos SSA); • Facilidade de acesso – fácil acesso aos SSA e partes complementares pelo interior e pelo exterior do edifício. Colocam-se as seguintes questões: A envolvente providencia espaço suficiente (e capacidade resistente) para suportar a alteração das suas camadas (possíveis SSA futuros)? Pode crescer? É fácil aceder aos SSA e partes complementares?
Compatibilidade de vida útil	Adequabilidade da solução à expectativa de vida útil dos SSA. Compatibilidade de vida útil entre o gerador, as partes complementares e o sistema construtivo da envolvente. Não encapsular ou ligar de forma permanente componentes com vidas úteis excessivamente distintas, e potenciar a vida útil nas situações onde os requisitos de durabilidade são elevados (como a estrutura). Os componentes construtivos devem estar hierarquicamente organizados e estruturados em camadas de acordo com os respetivos ciclos de vida.
Interferência funcional	Interdependência funcional sem perder as características de independência que conferem a adaptabilidade.

5.3.3 SAÚDE E CONFORTO

Nesta categoria enquadram-se e avaliam-se as características térmicas, a qualidade do ar interior, a acústica, o conforto visual e as características espaciais (a norma refere que as características

eletromagnéticas e a qualidade de água poderão ser previstas no futuro). Algumas destas áreas são ainda subdivididas nos aspetos relacionados com a construção do edifício e com os aspetos relacionados com o utilizador e os sistemas de controlo. No caso das características térmicas, do conforto visual, e da acústica, pela influência direta que alguns SSA podem estabelecer nestes campos, existem aspetos a considerar para além dos já abordados no Capítulo 4, nos pontos "4.6.3.3 Higiene e saúde" e "4.6.3.5 Proteção contra o ruído".

Relativamente às características térmicas, a norma (CEN, 2010c) alerta para os aspetos relacionados com o utilizador. Nesse sentido, se os SSA conformarem soluções de controlo de ventilação, destaca-se a capacidade do utilizador controlar a velocidade de ar e a sua distribuição, e se o controlo é manual ou automatizado. Relativamente à acústica, para além das questões tratadas anteriormente, a norma alerta ainda para o ruído de baixa frequência e vibrações que podem afetar a qualidade de vida, apesar de não existir consenso no modo de cálculo (as fontes de ruído de baixa frequência podem ser bombas, caldeiras, instalações elétricas, ventoinhas).

Em termos de conforto visual, no caso da utilização de SSA como dispositivos de sombreamento ou de filtragem de luz devem ser considerados o contributo da iluminação natural (fator de iluminação natural) e a conexão visual com o exterior. Nas questões relacionadas com o utilizador, salienta-se a capacidade do utilizador controlar o nível de luminosidade.

Tabela 5.7 – Saúde e conforto

	Parâmetros	**Descrição**
Térmica	Nível de controlo pelo utilizador	A norma refere que os utilizadores preferem possuir a capacidade de influenciar o ambiente interior. Nesse sentido, deve-se privilegiar a operabilidade de situações onde os SSA conformam sistemas que interferem com a temperatura, humidade e velocidade do ar.
Acústica	Ruído de baixa frequência e vibrações	Neste momento não existe consenso no modo de cálculo do ruído de baixa frequência. Contudo, deve-se verificar se as soluções conformadas pelos SSA podem originar ruídos de baixa frequência.
Conforto visual	Ligação visual ao exterior	Valorizar soluções onde os SSA permitam a ligação visual ao exterior.
	Nível de controlo do utilizador	Nível de controlo do utilizador em termos de iluminação natural e encandeamento.

5.3.4 PRESSÕES NA VIZINHANÇA

Nesta categoria é avaliada a pressão que o edifício exerce na vizinhança ao nível de ruído, emissões para o ar, solo e água, encandeamento/sombreamento e choques/vibrações. Como os SSA durante a fase de uso não geram ruído, vibrações ou emissões poluentes (solo, ar, água) – salvo determinados sistemas em caso de acidente – deste conjunto de parâmetros destacam-se apenas a avaliação do encandeamento que os sistemas podem gerar durante o dia pela sua superfície (apesar de, em geral, possuírem baixa refletividade), assim como o perigo de choque elétrico.

Os SSA vítreos são fabricados com revestimentos antirreflexo, pois destinam-se à absorção da radiação e, como tal, refletem percentagens mínimas da radiação solar. Contudo, existem critérios de desenho em relação ao encadeamento diurno da vizinhança a ter em conta. Como exemplo, nos Estados Unidos, a nível local, existem recomendações quanto à utilização de SSA em zonas urbanas, de forma a minimizar situações de encandeamento, quer para a vizinhança (ambiente construído), quer para condutores (vias públicas). Estas consistem, de uma forma geral, nos seguintes tipos de recomendações (adaptado de City of Chicago (2015) e City of Santa Barbara (2006)):

- Utilizar módulos com caixilhos e superfícies expostas não-refletivos;
- Os ângulos de reflexão dos painéis não devem estar orientados para janelas na vizinhança, zonas públicas e estradas;
- Prever medidas de mitigação do impacto, através da redução/bloqueio do encandeamento, recorrendo a vegetação ou outro tipo de elementos.

Em relação ao perigo de choque elétrico, no "Solar Boston Permitting Guide" (City of Boston, 2010), é referido que um sistema fotovoltaico não deverá operar durante uma falta de energia, a não ser que inclua uma bateria para armazenamento, uma vez que os sistemas fotovoltaicos podem fornecer energia à rede, criando perigo de choque para as equipas de manutenção, que a assume sem energia. Com o recurso a baterias os sistemas fotovoltaicos podem funcionar como fonte de alimentação ininterrupta (UPS) e fornecer energia a circuitos específicos do edifício durante uma falha na rede.

Tabela 5.8 – Pressões na vizinhança

Requisitos	
Encandeamento gerado pelos SSA e partes complementares	Orientações de projeto de modo a evitar encandeamento pelos SSA e partes complementares: • Utilizar painéis com revestimentos não-refletivos; • Os caixilhos e componentes expostos devem ter uma superfície não-refletiva; • Os ângulos de reflexão dos painéis não devem estar orientados para janelas na vizinhança, para zonas públicas e estradas; • Prever medidas de mitigação do impacto, através da redução/bloqueio do encandeamento, recorrendo a vegetação ou outro tipo de elementos.
Perigo de choque	Assegurar que o sistema fotovoltaico não fornece energia à rede durante falhas da rede.

5.3.5 MANUTENÇÃO

Para o desempenho social, na categoria da Manutenção, importam as consequências das operações de manutenção para os utilizadores e para a vizinhança. Há uma relação com o ciclo de vida e com fatores a serem incluídos na definição dos cenários. As operações de manutenção são uma expressão da qualidade do projeto do edifício, da sua construção, da facilidade de manutenção da sua estrutura, superfícies e serviços, assim como da qualidade do plano de manutenção. É avaliado a existência de

um plano de manutenção, os impactos na saúde e conforto dos utilizadores durante a manutenção, a frequência e duração da manutenção regular (e efeitos no desempenho do edifício), e a usabilidade do edifício durante as operações de manutenção.

A avaliação é baseada na vida útil e nos cenários relevantes e inclui fatores como a resistência a poluentes e corrosão, o efeito do clima, a limpeza necessária, a facilidade de acesso, e a acessibilidade sem desmontagem ou remoção de outros componentes.

Nesta categoria é necessário ter em conta a manutenção específica dos SSA e da sua relação com a envolvente, que depende do tipo de sistema, do seu modo de integração e das funções a desempenhar. Os cenários devem ser estabelecidos em função do conhecimento existente. No caso dos sistemas fotovoltaicos integrados, apesar de, em alguns estudos, a manutenção ser considerada nula com exceção da substituição do inversor (a meio da vida útil dos módulos), é necessário ter em conta o ciclo de vida da envolvente/edifício, durante o qual se verificará provavelmente a necessidade da substituição dos módulos. Assim como, em função das soluções construtivas e do tipo de aplicação, existirão operações de reparação, assim como operações de inspeção e limpeza que terão periodicidades diversas. Esta categoria é, deste modo, influenciada por todas as opções de integração.

Tabela 5.9 - Manutenção

Parâmetro	
Impacto da manutenção sobre a utilização do edifício	Frequência e tempo necessários para a manutenção regular; impactes na saúde e conforto dos utilizadores durante a manutenção; efeito no desempenho do edifício durante as operações de manutenção; e usabilidade do edifício durante a manutenção.

5.3.6 SEGURANÇA E PROTEÇÃO

Esta categoria engloba a capacidade do edifício resistir às ações climáticas presentes e futuras (chuva, vento, neve, etc.), às ações acidentais, assim como a segurança contra a criminalidade e ainda a segurança no caso de interrupção de abastecimento de serviços, como água ou eletricidade.

A resistência às ações acidentais e a segurança contra criminalidade relacionam-se diretamente com os "Requisitos básicos das obras de construção", tendo sido abordadas no Capítulo anterior nos pontos "4.6.3.2 Segurança contra incêndio" e "4.6.3.4 Segurança".

Dos aspetos relativos à resistência às alterações climáticas, considerando a utilização de SSA na envolvente, destaca-se a previsão dos detalhes construtivos que prevejam a resistência ao vento (infiltrações de ar, prevenção de desprendimento de revestimentos), à chuva (questões como a resistência à penetração da água e à capacidade de escoamento de coberturas e fachadas), à neve, a inundações, e à radiação solar (sombreamento, filtros UV, orientação). Estas questões relacionam-se com as tratadas no ponto "4.6.3.1 Proteção climática", neste caso com a particularidade de que as soluções a adotar devem contemplar a resistência às mudanças previstas nos modelos de alteração climática aplicáveis à região geográfica em questão, devendo ser avaliadas para a vida útil do edifício. Ou seja, parte-se do princípio que os eventos climáticos não permanecerão os mesmos durante o ciclo de vida do edifício, e que a previsão da capacidade de resistência a estes eventos é benéfica.

No caso de Portugal, os cenários de alteração climática foram analisados através dos projetos SIAM (Santos, Forbes e Moita, 2002), SIAM II (Santos e Miranda, 2006) e CLIMAAT II (Santos e Aguiar, 2006). Segundo o resumo da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, n. d.) até ao final do século XXI

prevê-se um aumento significativo da temperatura média em todas as regiões. Em Portugal Continental prevê-se o aumento da temperatura máxima no verão, entre 3 ºC na zona costeira e 7 ºC no interior, assim como um incremento da frequência e intensidade de ondas de calor. Nas regiões autónomas os aumentos da temperatura máxima deverão ser mais moderados, entre os 2 ºC e os 3 ºC na Madeira, e entre 1 ºC e 2 ºC nos Açores. Todos os índices climáticos relacionados com temperatura exibem também alterações do cenário climático. Prevê-se um grande aumento no número de dias quentes (máxima superior a 35 ºC) e de noites tropicais (mínimas superiores a 20 ºC), e a redução de índices relacionados com tempo frio, como dias de geada ou dias com temperaturas mínimas inferiores a 0 ºC. Em todo o território nacional são previstos efeitos decorrentes da alteração do clima térmico, designadamente os relacionados com o incremento da frequência e intensidade das ondas de calor, com o aumento do risco de incêndio, com a alteração das capacidades de uso e ocupação do solo e com implicações sobre os recursos hídricos.

No que se refere à precipitação, a incerteza é maior. No entanto, quase todos os modelos analisados preveem a redução da precipitação em Portugal Continental durante a primavera, verão e outono, com maior incidência nas regiões do Sul, e a sugestão de um aumento durante o inverno, devido ao aumento do número de dias de precipitação forte. Na Madeira estima-se igualmente uma grande redução da precipitação anual, até cerca de 30%, bem como alterações significativas na sua variabilidade inter-anual e sazonal, o que pode originar situações graves pela limitada capacidade de retenção hídrica local. Nos Açores prevêem-se alterações do ciclo anual da precipitação sem grande impacto nos valores totais.

A informação relativa aos cenários de alteração climática centra-se sobretudo ao nível de alerta de consciência pública, ou de sectores específicos, sobre os potenciais impactos e magnitude das consequências. As políticas e o conhecimento na avaliação de vulnerabilidade em contextos específicos, como o dos edifícios, são ainda nulos ou incipientes (Dave, Varshney e Graham, 2012). Contudo, podem ser tomadas decisões sem uma previsão precisa, recorrerendo a uma série de cenários plausíveis, e explorando os resultados e o risco (Snow e Prasad, 2011). Assim, a partir dos cenários podem-se definir estratégias de adaptação às alterações climáticas. Listam-se, como exemplo, algumas medidas relativas a ações climáticas especificas (Snow e Prasad, 2011, CEN, 2010c):

- Chuva - resistência acrescida à chuva incidente (maior intensidade de chuva incidente e de escoamento - oportunidade para recolha de água);
- Ventos fortes - melhorar a estanquidade ao ar da envolvente, medidas preventivas do destacamento de revestimentos ou de elementos da fachada;
- Neve - tipo de cobertura, medidas para permitir utilizadores libertarem a neve da cobertura, medidas para encerrar a envolvente contra a neve;
- Inundação - estanquidade à água da fachada e caves;
- Intensidade da radiação solar – minimização do impacto nas superfícies exteriores, desempenho térmico do edifício, sombreamento, filtros UV, orientação do edifício, compartimentação e zonificação (espaços de amortecimento), ar condicionado, sistemas de ventilação, resistência térmica.

Algumas questões energéticas em torno dos edifícios, e com influência no desempenho dos SSA, em função dos cenários de alteração climática, foram abordadas por Aguiar, Oliveira e Gonçalves (2006). Em geral, verifica-se uma menor necessidade de aquecimento de águas sanitárias e um aumento das necessidades de climatização ambiente (redução da procura nos meses frios, contraposta pelo aumento

das necessidades de arrefecimento nos meses quentes, aliado ao aumento da estação quente). O aumento da disponibilidade de energia nos meses estivais é modesto, mas suficiente para ter um impacto significativo no desempenho dos sistemas solares fotovoltaicos e térmicos, sobretudo nos térmicos pela diminuição das necessidades. Aumentos de temperatura na ordem dos 3 ºC a 4 ºC possuem reflexos evidentes na diminuição das necessidades energéticas para aquecimento ambiente, de águas domésticas e industriais, e no aumento das necessidades energéticas para o arrefecimento ambiente, rega e abastecimento de água. Estimou-se que o aumento das necessidades anuais de climatização para residências seria de 69% a norte, 100% no centro e 29% a sul e, para escritórios, de 62% a norte, 75% no centro e 47% a sul. Estas estimativas consideram apenas alterações do clima, contudo são amplificadas em 90% a 140% se incluírem cenários socioeconómicos com implicações nas características térmicas das construções, nos equipamentos e no comportamento dos utilizadores.

Neste contexto, as medidas que os regulamentos hoje impõem em termos de eficiência energética, visando a redução do aquecimento, poderão tornar-se contraproducentes a longo prazo, durante uma estação de arrefecimento demasiado longa (parte substancial dos edifícios existentes poderá sofrer os impactos de temperaturas médias mais elevadas). Os edifícios novos, e aqueles a reabilitar, podem ser concebidos com critérios que tenham em conta as alterações climáticas. Deste modo, tal como na categoria de adaptabilidade, as estratégias para adaptação às alterações climáticas são decisões de investimento. Snow e Prasad (2011) enumeram algumas estratégias, as quais, analisadas do ponto de vista da integração de SSA na envolvente, consistem em aumentar a resistência das fixações de modo a evitar danos devido à ação do vento, ou a conformação de soluções de controlo da temperatura, de forma direta ou indireta, através de estratégias passivas, tais como:

- Inércia térmica (pela conformação de determinadas soluções da envolvente);
- Inseridos em envidraçados de alto desempenho (de forma a reduzir a transferência de calor);
- Conformando sistemas de sombreamento (como palas, pérgulas ou *brise-soleil*);
- Ventilação (através de coletores de ar ou pela conformação de determinadas soluções da envolvente);
- Sistemas de arrefecimento através de energia solar, ou do contributo do pré-aquecimento do ar em sistemas AVAC (em solução de fachada ventiladas fotovoltaicas ou solares térmicas).

Relativamente à segurança de abastecimento, no caso de interrupção dos serviços públicos, a norma destaca medidas que garantam o abastecimento, entre as quais a presença de equipamento *backup* para aquecimento e eletricidade, sendo os sistemas fotovoltaicos apontados como uma das soluções. A tabela seguinte reúne os parâmetros de integração de SSA relativos à "segurança e proteção".

Tabela 5.10 – Parâmetros na integração de SSA

Parâmetro	**Descrição**
Resistência às alterações climáticas	As soluções construtivas que contemplem coletores/módulos devem suportar o desgaste climático (chuva, vento, neve, inundação, radiação solar). Devem ser projetadas e dimensionadas para a zona climática correspondente em função de modelos de alterações climáticas.
Segurança de interrupção no abastecimento	Utilização dos SSA como sistemas *backup* (abastecimento de eletricidade e aquecimento).

5.4 DESEMPENHO AMBIENTAL

A abordagem à avaliação do desempenho ambiental (CEN, 2010b, IPQ, 2015a) cobre todas as fases do ciclo de vida e é baseada em informação obtida a partir das Declarações Ambientais de Produto (DAP) e de outras fontes (entre as quais bases de dados e estudos de ciclo de vida), de modo a estimar a vida útil de um produto no contexto do edifício. A avaliação ambiental inclui produtos, processos e serviços relacionados com o edifício. Relaciona-se com os "Requisitos básicos das obras de construção" em certos aspetos relativos a "Higiene, saúde e ambiente", "Economia de energia e isolamento térmico" e "Utilização sustentável dos recursos naturais".

Os indicadores de desempenho ambiental presentes na norma consistem naqueles que possuem consenso científico relativamente aos métodos de cálculo (outros ainda sem acordo não são abrangidos, tais como toxicidade humana, ecotoxicidade, biodiversidade ou uso do solo). Os indicadores agrupam-se nas seguintes categorias: impacto ambiental; entrada de recursos; desperdício; e fluxos de saída do sistema (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 – Indicadores ambientais

INDICADOR	UNIDADE
Impacto ambiental	
Potencial de aquecimento global (considerado para um período de 100 anos)	kg CO_2 equiv
Depleção do ozono estratosférico	kg CFC 11 equiv
Acidificação do solo e água	kg SO_2^{--} equiv
Eutrofização	kg $(PO_4)^{3-}$ equiv
Formação de oxidantes fotoquímicos no ozono troposférico	kg Ethene equiv
Depleção dos recursos abióticos - elementos	kb Sb equiv
Depleção dos recursos abióticos – combustíveis fósseis	MJ/kg Sb equiv
Entrada de recursos	
Entrada de fontes de energia renovável[(a)], energia primária	MJ
Entrada de fontes de energia não renovável[(a)], energia primária	MJ
Entrada de materiais secundários	kg
Entrada de combustíveis renováveis secundários	MJ
Entrada de combustíveis não-renováveis secundários	MJ
Entrada de água	m^3
Desperdício	
Resíduos perigosos	kg
Resíduos não perigosos	kg
Resíduos radioativos	kg

Tabela 5.11 - (continuação)

INDICADOR	UNIDADE
Fluxos de saída	
Componentes para reutilização	kg
Materiais para reciclagem	kg
Materiais para recuperação de energia	kg
Energia exportada	MJ

(a) Não inclui energia usada como matéria-prima.

Os valores de cada um destes indicadores são calculados para cada módulo do ciclo de vida (Tabela 5.1). O período de estudo de referência coincide com a vida útil requerida (pelo cliente ou a nível regulamentar), e corresponde à fase de uso (B1 a B7). Deve ser indicado quando o período de estudo de referência difere da vida útil (sendo, neste caso, os valores dos impactes relativos à fase de uso multiplicados pela razão entre o período de estudo de referência e a vida de serviço requerida). Os valores da fase de produto (A1 a A3), da construção (A4 e A5) e do fim de vida (C1 a C4) são independentes do período de estudo de referência.

A fronteira do sistema define o que está incluído, ou não, na avaliação, seguindo o princípio de modularidade do ciclo de vida. Quando existem processos que influenciam o desempenho ambiental estes devem ser atribuídos ao módulo de ciclo de vida a que pertencem. Como exemplo os impactos da substituição de uma janela na fase de uso são atribuídos ao módulo "B4 – substituição", incluindo produção, transporte, uso de materiais acessórios, resíduos, reciclagem, etc. A tabela seguinte identifica alguns aspetos a considerar na integração de sistemas solares ativos na sua relação com a fronteira do sistema (envolvente do edifício) em função da modularidade do ciclo de vida.

Tabela 5.12 – Aspetos relacionados com os SSA ao longo do ciclo de vida

Módulos A1 a A3 – Fase de produto do "berço ao portão"
No caso dos SSA, a escolha do produto relaciona-se com o papel do sistema solar no edifício, tendo em conta as características do próprio sistema, avaliadas através da informação contida nas DAP.
Módulo A4 – Fase de construção - Transporte
O transporte de materiais e produtos da porta da fábrica para o estaleiro (inclui transporte, armazenamento intermédio e distribuição). A proximidade e o tipo de transporte (e o seu consumo) são importantes na seleção dos produtos.
Módulo A5 - Fase de construção – Processo de construção
A instalação dos produtos no edifício inclui todos os materiais auxiliares para a fixação, vedação e outros trabalhos acessórios à instalação dos SSA. Estes materiais e trabalhos não estão incluídos nas DAP dos produtos, este é um ponto pertinente na integração dos SSA na envolvente de edifícios.
Módulo B1 – Fase de uso - Produtos instalados em uso
Impacto ambiental dos componentes durante o seu uso normal.

Tabela 5.12 - (continuação)

Módulo B2 - Fase de uso - Manutenção
Todos os processos para manter o desempenho técnico e funcional, assim como as qualidades estéticas.
Módulo B3 - Fase de uso - Reparação
Todos os processos de reparação.
Módulos B4 e B5 – Fase de uso - Substituição e renovação/reabilitação
Depende da previsão de cenários. No caso dos SSA depende da previsão da substituição dos módulos/coletores e das restantes partes que compõem os sistemas solares.
Módulos B6 e B7 – Fase de uso - Energia operacional e consumo de água
Inclui a utilização de energia e água e os impactes relacionados. Quando o edifício possui sistemas de geração de energia integrados, se toda a energia gerada for utilizada em aspetos relacionados com o edifício (aquecimento, arrefecimento, ventilação, AQS, iluminação e sistemas de controlo), todos os impactes são atribuídos ao edifício. Se parte da energia é "exportada" então os impactes são atribuídos proporcionalmente. Se parte da energia é "exportada" e a restante é utilizada no edifício, mas em situações não relacionadas com o edifício (como eletrodomésticos), esta também é considerada como energia "exportada".
Módulos C1 a C4 – Fim de vida
Inclui todos os processos relativos ao fim de vida, nomeadamente: desmontagem, desconstrução e demolição (C1); transporte e armazenagem intermédia (C2); reutilização, recuperação e reciclagem (C3) - quando um fluxo de material sai da fronteira do sistema e tem um valor económico os impactes podem ser calculados no módulo D; e eliminação (C4).
Módulo D – Potencial de reutilização, recuperação e reciclagem (módulo opcional)
Os componentes para reutilização, e os materiais para reciclagem e para recuperação de energia são potenciais recursos para uso futuro.

Em relação aos sistemas solares ativos, a nível de produto ou de solução construtiva pré-fabricada, a informação relativa ao "Impacto ambiental" e à "Entrada de recursos" estará futuramente assegurada pela DAP de cada produto. Não estando esta informação correntemente disponível, estes indicadores, na sua generalidade, não são abordados no âmbito da presente Tese, devido à dependência de bases de dados internacionais e à sua manipulação implicar conhecimento especializado, o que, num processo de projeto de pequena ou média escala, torna a contabilização do impacto ambiental da integração de SSA uma atividade inviável, pois consumiria tempo e recursos não conciliáveis. Além de que, a informação existente gera muita incerteza devido à sua natureza (diversidade geográfica, grau de profundidade e detalhe da informação, qualidade dos dados) levando a que seja mais importante o grau de magnitude dos resultados que a exatidão destes (Ardente et al., 2005). Todavia, neste contexto, relativamente ao "Impacto ambiental", é possível comparar o Potencial de aquecimento global (PAG), recorrendo a estudos recentes investigação científica, ao nível das emissões de gases de efeito estufa da produção de energia pelos SSA (e por outras fontes de energia do edifício), assim como do *mix* energético nacional, tendo em conta uma ordem de magnitude. O benefício deve ser considerado em relação à energia produzida e à vida útil dos SSA no ciclo de vida do edifício.

Salienta-se que ao nível da investigação científica está claramente demonstrado que o *payback* energético e relativo às emissões dos SSA (considerado as emissões evitadas por comparação a uma

fonte de energia convencional) é reduzido e vantajoso em termos ambientais. Tal verifica-se nos sistemas fotovoltaicos (Figura 5.6 e Figura 5.7) (Frischknecht et al., 2015a, Kim et al., 2014) e nos sistemas solares térmicos (Ardente et al., 2005), que demonstram períodos de *payback* energético de 2 a 4 anos ou inferiores, dependendo do tipo de SSA e de uma série de variáveis - desde o *mix* energético do país onde são fabricados até à disponibilidade de radiação solar no local de instalação. Nesse sentido, refere-se que através da otimização dos processos de produção industriais, podem ser obtidos resultados significativos. Como exemplo, no edifício "Solaire" em Nova Iorque, foram utilizados módulos cristalinos com células feitas a partir de desperdício de silício, obtendo assim um EPBT (*energy payback time*) muito reduzido, e que se torna negativo ao considerar a carga ambiental evitada associada aos materiais que o sistema BIPV substitui (Perez et al., 2012). Salienta-se que nos últimos anos tem havido progressos consideráveis na produção de módulos fotovoltaicos, devido à economia de escala, e a melhorias na utilização dos materiais e nos processos industriais, o que levou não só a uma redução do impacto ambiental, mas também a uma redução de custo.

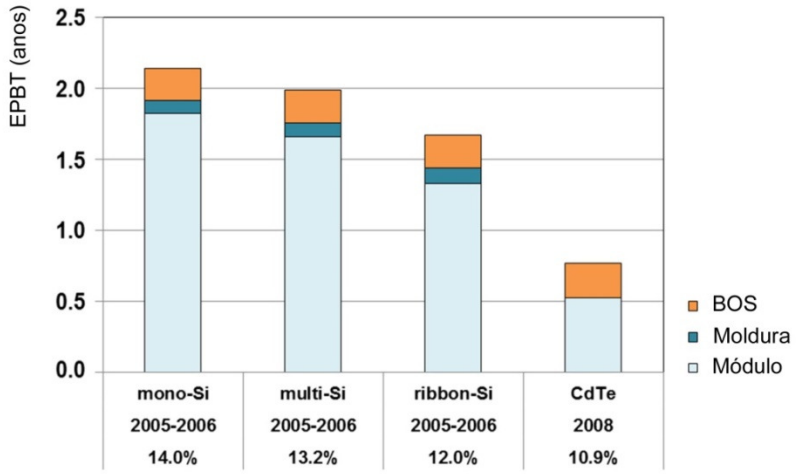


Figura 5.6 – *Payback* energético (EPBT) de sistemas fotovoltaicos em cobertura, estimado a partir de Inventários de Ciclo de vida em termos de produção e instalação na Europa, considerando uma irradiação de 1700 kWh/m^2/ano e um desempenho de 0.75 (Frischknecht et al., 2015a)

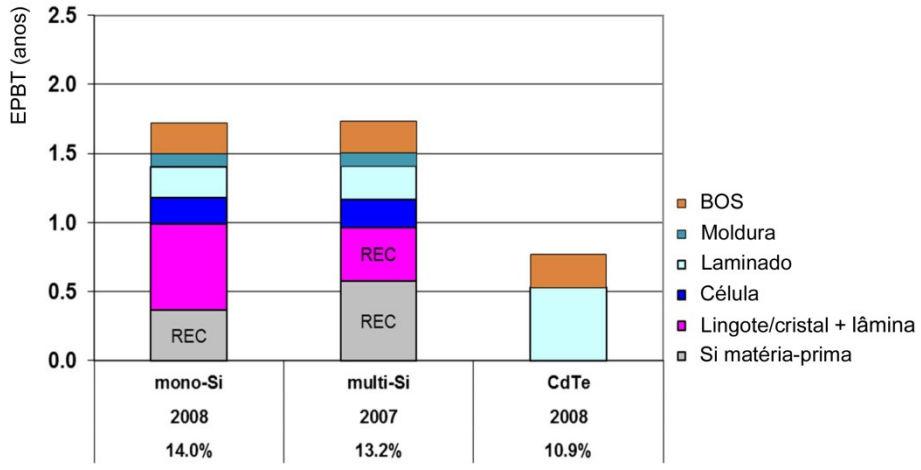


Figura 5.7 – *Payback* energético (EPBT) de sistemas fotovoltaicos em cobertura, estimado a partir de informação de Inventários de Ciclo de vida (LCI) não disponíveis publicamente para a produção e instalação europeia, baseado numa irradiação de 1700 kWh/m^2/ano e um desempenho de 0.75 (Frischknecht et al., 2015a)



Figura 5.8 – Módulos cristalinos com células feitas a partir de desperdício de silício integrados na fachada do edifício "Solaire", em Nova Iorque, nos EUA (Epstein, 2008)

Na fase de uso, o processo de geração de energia dos SSA dá-se sem ruído ou emissões poluentes (solo, ar, água). Nas restantes fases, estes aspetos devem ser avaliados, a partir das DAP de produto em conjunto com as soluções construtivas adotadas e o cenário de fim-de vida previsto.

Percebendo a energia incorporada nos SSA e o seu contributo como produtores de energia, numa perspetiva de ciclo de vida, podem ser criados mecanismos para o projeto de edifícios que possam explorar da melhor forma a sua integração. Nesse sentido, apesar do recurso às DAP ser importante, na medida em que possibilita o conhecimento dos produtos a um nível que não existia anteriormente de uma forma corrente e generalizada, essa informação não permite aferir como configurar ou melhorar o desempenho social, económico e ambiental, uma vez que a informação presente nas DAP não inclui os processos subjacentes ao transporte, montagem, manutenção, substituição e fim de vida dos produtos. Assim como também não inclui os restantes componentes acessórios e trabalhos requeridos para a montagem e exploração dos SSA na envolvente do edifício. Deste modo, os indicadores relativos ao "desperdício" e "fluxos de saída" são pertinentes para as questões de integração de SSA, do ponto de vista da seleção de produtos e componentes complementares, e da pormenorização construtiva das soluções. Estas questões são quantificadas em termos de desempenho ambiental através de todo o ciclo de vida e esse balanço ditará o seu peso ambiental.

Nesse sentido, deve ser dada prioridade à redução, reutilização e reciclagem. As soluções com menor impacto em função da quantidade de material utilizado, do seu potencial de reutilização, e da sua possibilidade de reciclagem, devem ser valorizadas. Neste âmbito, é necessário um conhecimento da tecnologia atual, e das suas perspetivas futuras, em relação à disponibilidade de matéria-prima e utilização de materiais perigosos. Como exemplo, em relação à disponibilidade de recursos, o silício é um material abundante na crosta terrestre. Em relação aos materiais perigosos, o cádmio é um metal pesado utilizado nas células CdTe em módulos de filme fino, na forma de um composto de telureto de cádmio estável, contudo, pode ser libertado para o ambiente em caso de incêndio ou eliminado de forma incorreta no fim de vida (Gattermann e Fischer, 2014). Em termos de reutilização e reciclagem, muitos dos materiais utilizados nas estruturas de suporte são recicláveis e possuem um fator de impacto ambiental elevado (aço, alumínio, cobre). Este é um campo se procura introduzir valor, relativamente aos módulos fotovoltaicos, um grupo de fabricantes criou uma organização denominada "PV Cycle", que promove a recolha e reciclagem dos sistemas no fim de vida útil.

Neste contexto, a dimensão ambiental relaciona-se com os "Requisitos básicos das obras de construção", designadamente nos aspetos de "Higiene, saúde e ambiente" onde se pretende que as obras de construção não exerçam um impacto excessivamente importante, durante todo o ciclo de vida, na qualidade ambiental nem no clima, abordando as questões de libertação e emissão de gases, radiações ou substâncias perigosas, assim como na "Utilização sustentável dos recursos naturais", onde se deve garantir uma utilização sustentável dos recursos, assegurando a reutilização e reciclabilidade dos materiais utilizados. Quanto mais se potenciar as soluções de integração em função dos parâmetros ambientais, maior será o benefício em termos de utilização de recursos e menor o seu impacto ambiental. Nesse sentido, algumas estratégias referidas ao longo deste Capítulo, como a facilidade de reparação e manutenção, e a capacidade de atualização, são atributos importantes a prever na fase de conceção. A questão da adaptabilidade (desempenho social) ganha uma dimensão importante, devendo ser articulada com as questões de desconstrução e de processamento para reutilização, recuperação e/ou reciclagem.

O modelo do objeto de avaliação ambiental da "sustentabilidade das obras de construção" permite a quantificação da massa e dos fluxos de energia, que deve ser estruturada em três temas: partes constituintes, processos relacionados, e energia operacional. A quantificação é baseada na descrição do objeto da avaliação (em projeto) ou nas quantidades existentes (em situações de edifícios existentes) e nos cenários definidos para cada módulo do ciclo de vida. A quantificação dos elementos e componentes do edifício, ao englobar os cenários, tem em conta as quantidades brutas, ou seja, inclui aspetos como desperdício, resíduos e substituições. Componentes com uma vida de serviço estimada idêntica à do edifício (ou que a exceda) não requerem substituições. Todos os componentes que requerem reparações e substituições devem ser definidos, sendo o número de substituições calculado utilizando a seguinte fórmula.

$$N_R(j) = \mathrm{E}\,[ReqSL/\mathrm{ESL(j)}]-1 \qquad (2)$$

$N_R(j)$ – número de substituições do produto *j*
E – função que arredonda o valor para número inteiro
ReqSL – vida útil requerida do edifício
ESL(j) – vida de serviço estimada do produto

Como exemplo de utilização da fórmula, considerando um período de referência de 80 anos e uma janela com uma vida de serviço de 25 anos, o resultado do cálculo do numero de substituições [(80/25)-1 = 2,2] é arredondado para 3. No entanto, para o cálculo do impacto ambiental são consideradas apenas 2 substituições, uma vez que a terceira substituição não deverá ocorrer na realidade. No caso dos SSA, que possuem um ciclo de vida mais curto que a generalidade da envolvente, deve-se prever o seu impacte sob a influência dos cenários definidos. As implicações decorrentes do estabelecimento de cenários são assim importantes para a fase de utilização em termos de manutenção, reparação, e substituição.

O desempenho ambiental liga-se a questões de integração funcional, construtiva e formal de modo intrínseco, no sentido em que cada configuração da envolvente possui um determinado desempenho resultante dessa configuração com consequências específicas em termos de ciclo de vida (manutenção, reparação, substituição, fim de vida). Para que a integração dos sistemas solares ativos resulte numa avaliação ambiental favorável, deve ter em conta o modo como as decisões de integração repercutem

na quantificação dos impactes relativos aos vários indicadores ambientais, em função dos cenários estabelecidos. As Tabelas seguintes reúnem os requisitos e parâmetros ambientais de integração de SSA.

Tabela 5.13 – Requisitos ambientais de integração de SSA

	Requisito	Descrição
Fluxos de saída	Perigo de contaminação	Perigo de contaminação por acidente (terramoto, incêndio). Depende do tipo de tecnologia e dos materiais constituintes.

Tabela 5.14 – Parâmetros ambientais de integração de SSA

	Parâmetros	Descrição
Impacto ambiental	Potencial de aquecimento global (Kg CO_2 equiv)	Quantificação dos gases com efeito estufa, comparado com outras fontes de produção do edifício e o *mix* energético nacional (ligação com a adequabilidade da solução de integração à expectativa de vida útil dos sistemas e à adaptabilidade).
Entrada de recursos	Balanço energético	Tempo necessário à produção da energia equivalente à despendida em todo o ciclo de vida (ligação com a adequabilidade da solução de integração à expectativa de vida útil dos sistemas e à adaptabilidade).
Desperdício e fluxos de saída	Energia exportada	Contabilização dos impactes relativos à energia exportada.
	Redução da utilização de recursos e do desperdício	Determinação das quantidades de materiais de modo a privilegiar soluções que reduzam a quantidade de materiais aplicados e a geração de resíduos no transporte e obra.
	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	Determinação das quantidades de materiais para reutilização, reciclagem e recuperação de energia com base nas soluções construtivas e cenários estabelecidos. Comparação das soluções em termos da adoção de materiais que possam ser reutilizados ou substituídos de modo sustentável e a possibilidade de reciclagem de materiais com um impacto ambiental elevado como alumínio, cobre ou aço são processos ambientalmente significativos (ligação adaptabilidade). Alguns fabricantes de sistemas fotovoltaicos preveem a recolha no fim do ciclo de vida (Projeto PVcycle).

5.5 DESEMPENHO ECONÓMICO

O desempenho económico (CEN, 2012) consiste na avaliação de determinados indicadores ao longo do ciclo de vida, nomeadamente:

- Custo;
- Valor financeiro (soma do custo e das receitas).

A normalização exclui a avaliação de risco e de retorno de investimento, e outros indicadores para os quais ainda não há consenso. Destes últimos destacam-se os "aspetos económicos consequentes", que expressam valor ou risco, e contemplam aspetos importantes na integração de SSA, como o nível de eficiência energética ou as provisões de adaptabilidade futura.

Os custos são associados aos módulos do ciclo de vida onde ocorrem, tal como sucede na avaliação ambiental. Na avaliação económica é também considerado o módulo A0, relativo à fase de pré-construção, e que engloba os custos associados à aquisição do terreno, honorários, taxas, entre outros. A nível informativo da distribuição dos custos ao longo do ciclo de vida, a norma fornece alguns exemplos, dos quais se apresentam aqueles que se relacionam com a integração de SSA (Tabela 5.15).

Tabela 5.15 – Desempenho económico ao longo do ciclo de vida

Fase		**Exemplos de custos**
Impactes e aspetos económicos antes da fase de utilização – módulos A0 a A5		
A0	Para avaliações efetuadas antes da escolha do sítio	Custo do terreno (exposição solar).
A1-A3	Fase de produto	Custos dos SSA à porta da fábrica.
A4	Transporte	Custos decorridos entre fábrica e local de obra.
A0-A5	Honorários profissionais	Honorários de especialidades específicas.
A5	Construção	Taxas e outros custos relativos à permissão de construir.
		Subsídios e incentivos - rendimentos relativos a energias renováveis e medidas de eficiência energética, incluindo empréstimos.
Fase de uso – módulos B1 a B7		
B2	Operação e manutenção	Subsídios e incentivos - rendimentos relativos a energias renováveis e medidas de eficiência energética, incluindo empréstimos.
		Gestão das instalações.
		Limpeza.
B3	Reparação	Reparação e substituição de pequenos componentes.
B4	Substituição	Receita de venda de componentes. Substituição de grandes componentes.
B5	Reabilitação/Renovação	Custo de adaptação ou reabilitação planeada.

Tabela 5.15 – (continuação)

Fase		Exemplos de custos
Fase de uso – módulos B1 a B7		
B6	Energia de operação	Custo/receita de energia.
B7	Água de operação	Custo da água.
Fim de vida – módulos C1 a C4 e D		
C1	Desconstrução	Desconstrução/desmontagem, demolição.
C2	Transporte	Custos de transporte associados com o processo de desconstrução e eliminação do ativo construído.
C1-C4	Fim de vida	Taxas de bens e serviços. Custos de aterro e de eliminação.
C3	Reciclagem	Custos ou receitas de reutilização, reciclagem e recuperação de energia no fim de vida.
D	Reciclagem	Receitas de venda.

Na norma é salientado que uma instalação de energia renovável integrada no edifício não pode ser justificada no desempenho económico sem ter em conta a receita da energia gerada e custos energéticos evitados decorrentes da fonte de energia renovável. A tabela seguinte reúne os parâmetros económicos na integração de SSA na envolvente. O custo depende do tipo de sistema, da sua dimensão, de ser um sistema personalizado ou corrente. Dada a importância da receita para o valor financeiro, assim como os custos energéticos evitados, descrevem-se de uma forma abrangente, mas não exaustiva os custos e benefícios inerentes aos sistemas solares ativos (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 – Parâmetros económicos na integração de SSA

Parâmetro	Descrição
Custos	Todos os custos associados ao ciclo de vida: • Custo do sistema (incluindo os respetivos componentes); • Custo da instalação (mão de obra); • Custo de operação e manutenção (inversor mais barato com o tempo); • Custo de fim de vida (eliminação/reciclagem).
Valor financeiro (custo/benefício)	Soma dos custos e das receitas (exemplo de benefícios): • Benefício da energia gerada (incluindo a recuperação de uma fração da energia térmica dissipada pelos PV); • Benefício dos materiais de construção evitados (revestimentos); • Benefício de subsídios e incentivos; • Sistema *backup*.

5.6 SÍNTESE DOS REQUISITOS E PARÂMETROS DE SUSTENTABILIDADE

Verifica-se que todas as categorias de desempenho social possuem indicadores específicos que permitirem ponderar a integração dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos. Algumas das categorias do desempenho social levantam questões que se relacionam entre si e, apesar do desempenho social, nesta fase da normalização, estar direcionado apenas para a fase de uso, não deixa de tocar em questões ligadas a todo o ciclo de vida.

As três vertentes da sustentabilidade são consideradas através da modularidade do ciclo de vida. No caso dos SSA, o facto de gerarem energia é tido em conta como benefício a nível ambiental e económico, sendo assim uma mais-valia, sobretudo em aspetos de entradas evitadas (energia e materiais). No aspeto social devem ser tomadas medidas que potenciem esses benefícios.

As operações de manutenção são transversais às três dimensões da sustentabilidade, com implicações a nível dos resultados, e são definidas por cenários a partir das configurações especificadas em projeto. As qualidades do sistema funcional que se projeta determinarão o desempenho ao longo do ciclo-de-vida, nas questões de substituição e adaptabilidade, determinantes face ao ciclo de vida e no domínio da incerteza. A adaptabilidade será o campo com o carácter mais qualitativo em termos de previsão, no entanto, através da definição dos cenários essa capacidade pode ser avaliada ambiental e economicamente, inclusive noutras categorias de desempenho social.

As Tabelas seguintes reúnem os requisitos e parâmetros definidos ao longo deste Capítulo.

Tabela 5.17 – Síntese dos requisitos da sustentabilidade das obras de construção

Pressões na vizinhança	
Encandeamento gerado pelos SSA e partes complementares	Orientações de projeto de modo a evitar encandeamento pelos SSA e partes complementares: • Utilizar painéis com revestimentos não-refletivos; • Os caixilhos e componentes expostos devem ter uma superfície não-refletiva; • Os ângulos de reflexão dos painéis não devem estar orientados para janelas na vizinhança, para zonas públicas e estradas; • Prever medidas de mitigação do impacto, através da redução/bloqueio do encandeamento, recorrendo a vegetação ou outro tipo de elementos.
Perigo de choque	Assegurar que o sistema fotovoltaico como *backup* não represente perigo de choque (ligação à segurança).
Ambiental	
Perigo de contaminação	Perigo de contaminação por acidente (incêndio, terramoto).

Tabela 5.18 – Síntese dos parâmetros da sustentabilidade das obras de construção

SOCIAL	
ADAPTABILIDADE	
Utilizador	Se os SSA configurarem sistemas operáveis pelo utilizador, devem permitir articular requisitos individuais.
Independência	O subsistema envolvente e as camadas que o compõem devem permitir a remoção ou atualização dos SSA e das suas partes complementares (ligação à manutenção). Estratégias de estratificação: • Subsistema - a envolvente deve ser independente da estrutura, com interfaces projetadas para a separação; • Intra-subsistema - os SSA (geradores e partes complementares) devem ser independentes de outras camadas e componentes da envolvente, com interfaces projetados para a separação. Importância do tipo de fixação (reversível) e sequência de montagem (ligação ao ciclo de vida).
Espaço/capacidade de atualização	Seleção de sistemas e componentes e conceção de soluções que antecipem ou acomodem requisitos de desempenhos mais severos, através das seguintes estratégias: • Versatilidade e facilidade de reconfiguração (entre subsistemas, como permitir alterações no espaço interior, e ao nível da envolvente, como permitir o crescimento, redução ou alteração da camada composta pelos SSA); • Facilidade de acesso – fácil acesso aos SSA e partes complementares pelo interior e pelo exterior do edifício (ligação à manutenção e ciclo de vida).
Compatibilidade de vida útil	Adequabilidade da solução à expectativa de vida útil dos SSA.
	Compatibilidade de vida útil entre o gerador, as partes complementares e o sistema construtivo da envolvente. Não encapsular ou ligar de forma permanente componentes com vidas úteis excessivamente distintas, e potenciar a vida útil nas situações onde os requisitos de durabilidade são elevados (como a estrutura). Os componentes construtivos devem estar hierarquicamente organizados e estruturados em camadas de acordo com os respetivos ciclos de vida.
Interferência funcional	Interdependência funcional sem perder as características de independência que conferem a adaptabilidade.
SAUDE E CONFORTO	
Térmica	Nível de controlo pelo utilizador (temperatura, humidade, velocidade do ar).
Acústica	Ruído de baixa frequência e vibrações.
Conforto visual	Ligação visual ao exterior. Nível de controlo do utilizador (iluminação natural, controlo de encandeamento).

Tabela 5.18 - (continuação)

MANUTENÇÃO	
Impacto da manutenção sobre a utilização do edifício	Impacto na saúde e conforto dos utilizadores durante a manutenção; frequência e tempo necessários para a manutenção regular; efeito no desempenho do edifício durante as operações de manutenção; e usabilidade do edifício durante a manutenção.
SEGURANÇA E PROTEÇÃO	
Resistência às alterações climáticas	As soluções construtivas que contemplem coletores/módulos devem suportar o desgaste climático (chuva, vento, neve, inundação, radiação solar). Devem ser projetadas e dimensionadas para a zona climática correspondente em função do modelo de alterações climáticas.
Segurança no abastecimento	Utilização dos SSA como sistemas *backup* (abastecimento de eletricidade e aquecimento).
AMBIENTAL	
Potencial de aquecimento global (Kg CO_2 equiv)	Quantificação dos gases com efeito estufa, comparado com outras fontes de produção do edifício e o *mix* energético nacional (ligação com a adequabilidade da solução de integração à expectativa de vida útil dos sistemas, e à adaptabilidade).
Balanço energético	Tempo necessário à produção da energia equivalente à despendida em todo o ciclo de vida (ligação com a adequabilidade da solução de integração à expectativa de vida útil dos sistemas, e à adaptabilidade).
Energia exportada	Contabilização dos impactes em relação à energia exportada.
Redução da utilização de recursos e do desperdício	Determinação das quantidades de materiais de modo a privilegiar soluções que reduzam a quantidade de materiais aplicados e a geração de resíduos no transporte e obra.
Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	Determinação das quantidades de materiais para reutilização, reciclagem e recuperação de energia com base nas soluções construtivas e cenários estabelecidos (ligação adaptabilidade).
ECONÓMICO	
Custo	Todos os custos associados ao ciclo de vida: • Custo do sistema (incluindo os respetivos componentes); • Custo da instalação (mão de obra); • Custo de operação e manutenção (inversor mais barato com o tempo); • Custo de fim de vida (eliminação/reciclagem).
Valor financeiro	Soma dos custos e das receitas (exemplo de benefícios): • Benefício da energia gerada (incluindo a recuperação de uma fração da energia térmica dissipada pelos PV); • Benefício dos materiais de construção evitados (revestimentos); • Benefício de subsídios e incentivos; • Sistema *backup*.

6

METODOLOGIA PARA A INTEGRAÇÃO DE SSA NA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS

6.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo visa a apresentação da metodologia para a integração de sistemas solares ativos na envolvente de edifícios. Neste âmbito são descritos os parâmetros de integração, os indicadores, e os requisitos e orientações que compõem a metodologia, assim como o processo da sua definição. Posteriormente é apresentado o processo de aplicação da metodologia em função da atividade de projeto.

6.2 CATEGORIAS E PARÂMETROS DE INTEGRAÇÃO

Os parâmetros para a avaliação da integração de SSA na envolvente foram definidos com base numa síntese dos temas abordados nos dois Capítulos precedentes. Estes parâmetros foram agrupados por afinidade temática em diversas "categorias de integração" e, por complementaridade, na definição de indicadores específicos. Desse exercício de síntese também resultou uma compilação de requisitos e orientações para a integração de SSA.

6.2.1 SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE INTEGRAÇÃO E SUSTENTABILIDADE

Alguns dos aspetos da integração "vitruviana" de sistemas solares ativos na envolvente de edifícios encontram correspondência nos indicadores sociais e ambientais da "sustentabilidade das obras de construção". Essas relações estão sumariamente ilustradas na Figura 6.1, que representa as dimensões de integração "vitruviana" e de "sustentabilidade das obras de construção" que possuem aspetos coincidentes ou complementares.

Essas relações são visíveis de uma forma mais detalhada na Tabela 6.1, na qual os aspetos de integração "vitruviana" (energética, multifuncional, construtiva e formal), descritos na coluna à esquerda, são cruzados com os aspetos correspondentes ou complementares do desempenho social e ambiental relativos à "sustentabilidade das obras de construção", apresentados na coluna à direita. A dimensão económica, assim como os aspetos relacionados com a "Operação, utilização e manutenção", surgem na coluna da integração (à esquerda) devido à sua transversalidade a todo o processo. Alguns dos requisitos compilados anteriormente (Tabela 4.20 e Tabela 5.17) surgem associados a determinados parâmetros devido à sua influência na caracterização e definição destes.

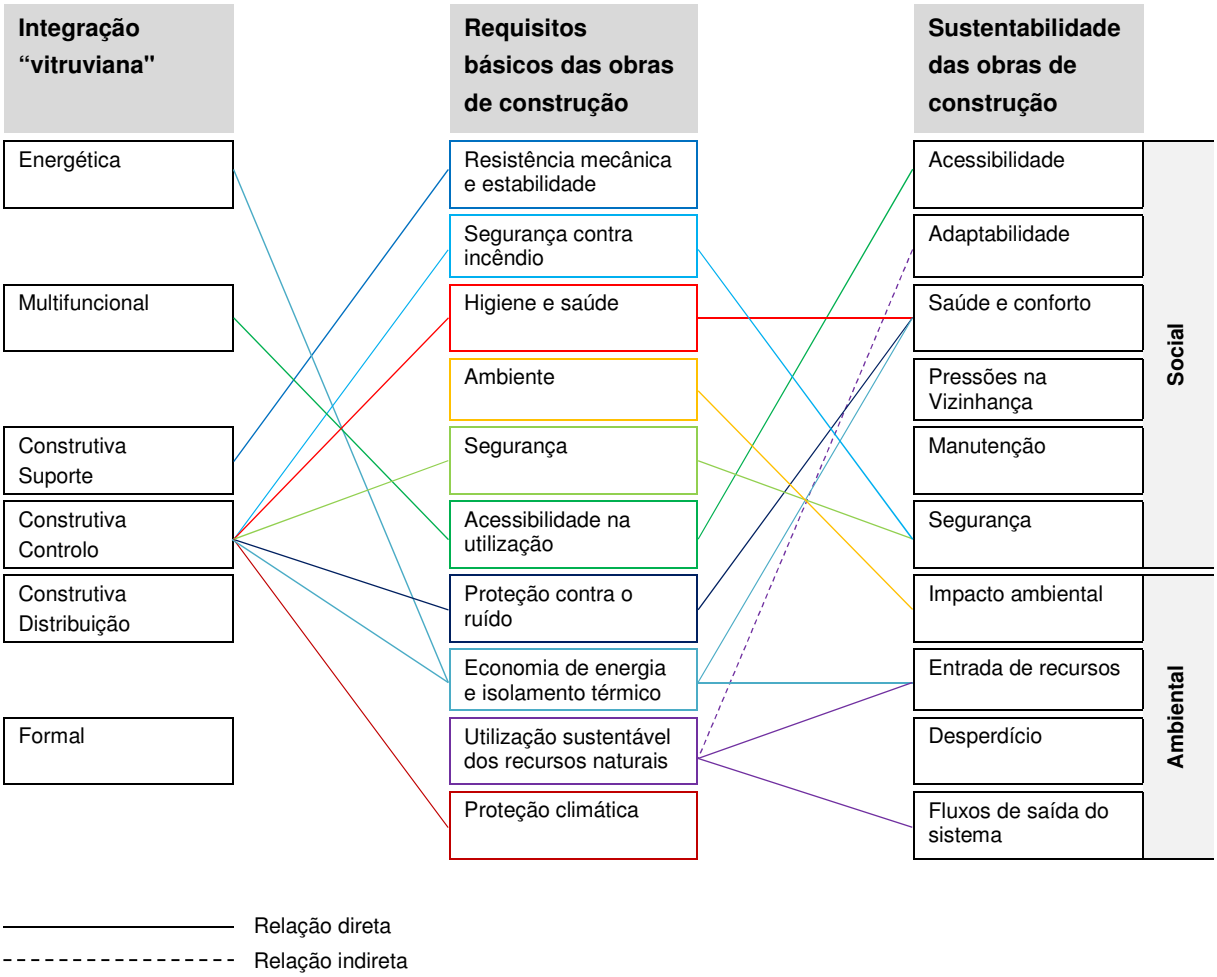


Figura 6.1 – Relação entre as dimensões de integração "vitruviana", os "requisitos básicos das obras de construção" e a "sustentabilidade das obras de construção"

Tabela 6.1 – Cruzamento dos parâmetros de integração "vitruviana" e de sustentabilidade

INTEGRAÇÃO "VITRUVIANA"	**SUSTENTABILIDADE SOCIAL E AMBIENTAL**[(a)] [(a)] *Os aspetos relacionados com a dimensão ambiental encontram-se destacados à cor laranja.*
INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA	
Produção de energia	
Produção energética anual.	
Relação entre a energia gerada e as necessidades.	
	Potencial de aquecimento global.
	Balanço energia (EPBT).
	Segurança e Proteção - Segurança abastecimento (backup eletricidade e aquecimento).

Tabela 6.1 - (continuação)

INTEGRAÇÃO "VITRUVIANA"	SUSTENTABILIDADE SOCIAL E AMBIENTAL
INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA	
Contributo para o desempenho energético	
Iluminação natural (ganhos solares, filtragem de luz, sombreamento, proteção solar). Isolamento térmico (g-value, U-value, temperatura radiante das superfícies). Ventilação (qualidade do ar). Outros.	Inclui questões de "Saúde e conforto", relativas à iluminação natural, proteção solar, e térmica (temperatura radiante das superfícies).
Morfogénese	
Posicionamento adequado (orientação e inclinação). Sombreamento. Sujidade. Temperatura. Coeficiente reflexão.	Relação com "Pressões na vizinhança" relativamente ao possível encandeamento gerado pelos SSA e partes complementares (influência do posicionamento e da acumulação de sujidade na periodicidade da manutenção).
INTEGRAÇÃO MULTIFUNCIONAL	
Contributo para o desempenho não energético	
Proteção climática.	Segurança e Proteção – resistência às alterações climáticas.
Proteção contra o ruído - Atenuação de ruído aéreo pela envolvente.	Saúde e conforto – ruído de baixa frequência e vibrações.
	Saúde e conforto – ligação visual ao exterior.
	A adaptabilidade não deve causar interferência funcional.
Operação, utilização e manutenção	
Acessibilidade - universalidade da operação de interruptores e sistemas de controlo.	Adaptabilidade – sistemas operáveis pelo utilizador devem articular requisitos individuais. Saúde e conforto – Térmica (temperatura, humidade, velocidade do ar). Conforto visual – ligação visual ao exterior (iluminação natural, encandeamento).
Manutenção**.**	

Tabela 6.1 - (continuação)

INTEGRAÇÃO "VITRUVIANA"	SUSTENTABILIDADE SOCIAL E AMBIENTAL
INTEGRAÇÃO CONSTRUTIVA	
Grau de integração (adição, acoplagem, integração).	Influência na manutenção.
Solução construtiva (suporte e controlo). Fixações, estruturas de suporte e elementos de correlação, adequação das camadas dos SSA em termos de resistência (componente). Compatibilização construtiva das características dos SSA, na moderação das ações e fluxo de energia.	Adaptabilidade – Independência, capacidade de atualização e compatibilidade de vida útil.
	Segurança e Proteção – resistência às alterações climáticas, resistência às ações acidentais, segurança pessoal, contra intrusão e vandalismo.
	Influência na manutenção.
Distribuição	
Acessibilidade (manutenção e substituição).	Influência na manutenção e pressões na vizinhança – perigo de choque e interferência funcional.
	Manutenção – Impacto da manutenção sobre a utilização do edifício.
Aspetos relativos ao estabelecimento de cenários	
Ligação às soluções construtivas, facilidade de acesso, facilidade de reconfiguração.	Adaptabilidade – capacidade de atualização e compatibilidade de vida útil.
	Redução da utilização de recursos e do desperdício.
	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia.
INTEGRAÇÃO FORMAL	
Integração contexto urbano.	Ligação às pressões na vizinhança – encandeamento.
Coordenação dimensional e visual da superfície coletora.	Influência na manutenção.
Coordenação dimensional e visual do módulo/coletor.	
Coordenação dimensional e visual das partes complementares.	
BALANÇO ECONÓMICO	
Custo (associado às fases do ciclo de vida).	
Valor financeiro (custo + receitas).	Energia exportada. SSA como *backup.*
	Receitas energia renovável e custos de energia evitados.

Com base no exercício de síntese das sobreposições e interações entre os parâmetros da integração "vitruviana" e da "sustentabilidade das obras de construção", traduzido esquematicamente na Figura e Tabela anteriores, foram definidas 7 "categorias de integração":

- A – Integração energética;
- B – Integração morfológica;
- C – Integração multifuncional;
- D – Integração construtiva;
- E – Integração formal;
- F – Integração temporal;
- G – Balanço económico.

As questões morfogenéticas, consideradas num sentido lato, possuem interações com aspetos da integração energética e formal. Nesse sentido, aos parâmetros previamente descritos nesse contexto é-lhes atribuído uma categoria autónoma denominada "Integração morfológica". Do mesmo modo, os aspetos relativos ao estabelecimento de cenários são reunidos na "Integração temporal".

Os parâmetros resultantes, agrupados por afinidade em "categorias de integração", encontram-se descritos na tabela seguinte. Estes parâmetros permitiem avaliar variantes de projeto nas fases de conceção, ou seja, atribuir um valor às possíveis soluções, auxiliando a tomada de decisão. No "Anexo A" é apresentada a descrição detalhada de cada parâmetro, assim como os respetivos critérios de valorização.

Tabela 6.2 – Categorias de integração e respetivos parâmetros (descrição detalhada no Anexo A)

Categorias de integração		**Descrição**
A	**Integração energética**	
A1	Produção energética anual	Valor total anual da energia produzida pelos SSA (kWh/a, kWh/a/m^2).
A2	Balanço energético	É avaliado o contributo dos SSA face às necessidades energéticas (aquecimento, arrefecimento, AQS, iluminação) através do conceito de balanço energético nulo.
A3	Energia incorporada	Tempo necessário (anos) à produção de energia equivalente à energia despendida em todo o ciclo de vida dos SSA, através dos indicadores "EPBT – Energy payback time" e "ERF – Energy return factor".
A4	Potencial de aquecimento global	Quantificação das emissões dos gases com efeito estufa, por comparação com outras fontes de produção do edifício e o *mix* energético nacional (kg CO_2 equiv).
A5	Segurança abastecimento	É avaliada a capacidade do edifício manter as funções e serviços no caso de interrupção da rede, através da utilização dos SSA como equipamento *backup* de energia elétrica e térmica.
A6	Contributo para o desempenho energético	Contributo arquitetónico e bioclimático das soluções de integração dos SSA no desempenho energético.

Tabela 6.2 - (continuação)

Categorias de integração		Descrição
B	**Integração morfológica**	
B1	Posicionamento – orientação e inclinação	O posicionamento dos SSA é avaliado em função da influência da orientação (azimute) e inclinação na geração de energia.
B2	Posicionamento – sombreamento	O posicionamento dos SSA é avaliado em função da influência do sombreamento na geração de energia.
B3	Posicionamento – acumulação de sujidade	O posicionamento dos SSA é avaliado em função da sua capacidade de autolimpeza.
B4	Coeficiente reflexão	Incremento da radiação incidente na superfície dos SSA pela utilização de superfícies refletivas no edifício ou em áreas adjacentes.
B5	Controlo de temperatura	Previsão do controlo da temperatura de funcionamento dos SSA.
C	**Integração multifuncional**	
C1	Contributo para o desempenho não energético	Contributo para o desempenho não energético, através da adequação das características dos SSA na compatibilização construtiva, atribuindo qualidades e funções à envolvente.
C2	Operabilidade e utilização	Universalidade na operação de interruptores e sistemas de controlo e capacidade de articulação de requisitos individuais.
D	**Integração construtiva**	
D1	Grau de integração	Ponderação dos SSA como pré-requisito para a integridade funcional da envolvente.
D2	Solução construtiva - distribuição	Compatibilização construtiva do circuito solar e das partes complementares.
D3	Solução construtiva - adaptabilidade	Adaptabilidade das soluções, em função da necessidade de substituição dos SSA e de acordo com os cenários estabelecidos.
E	**Integração formal**	
E1	Integração no contexto urbano	Integração no contexto urbano relativamente a questões de materialidade e acabamento.
E2	Superfície	Coordenação dimensional, geométrica e morfológica da superfície geradora de energia com a restante envolvente.
E3	Componentes – módulos e coletores	Coordenação dimensional, geométrica e morfológica do módulo/coletor.
E4	Componentes - partes complementares	Coordenação dimensional do circuito solar e partes complementares.

Tabela 6.2 - (continuação)

Categorias de integração		Descrição
F	**Integração temporal**	
F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	Quantificação dos materiais utilizados de modo a privilegiar soluções com menor impacto em termos de quantidade de materiais aplicados e da geração de resíduos no transporte e obra.
F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	Determinação das quantidades de materiais para reutilização, reciclagem e recuperação de energia com base nas soluções construtivas e cenários estabelecidos.
F3	Manutenção - utilização	Impacto das ações de manutenção sobre a utilização do edifício em função das soluções conformadas pelos SSA.
F4	Manutenção - acessibilidade	Facilidade de acesso para manutenção e reparação dos SSA e partes complementares.
G	**Balanço económico**	
G1	Custo	Todos os custos inerentes ao longo do ciclo de vida (€).
G2	Valor financeiro	Balanço entre o custo e as receitas ao longo do ciclo de vida (€).
G3	Retorno do investimento	Período de retorno simples do investimento.

As "categorias de integração" reúnem 27 parâmetros qualitativos e quantitativos. A definição dos parâmetros consistiu na procura daqueles que permitissem uma comparação entre soluções, do ponto de vista da integração. Como exemplo, a "energia exportada" não foi considerada como parâmetro de avaliação, pois não deve ser valorizada neste contexto específico, uma vez que se trata de uma opção que não influi na integração de uma forma direta. No entanto, possui repercussões a nível económico e ambiental que devem ser tidas em conta.

A integração de SSA na envolvente depende não só das suas características enquanto produtos de construção, mas também da forma como são articulados na envolvente, pois poderão conformar soluções multifuncionais e complexas. Nesse sentido, estabeleceram-se alguns indicadores específicos com base na complementaridade de determinados parâmetros (Figura 6.2 e Tabela 6.3), como a Morfogénese que concilia aspetos de integração energética, morfológica, funcional e formal. A determinação de cada indicador resulta da soma da classificação dos respetivos parâmetros de integração (quando uma categoria de integração é considerada por inteiro, como no caso da "B – integração morfológica" no indicador "Morfogénese", divide-se a soma dos resultados pelo numero de parâmetros em avaliação nessa categoria).

Para além da definição das "categorias de integração", dos seus respetivos parâmetros, e dos indicadores referidos, a análise das questões de integração "vitruviana" e da "sustentabilidade das obras de construção" também permitiu a compilação de uma lista de requisitos e orientações (Tabela 6.4). Estes requisitos e orientações constituem aspetos não determinantes ao nível da avaliação comparativa da integração, pois consistem em aspetos que devem ser atendidos (caso se apliquem a determinado projeto), independentemente da solução, como é exemplo resistência mecânica dos SSA. Ou ainda, porque alertam para questões que podem ser corrigidas de forma facilitada, não se

justificando uma valorização nestes termos (como é exemplo a necessidade de prever sinalética informativa da existência de uma instalação fotovoltaica no edifício). Todavia, alguns dos requisitos foram incluídos na definição dos parâmetros de integração, como é exemplo a "Acessibilidade a interruptores e sistemas de controlo" no parâmetro "C2 – Operabilidade e utilização".

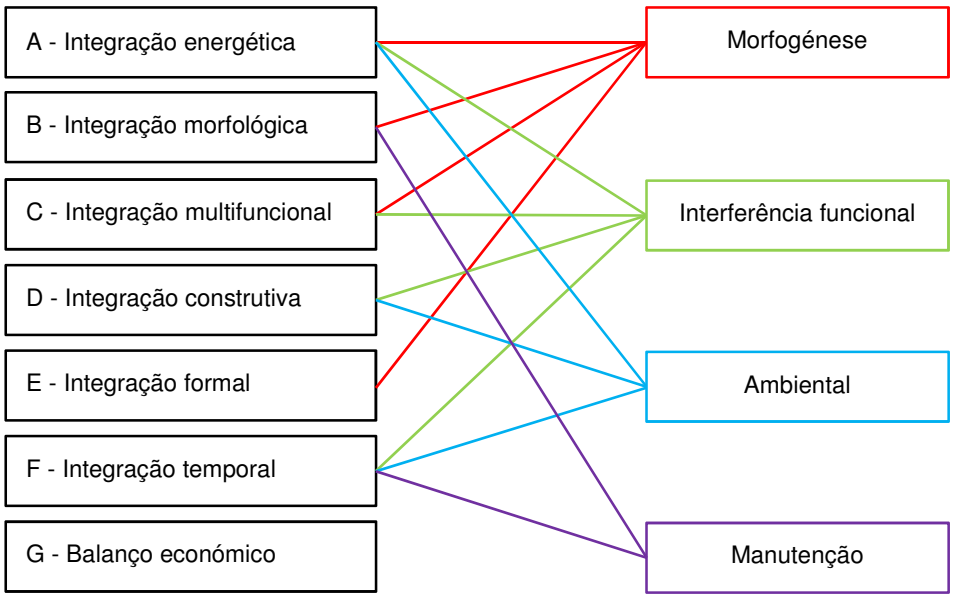


Figura 6.2 – Relação das categorias de integração com os indicadores

Tabela 6.3 – Indicadores de integração e as categorias e os parâmetros que os definem

Indicadores	Parâmetros
Morfogénese	A6 - Integração energética - contributo para o desempenho energético B - Integração morfológica C1 - Integração multifuncional - contributo para o desempenho não energético E - Integração formal
Interferência funcional	A6 - Integração energética - contributo para o desempenho energético C - Integração multifuncional D - Integração construtiva F3 – Manutenção - Utilização
Ambiental	A - Integração energética D3 – Solução construtiva - Adaptabilidade F1 – Redução da utilização de recursos e do desperdício F2 – Reutilização, reciclagem e recuperação de energia
Manutenção	B3 – Posicionamento – Acumulação de sujidade F3 - Manutenção - Utilização F4 – Manutenção - Acessibilidade

Tabela 6.4 – Requisitos para a integração de SSA na envolvente

Acessibilidade na utilização	
Acessibilidade a interruptores e sistemas de controlo	Devem ser previstos e universalmente operáveis os interruptores e sistemas de controlo relacionados com o funcionamento da envolvente, no caso dos SSA conformarem soluções que se enquadrem nessas operações. Segundo o Regime de acessibilidade aos edifícios (Decreto-Lei n.º 163/2006), os interruptores e sistemas de controlo devem: • Estar situados de modo que exista uma zona livre para operação (de acordo com a secção 4.1 - zonas de permanência); • Estar a uma determinada altura, medida entre o nível do piso e o eixo do comando (de acordo com a secção 4.2 - alcance); • Ter uma forma fácil de agarrar com uma mão e que não requeira uma preensão firme ou rodar o pulso; • Poder ser operado sem ser requerida uma força superior a 22 N; • Ter pelo menos uma das suas dimensões não inferior a 0,02 m.
Suporte (resistência mecânica e estabilidade)	
Fixações, estruturas de suporte e elementos de correlação	A pormenorização das fixações e juntas deve ser compatível com as expansões dos sistemas e de outros materiais da envolvente. Os materiais da envolvente em contacto com os sistemas solares ativos devem suportar as suas temperaturas de funcionamento elevadas.
Adequação das camadas dos SSA em termos de resistência	A escolha do tipo de SSA é adequada aos requisitos da envolvente que deve cumprir em termos de resistência.
Segurança contra incêndio	
Propagação	Não instalar módulos fotovoltaicos próximo de locais perigosos ou potenciais fontes de gases ou outras substâncias inflamáveis.
	Penetrações externas vedadas contra a propagação.
Segurança da equipa de intervenção	Sinalização de sistemas fotovoltaicos (BIPV).
	Garantir espaço de manobra na cobertura (faixas de 30 a 50cm).
Segurança e proteção	
Segurança no contacto	Segurança dos utilizadores ao toque. Perigo de choque, assegurar que o sistema PV como *backup* não represente perigo de choque no caso de falha da rede pública.
Segurança pessoal	Superfícies resistentes ao *graffiti.*
Resistência às ações acidentais	Prevenir o estilhaçamento de vidro (coletores e módulos vítreos), especificação do tipo de vidro, soluções construtivas que impeçam o contacto.
Resistência às alterações climáticas	Soluções construtivas adequadas aos cenários de alteração climática (ventos fortes, neve, chuva, inundação, intensidade da radiação solar, temperaturas frias, etc.).

Tabela 6.4 - (continuação)

Pressões na vizinhança	
Encandeamento gerado pelos SSA e partes complementares	Orientações de projeto de modo a evitar encadeamento pelos SSA e partes complementares: • Utilizar painéis com revestimentos não-refletivos; • Os caixilhos e componentes expostos devem ter uma superfície não-refletiva; • Os ângulos de reflexão dos painéis não devem estar orientados para janelas na vizinhança, para zonas públicas e estradas; • Prever medidas de mitigação do impacto, através da redução/bloqueio do encandeamento, recorrendo a vegetação ou outro tipo de elementos.
Ambiental	
Perigo de contaminação	Perigo de contaminação por acidente (incêndio, terramoto).

6.2.2 A RELATIVIDADE ENTRE PARÂMETROS

O conjunto de componentes que compõem o subsistema envolvente possui uma interdependência física e funcional e uma disposição formal (que confere ritmo, textura, transparência, opacidade, cor, volume, entre outras qualidades). Existe uma quantidade ilimitada de componentes que se podem combinar de formas virtualmente infinitas. A coerência de conjunto é conferida através de um exercício de composição - o projeto.

Deste modo, o projeto é uma atividade que estabelece compromissos e otimiza relações entre condicionantes diversas e por vezes conflituosas. Naturalmente, a integração, em termos absolutos, é um ideal. Como salienta Rush (1991), num extremo da integração estará um edifício cujos componentes, que desempenham múltiplas funções, são inseparáveis. E no extremo oposto estará um edifício cujas partes são totalmente independentes, mas funcionalmente coordenadas. Estes dois extremos apresentam desvantagens. A primeira hipótese impede de forma definitiva a versatilidade do conjunto, enquanto a segunda apresenta uma redundância exagerada. Efetivamente deve-se procurar um nível de integração relativo, num exercício que deve balançar o maior número possível de condicionantes e requisitos.

De modo a atingir um nível de integração elevado através da combinação estratégica de sistemas e componentes, implantados de acordo com os seus atributos compartilhados de espaço, função e imagem, é necessária uma ponderação na decisão. Nesse sentido, os parâmetros de integração definidos não são estanques e absolutos. Como exemplo, soluções de integração que potenciem a acumulação de sujidade afetam a geração de energia, mas também a manutenção no que respeita à periodicidade de limpeza. Ou, o controlo de encandeamento pela seleção e disposição dos SSA, de modo a reduzir a pressão na vizinhança, também poderá influenciar a geração de energia. Deste modo, um nível de integração elevado não corresponde a uma resposta positiva de todos os parâmetros, nem à resposta isolada a determinado requisito, mas a uma relação de compromisso. Ou seja, na solução global, a prestação em relação a um determinado parâmetro é relativa.

Por conseguinte, a importância de cada parâmetro é variável de acordo com a especificidade de cada projeto. Neste contexto, o conhecimento e experiência do coordenador de projeto são importantes[23], e os requisitos e objetivos definidos pela equipa projetista e/ou pelo dono de obra fundamentais, pois deverão determinar o peso de cada parâmetro na avaliação final[24]. O balanço final dos parâmetros de integração irá definir o nível de integração de SSA na envolvente de acordo com os objetivos definidos. Adicionalmente, poderão ser definidos critérios condicionais em função dos objetivos pretendidos, tais como "mínimo custo associado ao máximo benefício energético". Apesar de são ser atribuída uma valorização às "categorias de integração", uma vez que estas apenas reúnem os diferentes parâmetros de integração por afinidade temática, determinada categoria poderá ser valorizada pelo seu conjunto de parâmetros, se tal estiver de acordo com os objetivos da avaliação.

Neste contexto, um aspeto importante a considerar consiste na determinação do contributo na geração de energia renovável por parte dos sistemas solares ativos, e que parâmetros são garantidos por estes ou por outras eventuais fontes de energia renovável. Como exemplo, os SSA podem não constituir um sistema *backup*, mas este ser garantido através de outras fontes de energia renovável. Consequentemente, o parâmetro respetivo (A5 – Segurança abastecimento) não deve ser considerado na avaliação, pois não teria sentido atribuir uma classificação negativa neste caso.

6.3 PROCESSO METODOLÓGICO

6.3.1 OBJETIVO, OBJETO E FRONTEIRA DA METODOLOGIA

A metodologia para a integração dos sistemas solares ativos na envolvente dos edifícios reúne, através dos seus parâmetros, um conjunto de métodos que possibilitam a avaliação da integração, com vista ao apoio à decisão na fase de conceção (obra nova ou reabilitação).

Apesar de se centrar fundamentalmente na assistência à tomada de decisão, a utilidade da metodologia poderá ser definida restringindo os critérios de integração, alterando assim o seu âmbito (poderá inclusive viabilizar uma escolha de terreno, numa fase prévia ao projeto, em função da exposição solar da volumetria prevista).

O objeto sobre o qual a metodologia é aplicada consiste na envolvente do edifício, designadamente na área de fachada e/ou cobertura acima do nível do solo, onde serão integrados os SSA. A fronteira da metodologia corresponde, preferencialmente, a todo o ciclo de vida da envolvente/edifício (de acordo

[23] O conhecimento e experiência do coordenador e da equipa de projeto são importantes de forma a obterem-se resultados globalmente coerentes e satisfatórios. Como exemplo, a introdução do primeiro regulamento de térmica implicou novas abordagens à conceção e à construção da envolvente dos edifícios a nível nacional. No entanto, verificaram-se situações em que as soluções adotadas não conciliaram da melhor forma as várias subcategorias (suporte, controlo, acabamento e distribuição), nas quais a função de suporte foi comprometida devido a correções térmicas, ou seja, em benefício do controlo, nomeadamente em ligações entre estrutura e envolvente, ou nas ligações entre cobertura, fachada e platibanda. Estas situações não constituíram propriamente uma falta de coordenação, mas um domínio insuficiente das implicações das soluções, num contexto onde a física das construções é importante e o conhecimento estava em fase de aquisição. Como referem Mora, Bitsuamlak e Horvat (2011) face aos desafios atuais, a capacidade de coordenação holística no cruzamento das várias disciplinas da engenharia, da construção e da arquitetura, na procura de sustentabilidade, tendo em conta o ciclo de vida, é ainda incipiente.

[24] Esta adequação a cada caso está patente no desempenho social da "sustentabilidade das obras de construção" (CEN, 2010c), onde é referido que os indicadores irrelevantes para determinada avaliação, não devem ser considerados. Salienta-se que no método de integração de sistemas fotovoltaicos desenvolvido no Instituto Faunhofer (Schuetze, Willkomm e Roos, 2015), apresentado no Capítulo 3, é atribuída uma valorização aos parâmetros em função de cada projeto. Esta adequação é um aspeto significativo, pois a importância da relatividade prende-se com o facto do edifício como sistema constituir uma entidade complexa e única. Por oposição a um produto industrial fabricado em série, um edifício consiste numa solução singular para um problema específico, mesmo quando o programa se repete, a localização, o relevo e a orientação do sítio, entre outros fatores, influenciam a sua forma final. Utilizando a terminologia industrial, cada edifício é um protótipo, apesar de ser simultaneamente um produto final. Este facto significa que a otimização de um edifício depende do programa, do processo de projeto e de uma visão holística. Pode-se assim afirmar que determinada composição (de um edifício), num determinado contexto, possui um determinado desempenho. O modo como se avalia esse desempenho, através dos critérios que se estabelecem, é variável consoante o propósito pretendido.

com a modularidade definida na normalização europeia da "sustentabilidade das obras de construção" - Tabela 5.1). Todavia, poderá ser estudado apenas parte do ciclo de vida.

A metodologia baseia-se na comparação de soluções para a envolvente (variantes), efetuada com base no equivalente funcional. O equivalente funcional é definido através dos requisitos estabelecidos no Programa Preliminar e nos regulamentos existentes (locais, nacionais e/ou específicos), em confronto com o sítio. É, deste modo, possível verificar que diferentes opções de integração com equivalência funcional, possuem diferentes resultados nas respetivas "categorias de integração". Esta verificação constitui a informação de apoio à decisão que permitirá aferir qual o modo de integração mais conveniente ou vantajoso.

6.3.2 FASEAMENTO

A atividade criativa relativa ao exercício de conceção arquitetónica não é um processo linear. No entanto, assenta num processo sequencial, composto por diversas fases consecutivas, cuja transição implica um aumento do grau de definição e de complexidade do projeto. Essas fases, de acordo com a Portaria que define as instruções para a elaboração de projetos de obras (Portaria n.º 701-H/2008), são as seguintes:

- Programa base;
- Estudo prévio;
- Anteprojeto;
- Projeto de execução e assistência técnica.

A integração dos SSA pressupõe que a abordagem à sua inclusão faça parte do processo de conceção desde o seu início, sendo assim essencial que acompanhe o faseamento do projeto. Como o projeto de um edifício inicia sempre de uma necessidade (como o "alojamento" de um programa funcional, ou a melhoria do seu desempenho), o Programa Preliminar é fundamental, pois define os objetivos e as características da obra. Deste modo, a metodologia para a integração de SSA inicia tendo em conta o Programa Preliminar como pré-fase de projeto.

A partir do Programa Preliminar é possível obter uma série de dados relativos ao edifício (objetivos e características da obra) que, em conjunto com as características do sítio e os requisitos regulamentares (gerais e locais), permitem aferir a viabilidade da utilização de sistemas solares ativos. Existindo a possibilidade de recorrer aos SSA (que poderá inclusive ter origem na obrigatoriedade regulamentar, como no caso da utilização de coletores solares térmicos para AQS em habitações novas), segue-se o faseamento normal de projeto, incidindo sobretudo nas fases iniciais de conceção. As fases de Programa base e Estudo prévio são essenciais para estudar as possibilidades de integração, através do desenvolvimento de variantes, de modo a aferir qual a melhor solução face aos objetivos definidos.

A metodologia acompanha assim o faseamento de projeto, associando-se a um processo linear e cujo grau de detalhe aumenta com o desenvolvimento do projeto. O diagrama apresentado na Figura 6.3 confronta o faseamento de projeto e o processo metodológico. De uma forma geral, o processo de integração de SSA é constituído por dois momentos fundamentais: a determinação da viabilidade da sua inclusão na envolvente; e a geração de alternativas/variantes.

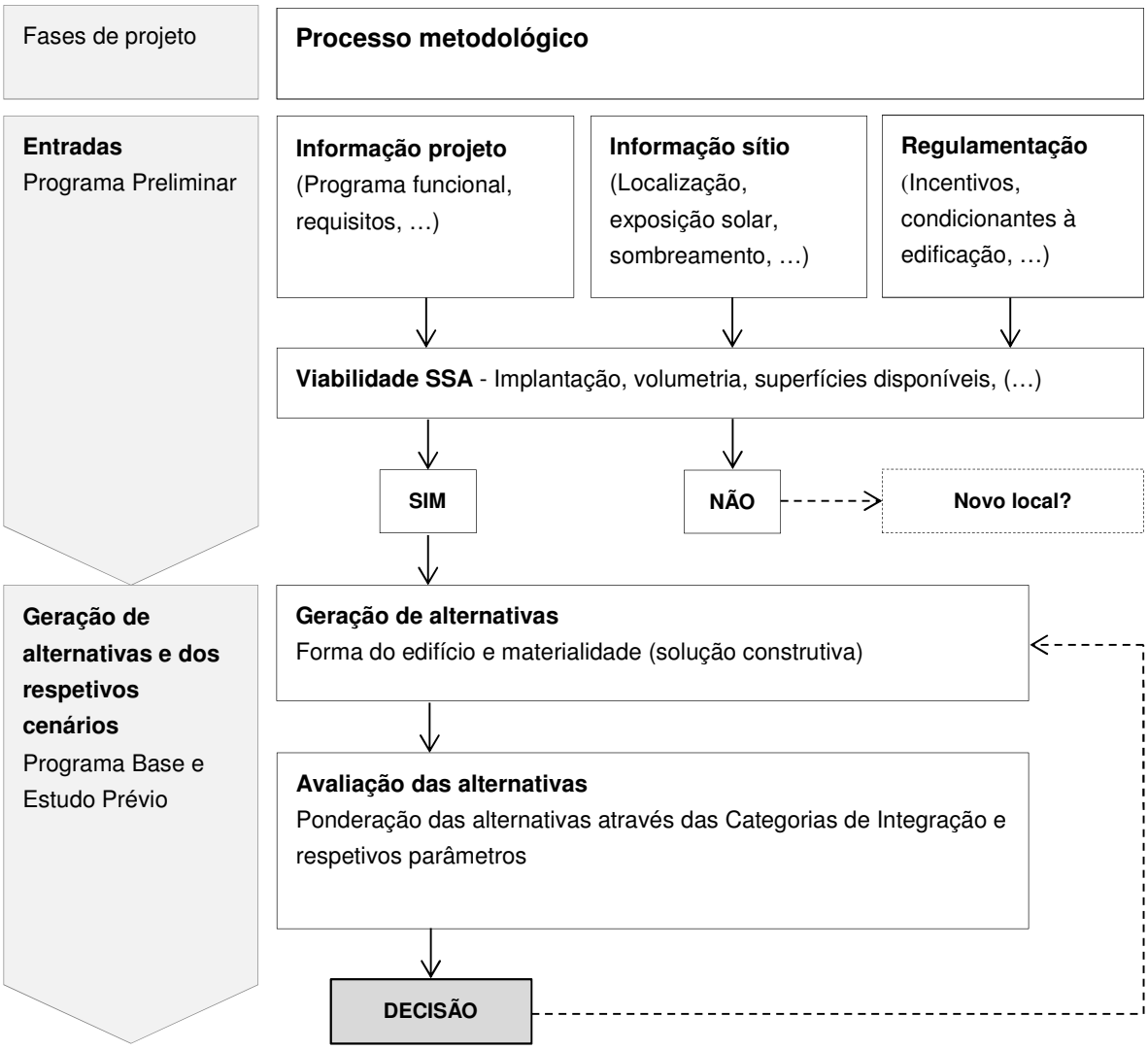


Figura 6.3 – Fases iniciais da integração de SSA na envolvente do edifício

Para a determinação inicial da viabilidade da integração de SSA, assim como para cada fase de projeto consequente, a metodologia implica três etapas:

- 1ª Etapa – Recolha de informação;
- 2ª Etapa – Análise da informação e teste de soluções (os procedimentos variam de acordo com a fase do projeto);
- 3ª Etapa – Decisão.

A primeira etapa consiste na recolha dos dados que serão utilizados na etapa seguinte, onde se dá o processamento dessa informação e a sua avaliação. A terceira etapa consiste na decisão. Naturalmente, o tipo de informação e a sua disponibilidade são diversos em função do grau de definição do projeto, ou seja, da fase em que o projeto se encontra.

6.3.2.1 Determinação da viabilidade da integração dos sistemas (Programa Preliminar)

Descrevem-se as três etapas relativas ao Programa Preliminar, de modo a determinar a viabilidade da integração dos SSA.

a) Primeira etapa

A primeira etapa consiste na recolha de informação a partir do Programa Preliminar (objetivo e características da obra, e requisitos do cliente), do sítio (dados climáticos, recurso solar, conformação da envolvente, orientação) e das definições regulamentares que condicionam a forma do edifício ou impliquem a utilização de SSA. A Tabela 6.5 reúne o tipo de informação preliminar essencial.

Tabela 6.5 – Exemplo do tipo de informação preliminar

Fontes	**Tipo de informação**
Programa funcional	Uso (tipo edifício, uso, horário funcionamento) Áreas (terreno, programa) Necessidades energéticas Requisitos da envolvente
Características do local	Exposição solar Orientação e inclinação Sombreamento Requisitos da envolvente
Regulamentação	Regulamentos urbanos (condicionantes em termos de volumetria, cércea ou materialidade da envolvente, que possuam repercussões na integração de SSA) Regulamentação energética

Em termos de Programa Preliminar, o tipo de edifício e de utilização influenciam fortemente as necessidades energéticas e, consequentemente, o contributo dos SSA no edifício. Como exemplo, são diversas as necessidades de uma utilização permanente (24h/dia), como hospitais, ou parcial e com uma utilização maioritariamente diurna, como escritórios ou comércio. As condicionantes específicas do sítio também possuem um peso determinante, nomeadamente as possibilidades de orientação e inclinação, e a influência do sombreamento (fator dependente da localização e da forma do próprio edifício). Finalmente, a regulamentação local pode condicionar determinados aspetos da conformação do volume, como a cércea ou outros alinhamentos urbanos, que condicionam a exposição solar.

b) Segunda etapa

Com uma visão geral da informação recolhida é possível determinar o potencial de utilização e integração dos SSA, recorrendo a esquemas de possíveis conformações arquitetónicas (em função do possível volume a construir, tendo em conta as condicionantes definidas - exposição solar, área de implantação, volumetria e planos conformados pela fachada e cobertura), e avaliando o seu potencial de geração de energia através de estimativas brutas.

c) Terceira etapa

A terceira etapa consiste na definição da viabilidade da utilização de SSA e consequente tomada de decisão. Em caso negativo, pode ser reavaliada a localização ou tomada a opção de recorrer a outras formas de produção de energia. Em caso positivo, o projeto avança para a fase seguinte.

6.3.2.2 Geração de variantes e cenários (Programa Base)

O Programa Base visa a verificação da viabilidade da obra e o estudo de soluções alternativas, para posterior análise e aprovação pelo Dono de Obra. É, por definição, o momento de análise de intenções, conciliando-se assim com a geração das variantes ao nível da metodologia de integração de SSA. Descrevem-se as três etapas relativas à primeira fase de conceção, a partir da qual (e com continuidade no Estudo Prévio) se avaliam as soluções de integração dos SSA.

a) Primeira etapa

Na primeira etapa complementa-se a informação disponível (obtida através do Programa Preliminar, da localização e das condicionantes regulamentares), com dados sobre as eventuais necessidades energéticas e aspetos específicos de desempenho, como requisitos de resistência às alterações climáticas ou outros que se instituam como pertinentes.

b) Segunda etapa

Na segunda etapa geram-se as alternativas através de dois momentos fundamentais e interdependentes: um relativo ao estudo da definição progressiva da forma em confronto com o sítio (em termos de implantação, volume, superfícies); e outro de procura da solução construtiva. Poderão existir algumas vontades ou requisitos pré-definidos por imposição do Dono de Obra, ou ao nível regulamentar, que influenciem a volumetria, a organização espacial, a cor, a iluminação natural, a materialidade, entre outros aspetos, com eventuais consequências nas possibilidade de articulação multifuncional dos SSA.

As opções de integração são assim equacionadas em função de vários fatores. Dependem do que se pretende da envolvente do edifício, em termos de desempenho, e do papel que os sistemas solares ativos podem desempenhar como componentes da envolvente. O papel dos SSA, por sua vez, depende do tipo de tecnologia e das funções a desempenhar para além da geração de energia. É neste contexto que se cruza o conceito de energia com o conceito arquitetónico de um edifício, e onde se determinará a visibilidade dos SSA e o seu grau de influência na formalização do edifício. Para além da resposta aos diferentes requisitos, as soluções construtivas que integram SSA poderão também adicionar vantagens do ponto de vista construtivo, tais como facilidade de construção, produtividade em obra, facilidade de manutenção, entre outras.

Definidas as variantes de projeto, é necessário o seu conhecimento/descrição em termos físicos (partes constituintes, materialidade), em termos de desempenho (capacidade multifuncional, contributo energético ou capacidade de adaptação) e em termos de definição de cenários (processos – transporte, construção, manutenção, substituição, fim-de-vida – e utilização de energia e água). Esta descrição conforma um modelo que traduz a quantificação física e temporal da integração dos SSA ao longo do ciclo de vida, através do qual se procede à classificação dos parâmetros de integração.

Segue-se a avaliação da integração dos SSA em função dos parâmetros selecionados e para os quais deve ser definida a sua importância relativa, em função dos objetivos pretendidos (os parâmetros que não se adequam à especificidade de determinado projeto não são considerados). A Tabela 6.6 lista os parâmetros e o seu modo de classificação. Podem também ser definidos eventuais critérios condicionais em função dos objetivos particulares do Dono de Obra e/ou da equipa projetista.

c) Terceira etapa

Na terceira etapa, em função dos parâmetros considerados na avaliação e da definição do sua importância relativa, determinam-se os resultados para as variantes, procedendo-se à seleção da variante, ou variantes, a serem desenvolvidas no Estudo Prévio.

Tabela 6.6 – Modo de avaliação das soluções com base nos parâmetros de integração

Categorias de integração	**Parâmetros**		**Classificação**	**Fator de importância** [(b)]
A - Integração energética	A1	Produção energética anual	0, 1, 2 [(a)]	1, 2
	A2	Balanço energético	0, 1, 2	1, 2
	A3	Energia incorporada	0, 1, 2 [(a)]	1, 2
	A4	Potencial de aquecimento global	0, 1, 2 [(a)]	1, 2
	A5	Segurança abastecimento	0, 1, 2	1, 2
	A6	Contributo para o desempenho energético	0, 1, 2	1, 2
B - Integração morfológica	B1	Posicionamento – orientação e inclinação	0, 1	1, 2
	B2	Posicionamento – sombreamento	0, 1	1, 2
	B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	0, 1	1, 2
	B4	Coeficiente reflexão	0, 1	1, 2
	B5	Controlo de temperatura	0, 1	1, 2
C - Integração multifuncional	C1	Contributo para o desempenho não energético	0, 1, 2	1, 2
	C2	Operabilidade e utilização	0, 1, 2	1, 2
D - Integração construtiva	D1	Grau de integração	0, 1	1, 2
	D2	Solução construtiva - distribuição	0, 1	1, 2
	D3	Solução construtiva - adaptabilidade	0, 1	1, 2
E - Integração formal	E1	Integração no contexto urbano	0, 1	1, 2
	E2	Superfície	0, 1	1, 2
	E3	Componentes – módulos e coletores	0, 1	1, 2
	E4	Componentes – partes complementares	0, 1	1, 2
F - Integração temporal	F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	0, 1, 2 [(a)]	1, 2
	F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	0, 1, 2	1, 2
	F3	Manutenção - utilização	0, 1	1, 2
	F4	Manutenção - acessibilidade	0, 1	1, 2
G - Balanço económico	G1	Custo	0, 1, 2 [(a)]	1, 2
	G2	Valor financeiro	0, 1, 2 [(a)]	1, 2
	G3	Retorno do investimento	0,1	1, 2

(a) A pontuação nestes parâmetros resulta da comparação entre variantes (descrição detalhada no Anexo A);

(b) A definição da importância relativa dos parâmetros é efetuada ao atribuir um fator "2" aos parâmetros considerados mais importantes em determinado contexto e, conceptualmente, um fator "1" aos restantes (ou seja, permanecem com o mesmo valor, enquanto os mais importantes duplicam o resultado, no caso de possuírem pontuações positivas).

6.3.2.3 Restantes fases

A Tabela seguinte descreve sumariamente as 3 etapas para as diversas fases de projeto. As fases de Anteprojeto e de Projeto de Execução não são consideradas no que respeita à exploração e seleção de variantes, pois destinam-se ao desenvolvimento da variante final, selecionada através das fases anteriores, no sentido da sua definição e dimensionamento com vista à execução da obra.

Tabela 6.7 – Fases de projeto e etapas

Fases de projeto	**1 Etapa** **Recolha de informação**	**2 Etapa** **Análise e produção de informação**	**3 Etapa** **Decisão**
Programa Preliminar	Programa preliminar, sítio, regulamentação.	Caracterização da viabilidade da utilização de SSA.	Determinação da viabilidade da utilização de SSA.
Programa Base	Programa preliminar, sítio, regulamentação, caracterização da viabilidade da utilização de SSA.	Identificação das estratégias de projeto em função dos requisitos e necessidades. Conceção das variantes e definição dos cenários. Avaliação das variantes através dos parâmetros de integração.	Seleção da variante ou variantes em função dos objetivos definidos.
Estudo Prévio	Variante ou variantes aprovadas na fase anterior.	Desenvolvimento da variante ou variantes aprovadas na fase anterior. Nova avaliação das variantes através dos parâmetros de integração.	Seleção da variante final em função dos objetivos definidos.
Anteprojeto e Projeto de Execução	Variante final.	Desenvolvimento da variante aprovada.	Informação escrita e desenhada que permita a execução da obra.

7
CASOS DE ESTUDO

7.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo é efetuada a validação da metodologia para a integração de SSA na envolvente de edifícios, através da sua aplicação a dois casos de estudo. Os casos de estudo selecionados consistem em edifícios existentes, nomeadamente um edifício de serviços e uma habitação unifamiliar, abarcando assim diferentes escalas e funções, e possibilitando uma perspetiva abrangente da aplicação da metodologia proposta.

Cada edifício é caracterizado fisicamente e ao nível do seu consumo energético. Com base nesta caracterização, e na definição dos objetivos para cada caso (necessidades energéticas e pressupostos de intervenção), é aplicada a metodologia e verificada a sua validade.

7.2 CASO DE ESTUDO 1 – EDIFÍCIO DE SERVIÇOS

O primeiro caso de estudo consiste no edifício sede da EDP em Coimbra, localizado na Avenida Cónego Urbano Duarte. O edifício alberga um programa funcional de serviços, neste caso escritórios, e possui uma área útil de 9465,4 m^2. O projeto data de 1998 e a sua construção de 2003. O volume edificado acima do solo forma um "L", constituído por dois corpos – A e B (Figura 7.1). O edifício desenvolve-se ao longo de 7 pisos (4 acima do solo e 3 total ou parcialmente abaixo do solo). O Corpo A, que constitui a frente da Avenida Cónego Urbano Duarte, possui uma planta de forma retangular com orientação predominante este/oeste, conformando um topo livre a norte e um gaveto que efetua a ligação ao Corpo B a sul. O Corpo B possui uma planta de forma curva, com a fachada convexa orientada a sul/sudeste (que constitui a frente da Rua Fonte do Castanheiro) e a côncava orientada a norte/noroeste, conformando uma empena de remate com o edifício adjacente a nordeste.

A entrada principal do edifício situa-se no gaveto a sul, no piso 1 (rés-do-chão). No Corpo A, os pisos -2 e -1 localizam-se abaixo do nível do solo, e o piso 0 é semienterrado (sendo totalmente enterrado a sul e encontrando-se à cota da rua a norte). No Corpo B, apenas o piso -2 se situa totalmente abaixo do solo, sendo os pisos -1 e 0 semienterrados (estando totalmente abaixo do nível do solo em relação à Rua Fonte do Castanheiro). Os restantes quatro pisos (1 a 4) situam-se acima do nível do solo.

Em termos de organização espacial (Anexo B) os pisos -2, -1 e parte do 0 (correspondente ao Corpo B) são ocupados por garagens, salas técnicas e armazéns. Na área do piso 0 correspondente ao Corpo A, situa-se um auditório, com entrada direta do exterior, e as respetivas áreas de apoio (átrio, bengaleiro, cabine de projeção e sanitários). No piso 1 do Corpo B situa-se um Posto Médico. O restante edifício é ocupado por escritórios, conformados por gabinetes de diversas dimensões e por áreas em *open space*. O piso 4 ocupa apenas parte da área correspondente aos pisos inferiores, através

de um pequeno bloco de gabinetes ao qual se associa uma copa, e pelos volumes resultantes dos acessos verticais (caixas de escadas e elevadores), com ligação à cobertura. Os escritórios ocupam uma área de 4606,45 m^2, o que corresponde a 49% do total da área útil.

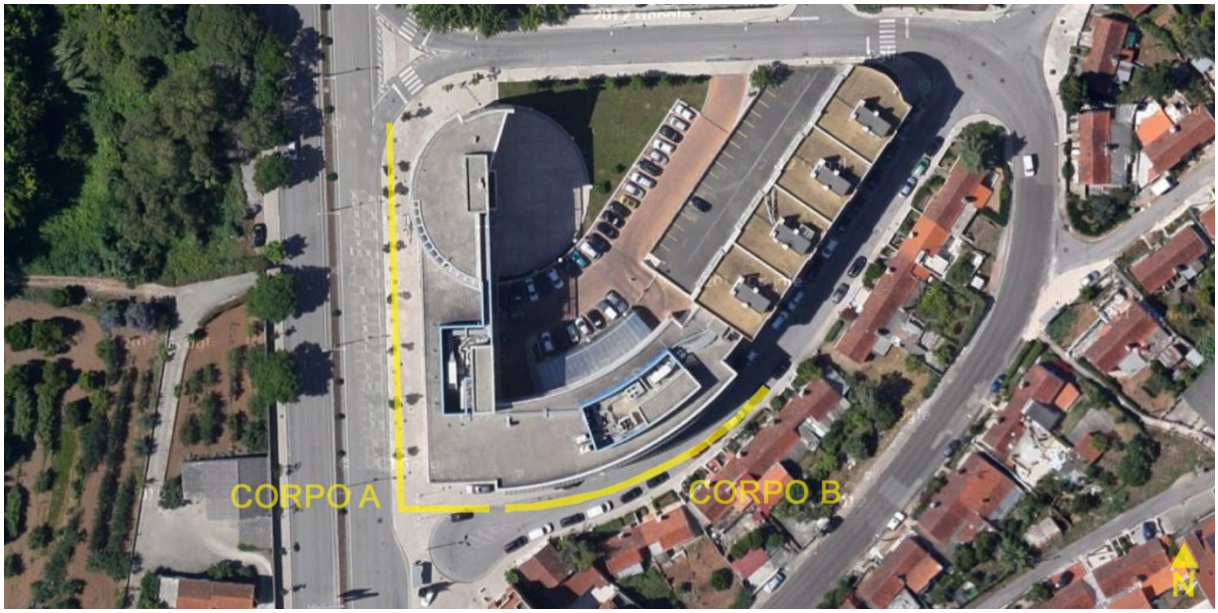


Figura 7.1 – Vista aérea da implantação do edifício (Google, 2016)

Tendo em conta os elementos necessários para a aplicação da metodologia, caracteriza-se a envolvente do edifício, o seu consumo energético, e apresentam-se as propostas para a melhoria do seu desempenho energético resultantes de um estudo académico efetuado anteriormente (Pinto, 2014, Hormigo e Henriques, 2015).

7.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE

A envolvente do edifício, acima do solo, consiste numa solução de fachada ventilada pontuada por vãos envidraçados de dimensão variável (Figura 7.2, Figura 7.3 e Figura 7.4). O revestimento exterior, em zona opaca, é constituído por três tipos de materiais, nomeadamente: painéis compósitos de alumínio (Alucobond); pedra calcária; e vidro duplo (colado pelo exterior em perfis de alumínio num sistema de fachada cortina).

A informação existente sobre a constituição exata da fachada é divergente[25]. Apresenta a seguinte constituição (do exterior para o interior): revestimento exterior; caixa-de-ar; isolamento térmico; tela impermeabilizante (nas zonas com revestimento a pedra e com painéis compósitos de alumínio); pano de alvenaria cerâmica de 20 cm de espessura; caixa-de-ar; pano de alvenaria cerâmica de 11 cm de espessura; e revestimento interior (reboco). Em zonas com elementos estruturais de betão estes substituem os panos de alvenaria, resultando numa composição heterógena.

[25] No Certificado Energético (Costa, 2011) é apenas descrito um tipo de parede exterior, que não corresponde à realidade, sendo atribuído um coeficiente de transmissão térmica de 0,96 W/m^2.ºC. Contudo, Pinto (2014) com base na modelação energética do edifício e na conformação real da parede indica um coeficiente de transmissão térmica de 0,137 W/m^2.ºC.

Na Certificação Energética do edifício (Costa, 2011) são identificados 8 tipos de vãos, com vidros duplos e coeficientes de transmissão térmica de 3,9 e 4,3 W/m^2.ºC. Os vãos não possuem proteção solar pelo exterior, à exceção da fachada sul/sudeste do Corpo B, cujos vãos no piso 1 são protegidos pelo avanço superior do edifício, e nos pisos 2 e 3 por uma pala horizontal, composta por perfis de alumínio (Figura 7.2 e 7.3).

A cobertura é plana e consiste numa solução invertida. É composta por uma laje de betão, pelos respetivos enchimentos para realização das pendentes necessárias, sendo revestida com lajetas que incorporam isolamento térmico.



Figura 7.2 – Vista da fachada poente (Corpo A) e gaveto de ligação ao Corpo B (sul)



Figura 7.3 – Vista do topo norte e fachada poente (à esquerda) e vista do remate a nordeste com o edifício adjacente (à direita)



Figura 7.4 – Vista do interior do quarteirão, alçado norte/noroeste (à esquerda), e alçado nascente (à direita)

7.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO

O edifício situa-se a cerca de 38,5 km da costa, a uma altitude de 31,8 m (cota de soleira da entrada principal), e insere-se na zona climática I1V2 - região Norte. Apresenta uma classe energética B, atribuída na Certificação Energética (Costa, 2011), sendo o Indicador de Eficiência Energética nominal (IEEnom) de 26,85 kgep/m^2.ano, ao qual se associam 305 toneladas de CO_2 equivalente por ano, em emissões de gases de efeito estufa.

A única forma de energia utilizada no edifício é a energia elétrica. O edifício possui um sistema centralizado de climatização, a produção de energia térmica é feita por dois chillers (um dos quais também é bomba de calor), associados a 4 unidades de tratamento de ar e a ventiloconvectores. Em alguns locais também existem sistemas independentes de expansão direta tipo split. A água quente sanitária é obtida por um sistema de recuperação de calor dos chillers, não sendo deste modo contabilizada no consumo energético. O edifício possui um sistema de *backup*.

Numa Auditoria Energética (Costa e Botelho, 2010) realizada como apoio ao processo de certificação energética, foi estimado o seguinte consumo de energia e a respetiva partição (baseado no período entre Janeiro de 2007 e Junho de 2010):

- Consumo anual global – 798 905 kWh;
- AVAC – 342 MWh/ano;
- Iluminação – 191 MWh/ano;
- Outros (equipamentos) – 266 MWh/ano.

Verifica-se um elevado consumo do sistema de climatização (42,8% do total), seguido pelos equipamentos – elevadores, computadores, máquinas de café, entre outros (33,3%), e pela iluminação (23,9%). Nas simulações dinâmicas da Auditoria Energética (Costa e Botelho, 2010), estes grupos de consumo possuem ordens de grandeza diferentes. Contudo, o maior consumo de energia mantem-se associado à climatização. Na climatização, o consumo mais expressivo corresponde às necessidades de arrefecimento, sendo aproximadamente 3 vezes superior ao consumo relativo às necessidades de aquecimento. Face a este cenário, toma-se como referência a partição do consumo mencionada inicialmente, por ser a mais elevada em relação ao consumo de energia associado ao funcionamento do edifício (AVAC – 342 MWh/ano e iluminação – 191 MWh/ano).

Analisando o histórico do consumo de energia desde 2006 (Tabela 7.1), verifica-se que a ordem de grandeza do consumo anual tem-se mantido sensivelmente próxima do valor determinado na Auditoria Energética (798 905 kWh). A diferença notória de 2006 e 2007, em relação aos anos seguintes, deve-se fundamentalmente a uma alteração na iluminação, nomeadamente a substituição de balastro ferromagnético para balastro eletrónico. Destaca-se o aumento expressivo do consumo de energia no 3º trimestre, que corresponde ao verão, em conformidade com a maior expressão das necessidades de arrefecimento.

Tabela 7.1 – Consumo de energia (kWh)

Ano	1º Trim	2º Trim	3º Trim	4º Trim	Total anual	kWh/m2.ano
2006	249 171	278 472	321 367	253 308	1 102 318	116
2007	240 210	287 960	272 795	198 940	999 905	106
2008	193 368	196 787	269 607	200 370	860 132	91
2009	179 037	174 050	206 831	181 054	740 972	78
2010	196 370	160 850	215 090	189 600	761 910	80
2011	188 687	209 522	236 380	216 368	850 957	90
2012	205 779	135 180	279 320	178 563	798 842	84
2013	165 146	164 184	227 051	184 879	741 260	78
2014	214 890	224 117	270 363	208 129	917 499	97
2015	185 517	216 011	230 120	200 240	831 888	88

Recentemente foi implementada uma instalação fotovoltaica de 18 kWp, composta por 72 módulos de silício monocristalino (AxiPower 250 Wp), com uma área de 117 m^2 (área dos módulos), e com um rácio de desempenho mínimo garantido de 81,7%. Estima-se uma produção específica de 1438 kWh/kWp/ano (26MWh/ano).

Os módulos foram instalados de forma "adicionada" sobre a cobertura, recorrendo a uma estrutura de suporte e lastro. O sistema está orientado a sul (azimute 0°), com uma inclinação de 20°, e isento de sombreamento (Figura 7.5). Pelo facto de ainda não existirem dados para avaliar o seu desempenho, tomam-se como referência os valores estimados de geração de energia. Esta instalação representa a única fonte de produção de energia pelo próprio edifício.

Deste modo, para balanço energético do edifício, considera-se um consumo anual final de 507 021 kWh, tendo em conta o consumo anual global de 798 905 kWh, do qual 266 000 kWh correspondem a equipamentos (cujo consumo não se atribui ao desempenho energético do edifício), e estimando-se a produção de 25 884 kWh pela instalação fotovoltaica.



Figura 7.5 – Instalação fotovoltaica existente

7.2.3 MEDIDAS DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O edifício foi alvo de um estudo visando a melhoria do seu desempenho energético (Pinto, 2014, Hormigo e Henriques, 2015), no qual a fachada envidraçada do Corpo A foi identificada como uma zona sensível, e foram propostas as seguintes medidas com vista à convergência para um desempenho de "balanço energético quase nulo":

- Alteração dos envidraçados da fachada sul do Corpo A;
- Introdução de ventilação natural (nos vãos ou caixas de estore);
- Colocação de isolamento térmico (cortiça) nas lajes superiores dos pisos -1 e 0B destinados a estacionamento;
- Desenvolvimento de paredes falsas com caixa-de-ar e isolamento térmico nas diversas envolventes verticais enterradas;
- Substituição do sistema de iluminação para iluminação LED;
- Produção de energia renovável por intermédio de 440 módulos fotovoltaicos monocristalinos, com uma potência de 185 W, estimando-se uma produção anual de 101 484 kWh.

O custo e o impacto destas medidas foram analisados e encontram-se sintetizados na Tabela 7.2. Das medidas propostas, a substituição para tecnologia LED da iluminação existente, assim como a implementação de sistemas fotovoltaicos, foram consideradas vantajosas devido aos curtos períodos de retorno do investimento. Salienta-se que no estudo inicial (Pinto, 2014) é referido que a ventilação seria vantajosa, com benefícios no verão, apesar de implicar maiores necessidades de aquecimento no inverno. Relativamente à produção de energia fotovoltaica, previa-se a aplicação "adicionada" dos

módulos na cobertura, tendo sido instalado posteriormente o conjunto referido previamente, que apresenta uma dimensão menor.

Tabela 7.2 – Custo e impacto das medidas propostas

	(Pinto, 2014)	(Hormigo e Henriques, 2015) [(a)]			
Medidas propostas	**Custo (€)**	**Custo (€)**	**Poupança ou rendimento anual**	**Retorno do investimento (anos)**	**Redução do consumo de energia**
Envolvente – substituição dos elementos envidraçados da fachada sul do Corpo A e isolamento térmico	145 690,40				
Envolvente – substituição dos elementos envidraçados do Corpo A e isolamento térmico		300 000,00	10 000,00	30	Redução de 20% no consumo de energia AVAC
Iluminação LED	24 502,91	30 000,00	13 000,00	2,3	Redução de 40% no consumo da iluminação interior e 30% da exterior
Produção de energia fotovoltaica	220 276,33	200 000,00	16 000,00	12,5	Geração 100 000 kWh anuais

(a) Este estudo tem por base o precedente (Pinto, 2014), tendo sido introduzidas ligeiras alterações nas medidas propostas que não se encontram descritas.

7.2.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Como referido no Capítulo anterior, a aplicação da metodologia inicia com a verificação da viabilidade da inclusão de sistemas solares ativos. Para tal é necessário ter em conta o programa funcional do edifício, as características do local e a regulamentação existente (Tabela 6.5). Determinada a viabilidade, são posteriormente estudadas e definidas variantes de projeto, as quais são avaliadas através dos parâmetros de integração, com base na informação recolhida.

7.2.4.1 Determinação da viabilidade da integração dos SSA (Programa Preliminar)

Neste caso em particular, tendo em conta que a área de escritórios do Corpo A está identificada como zona de desconforto (onde é despendida mais energia para atingir uma situação de conforto idêntica ao do Corpo B, devido à sua orientação e aos ganhos solares associados), considera-se como objetivo principal melhorar o desempenho térmico dessa parte da envolvente. Propõe-se assim a intervenção nas suas fachadas poente e sul, designadamente na zona de revestimento envidraçado, recorrendo a sistemas solares ativos, de modo a baixar os ganhos solares e aproveitar a energia gerada. Como objetivos adicionais pretende-se: manter a aparência do edifício, no que respeita à volumetria e à materialidade visível; que a intervenção não implique uma obra expressiva em termos de complexidade ou de alteração da composição formal da envolvente; e que o período de retorno

económico seja inferior a 15 anos. Neste contexto, uma aplicação integrada de SSA, nas fachadas poente e sul, poderá conciliar algumas das medidas propostas anteriormente na Tabela 7.2, designadamente a alteração dos envidraçados (no sentido de melhoria do desempenho térmico da fachada), ventilação natural (eventualmente com a possibilidade de haver controlo sazonal e da sua utilização no pré-aquecimento dos sistemas de AVAC), e a produção de energia renovável.

As tabelas seguintes reúnem a informação inicial necessária relativa ao programa funcional, à localização, e à regulamentação aplicável.

Tabela 7.3 – Programa funcional do edifício

Uso	Tipo de edifício – edifício de serviços (escritórios). Horário geral de funcionamento – entre as 8:30h e as 17:30h (maior percentagem de utilização); horário da receção – entre as 7:00h e as 22:00h.
Área	Área útil – 9 465,4 m^2 (dos quais 4 606,45 m^2 correspondem a escritórios).
Necessidades energéticas	Consumo anual global – 507 021 kWh (consumo associado ao desempenho energético – aquecimento, arrefecimento e iluminação, tendo em conta a produção de energia fotovoltaica da instalação existente). Maiores necessidades energéticas associadas à climatização e, em particular, às necessidades de arrefecimento durante o período de verão.
Requisitos da envolvente	Devido aos ganhos solares da fachada poente do Corpo A, verifica-se um maior consumo de energia nos compartimentos que lhe estão associados de modo a obter as mesmas condições de conforto do restante edifício (zona de escritórios).

Tabela 7.4 – Características do local

Localização	40°11'42''Norte, 8°25'15 Oeste.
Exposição solar	Radiação normal direta média anual – 5 190 Wh/m^2/dia (Tabela 7.5).
Orientação	Corpo A (Este/Oeste); Corpo B (Sul, Sudeste/Norte, Noroeste). O Corpo A apresenta um desvio em relação ao alinhamento norte de 1,7° para poente (azimute 88,3°).
Inclinação	As superfícies de fachada do edifício são verticais (90°) e a cobertura plana.
Sombreamento	A área a poente do edifício enquadra-se na "Reserva Ecológica Nacional" ("Faixa de proteção de albufeira", "Zonas ameaçadas pelas cheias" e "Área de máxima infiltração"), e por uma faixa afeta a "Área verde de recreio e lazer". Devido às condicionantes destas zonas e à sua cota inferior à da implantação do edifício, não são consideradas sombras sobre o edifício. No passeio a poente encontram-se algumas árvores de folha caduca que, devido à sua altura, não condicionam o sombreamento da superfície de fachada, mas devem ser tidas em conta no futuro. A sul/sudeste encontra-se um conjunto edificado consolidado que poderá apresentar sombreamento parcial da envolvente no início da manhã.
Requisitos da envolvente	Exposição solar considerável a poente associada à inexistência de proteção solar pelo exterior, nas respetivas fachadas.

Tabela 7.5 – Radiação global mensal no local do edifício, 40°11'42''Norte, 8°25'15 Oeste, com défice de irradiação anual devido ao sombreamento (horizontal) de 0,1% (PVGIS, 2010)

Mês	Irradiação (Wh/m²/dia)			Inclinação ótima (graus)	Fator de turbidez atmosférica de Linke	Radiação difusa/global	Temperatura (°C)		Número de graus-dia de aquecimento
	Plano horizontal	Plano inclinado ótimo	Normal direta				Média diurna	Média diária	
Jan	2050	3460	3090	63	2,6	0,45	11,3	9,0	220
Fev	3030	4540	4100	56	2,8	0,39	12,5	10,0	177
Mar	4420	5520	4630	43	2,9	0,43	15,3	12,8	101
Abr	5160	5550	5000	27	3,0	0,39	16,5	14,1	92
Mai	6190	5990	5790	13	3,5	0,37	19,1	16,8	21
Jun	6950	6350	7000	6	3,5	0,31	22,6	20,3	2
Jul	7340	6880	8030	10	3,6	0,25	23,6	21,0	1
Ago	6550	6820	7510	22	3,3	0,25	24,7	21,8	2
Set	5150	6270	6310	38	3,4	0,28	23,8	20,6	14
Out	3540	4980	4470	51	3,2	0,38	19,5	16,9	59
Nov	2320	3790	3390	61	2,6	0,43	14,5	12,1	188
Dez	1820	3230	2930	65	2,4	0,45	12,1	9,9	217
Anual	4550	5280	5190	35	3,1	0,34	18,0	15,4	1094

Tabela 7.6 – Condicionantes regulamentares

Urbanística	Neste caso, como se trata de um edifício existente, e não se prevê alterações de volumetria, não se colocam as condicionantes regulamentares urbanísticas, como limite de cércea, ou similares.
Energética	Devido a constrangimentos da EDP como produtora de energia, a energia produzida no edifício não pode ser injetada na rede, destinando-se na totalidade ao autoconsumo.

A partir da informação sintetizada nas tabelas anteriores, verifica-se que o programa funcional do edifício, o seu horário de funcionamento e a época do ano com o maior consumo (verão), estão em consonância com o período de maior disponibilidade de radiação solar. Para além de que não existem condicionantes regulamentares que ponham em causa a utilização de SSA. Neste contexto, a utilização de sistemas solares ativos no edifício é considerada viável.

Como se trata de um edifício existente, a implantação e a volumetria encontram-se definidas. Deste modo, analisa-se o potencial das superfícies existentes, em detrimento da possível volumetria (procedimento exequível na fase de conceção de um edifício novo). Nesse sentido, selecionam-se as superfícies da envolvente com exposição solar e que se encontrem maioritariamente livres de

sombreamento. Neste caso, essas superfícies limitam-se a áreas e/ou elementos arquitetónicos localizados na cobertura e nos alçados poente e sul/sudeste (Figura 7.6 e Tabela 7.7).

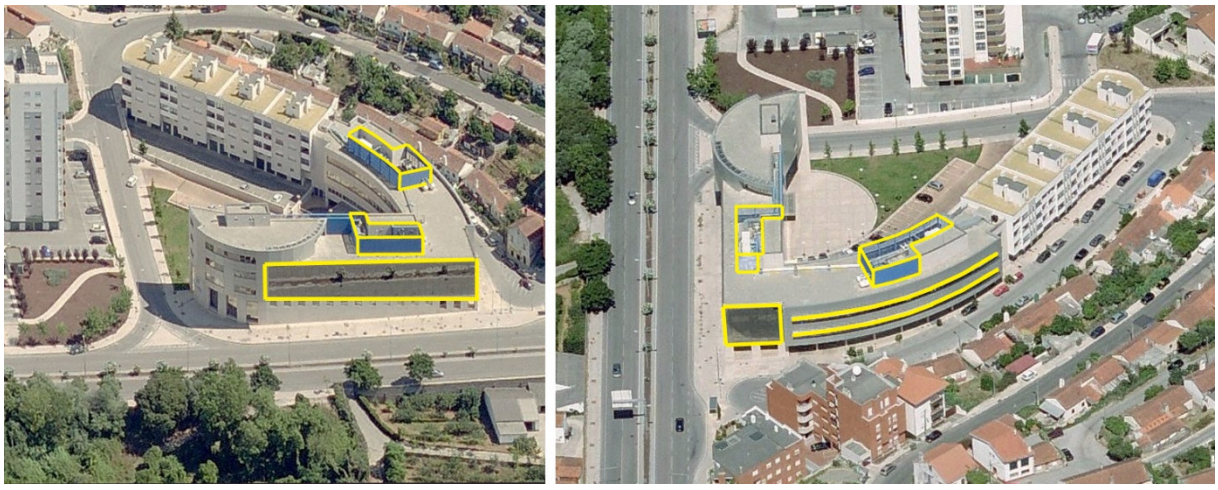


Figura 7.6 – Superfícies e elementos da envolvente com potencial de integração de SSA (identificados a amarelo)

Tabela 7.7 – Superfícies e elementos existentes disponíveis

Piso	Orientação (azimute)	Inclinação	Descrição	Área [(a)] m²
2/3	88° (poente)	90°	Revestimento envidraçado zona opaca (corpo A).	405,5
			30 vãos-janela envidraçados (inseridos na zona opaca de revestimento envidraçado – corpo A).	95,6
	-2° (sul)	90°	Revestimento envidraçado zona opaca (corpo A).	92,1
			8 vãos-janela envidraçados (na zona opaca de revestimento envidraçado – corpo A).	28,0
	-3,3°/-47,5° (sul/sudeste)	0°	2 palas metálicas horizontais 1,30 x 50,22 m (corpo B).	129,3
	-1,9°/-48,9° (sul/sudeste)	90°	Superfície opaca revestida a painéis compósitos de alumínio na fachada sul/sudeste (corpo B).	349,2
4	88° (poente)	90°	Estruturas de limitação das zonas técnicas de equipamentos na cobertura (corpos A e B).	69,4
	-2° (sul)			18,8
	68,4° (sudoeste)			38,7
	-21,6°/-31,3° (sul/sudeste)			40,4
	0°	0°		235,7

(a) Áreas determinadas a partir das telas finais do projeto de Arquitetura.

Seria possível a seleção de outras superfícies, como as revestidas a pedra, mas implicaria uma mudança total da fachada em termos de materialidade e acabamento. Salienta-se que, em função de objetivos diversos, seriam também possíveis abordagens distintas, como a alteração significativa da envolvente, ou a adição de elementos arquitetónicos. Como exemplo, uma hipótese seria estudar a integração de SSA na cobertura (piso 4) através da conformação de uma pérgula de sombreamento (Tabela 7.8 e Figura 7.7). Porém este tipo de abordagem não se enquadra nos objetivos definidos inicialmente.

Tabela 7.8 – Possibilidade da integração através de novos elementos arquitetónicos

Piso	Orientação (azimute)	Inclinação	Descrição	Área m^2
4	0°	0°	Criação de uma pérgula de sombreamento na cobertura no corpo A (considerando o mesmo elemento arquitetónico sobre o corpo B daria um total de 365,2 m^2).	180,0
	0°	35° (otimizada)		

Figura 7.7 - Possibilidade de integração de SSA na cobertura através da adição de um elemento arquitetónico (fotomontagem)



7.2.4.2 Geração de variantes (Programa Base e Estudo Prévio)

Tendo como objetivo a intervenção sobre a fachada do Corpo A, o estudo das variantes de projeto restringe-se a essa zona da envolvente, designadamente à zona de revestimento envidraçado (zona opaca e vãos). Para tal, recorrem-se a esquemas de possíveis conformações arquitetónicas e do

contributo integrado dos SSA. A Tabela 7.9 sintetiza o potencial de algumas opções de integração dos sistemas solares ativos nessa zona da envolvente através das respetivas estimativas brutas de produção de energia.

Tabela 7.9 - Potencial de integração de SSA e estimativas brutas de produção energética (período anual)

Potencial de integração de SSA (por área de sistema)		**Estimativa**[(a)] **(kWh/ano)**	**Relação com posição otimizada** (35° inclinação e 0° orientação)
1	Alteração fachada poente envidraçada		
1.1	Alteração do tipo de vidro na envolvente opaca para envidraçados fotovoltaicos (405,5 m^2).	55 561	51% (107 995 kWh/ano)
	Com a mesma área poderá conformar-se uma fachada dupla de vidro com caixa-de-ar e recuperação de calor para sistema AVAC.	56 755	53% (107 995 kWh/ano)
1.2	Módulos fotovoltaicos como dispositivo de sombreamento da fachada existente (ocupando metade da área de fachada – 203 m^2) com uma inclinação de 0°.	30 755	57% (54 064 kWh/ano)
	Módulos fotovoltaicos como dispositivo de sombreamento da fachada existente (ocupando metade da área de fachada – 203 m^2) com uma inclinação de 35°.	37 323	69% (54 064 kWh/ano)
	Módulos fotovoltaicos como dispositivo de sombreamento da fachada existente (ocupando 2/3 da área de fachada – 270 m^2) com uma inclinação de 45°.	55 444	78% (71 159 kWh/ano)
2	Alteração fachada sul envidraçada		
2.1	Alteração do tipo de vidro na envolvente opaca para envidraçados fotovoltaicos (92,1 m^2).	16 003	65% (24 529 kWh/ano)
	Com a mesma área poderá conformar-se uma fachada dupla de vidro com caixa-de-ar e recuperação de calor para sistema AVAC.	16 347	67% (24 529 kWh/ano)
2.2	Módulos fotovoltaicos como dispositivo de sombreamento da fachada existente (ocupando metade da área de fachada – 46 m^2) com uma inclinação de 35°).	11 265	100%

(a) Estimativas brutas da geração de energia obtidas através da opção de pré-dimensionamento do software PVSYST, considerando a região climática de Coimbra e módulos fotovoltaicos monocristalinos.

Nas possibilidades de compatibilização dos sistemas solares ativos com o edifício, para além da geração de energia, pretende-se que estes contribuam funcionalmente para o desempenho da envolvente, no que se refere à diminuição dos ganhos solares. Nesse sentido, e tendo em conta as

possibilidades e estimativas apontadas na Tabela anterior, consideram-se as seguintes variantes de projeto:

- Proposta A - Substituição do revestimento de vidro (zona opaca) por vidros duplos com um coeficiente de transmissão térmica inferior ao existente e com células cristalinas integradas (Figura 7.8 e Figura 7.11);
- Proposta B - Alteração do sistema de fixação do vidro (a solução existente consiste em vidro exterior colado - o revestimento envidraçado não consiste numa fachada ventilada, mas numa fachada cortina aplicada como revestimento final), mantendo o perfil base e introduzindo um perfil de capeamento (o que implica a alteração do caixilho dos vãos-janela), de modo a receber um sistema de sombreamento corrente de fachadas cortina, cujas lamelas serão compostas por módulos fotovoltaicos (Figura 7.9 e Figura 7.12);
- Proposta C - Criação de uma fachada dupla de vidro, com recuperação de calor, através da alteração do sistema de fixação do vidro, de modo a receber um sistema de fachada dupla, cujo pano exterior é composto por módulos fotovoltaicos cristalinos vidro/vidro, com células ligeiramente afastadas de modo a permitir um certo grau de transparência (Figura 7.10 e Figura 7.13).

Nas três variantes recorre-se a células de silício monocristalino, de forma a manter a coloração azul escura dos envidraçados existentes, assim como uma textura uniforme.



Figura 7.8 – Proposta A (fotomontagem)



Figura 7.9 – Proposta B (fotomontagem)



Figura 7.10 – Proposta C (fotomontagem)

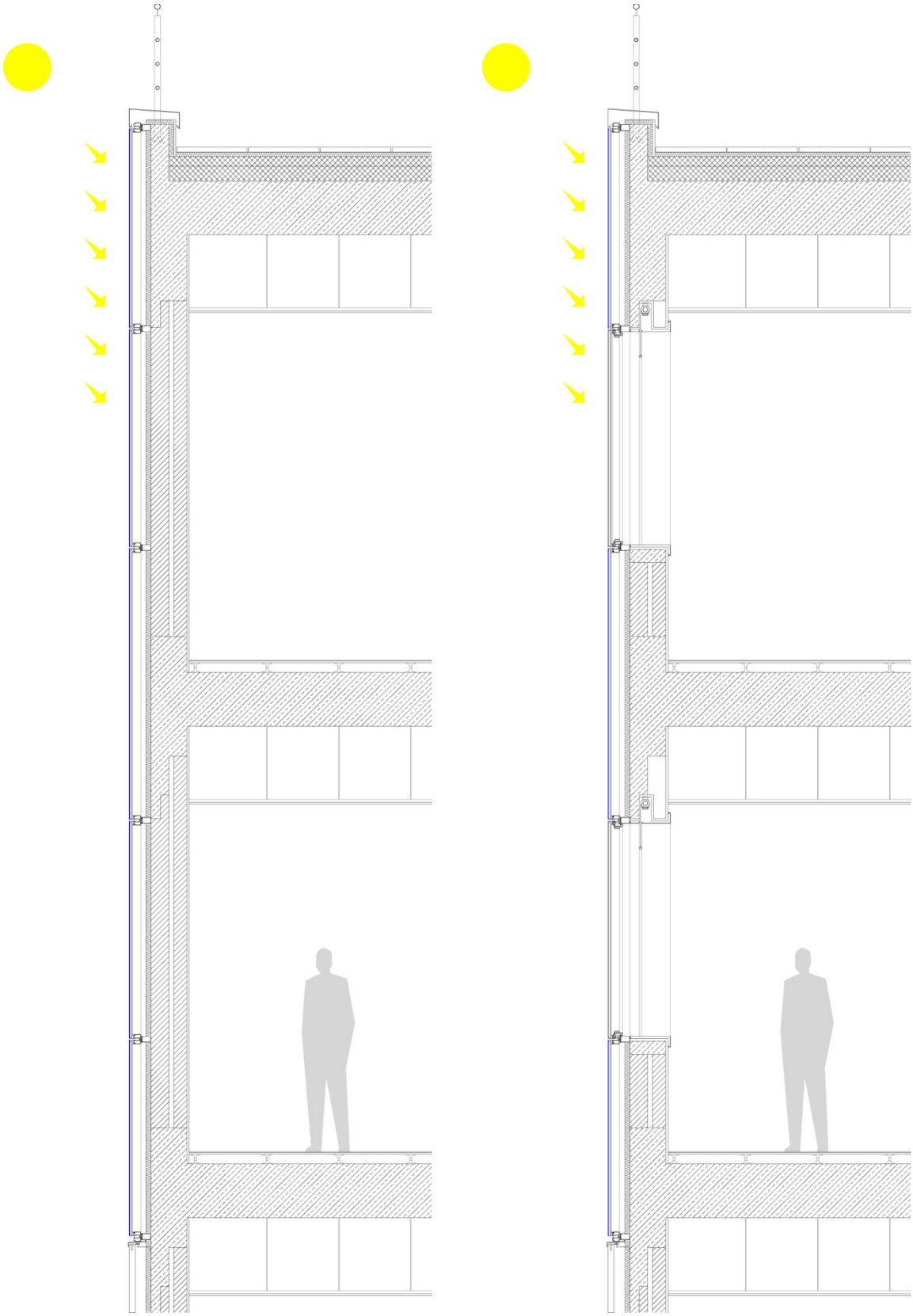


Figura 7.11 – Proposta A - corte zona opaca e vãos (escala 1/50)

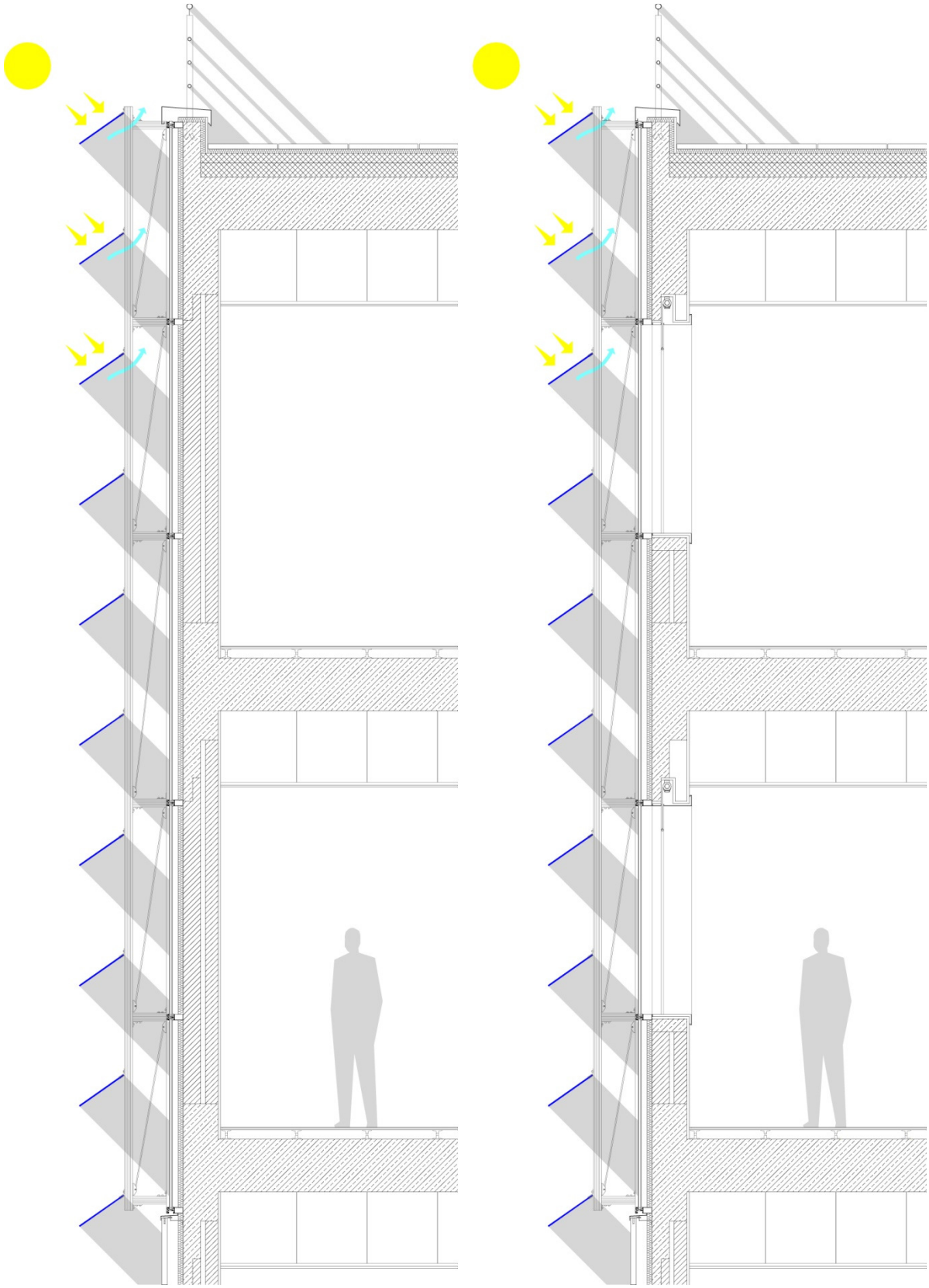


Figura 7.12 – Proposta B - corte zona opaca e vãos (escala 1/50)

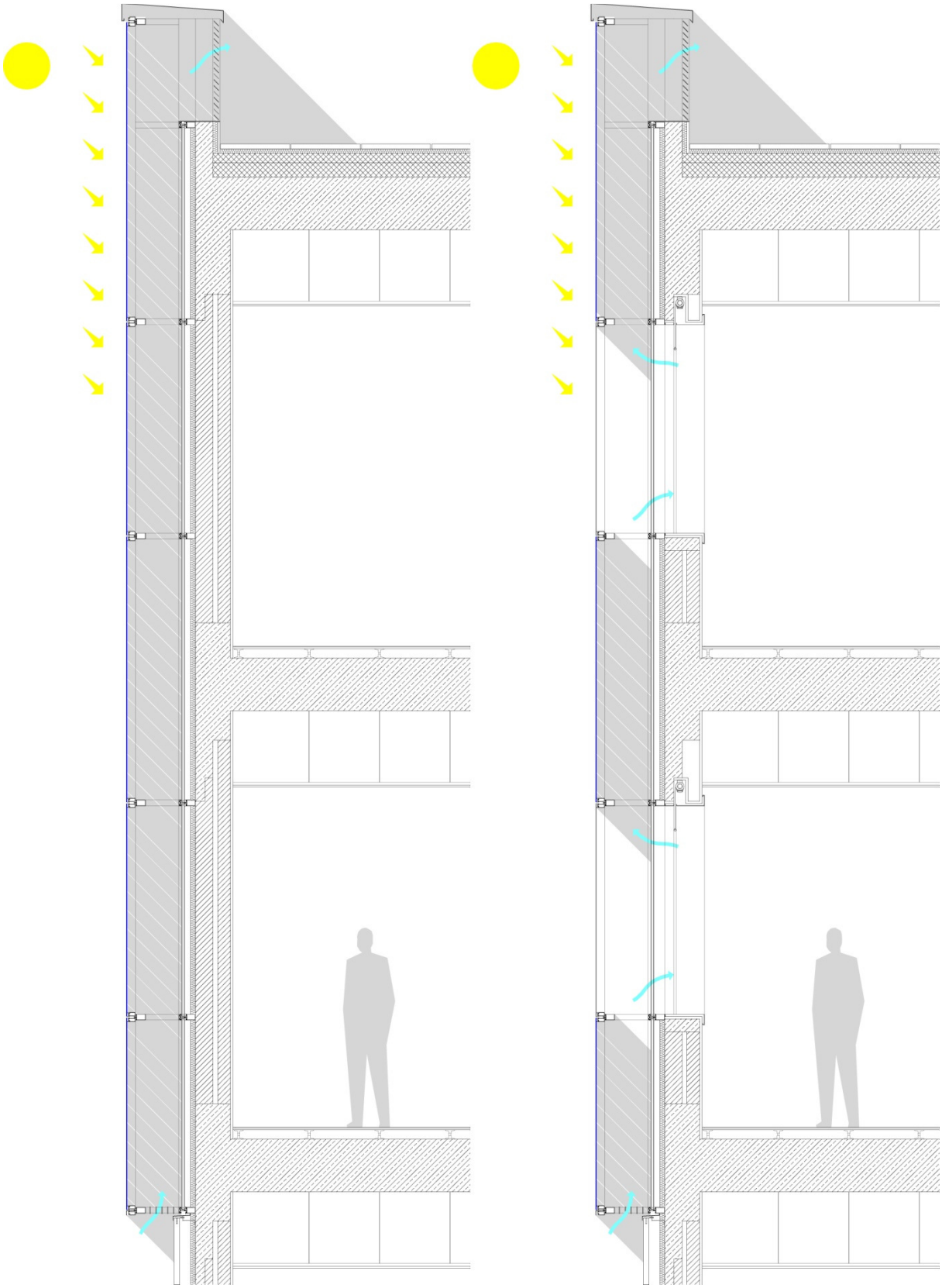


Figura 7.13 - Proposta C corte zona opaca e vãos (escala 1/50)

7.2.4.3 Avaliação das variantes

Alguns dos parâmetros de integração não são considerados na avaliação das variantes devido à sua inadequação a este caso de estudo. Esses parâmetros consistem nos seguintes: "A5 – Segurança abastecimento", devido ao edifício já possuir um sistema *backup* em funcionamento; "C2 – Operabilidade e utilização", devido às soluções propostas não possuírem mecanismos operáveis; e "E1 – Integração no contexto urbano", devido ao facto se tratar de um edifício existente e do objetivo inicial de manter a sua materialidade visível.

Na Tabela 7.10 estão reunidas as classificações obtidas na avaliação (no Desdobrável 1 está patente uma descrição detalhada de cada parâmetro). Neste caso, nos parâmetros A1, G1 e G2, foram consideradas as valorizações por área (m^2) e, relativamente ao parâmetro G3 e em função dos objetivos definidos, determinou-se que o retorno económico deveria ser inferior a 15 anos. No parâmetro "B2 – Posicionamento – sombreamento", apenas foi registado que será necessário ter em atenção as condicionantes de sombreamento no projeto do sistema fotovoltaico, devendo ser avaliado o desempenho do sistema numa fase de desenvolvimento posterior, em que o nível de detalhe será maior e permitirá essa avaliação.

Considerando os 23 parâmetros avaliados (de 27 no total) é definido o seu fator de importância. Neste caso, de acordo com os objetivos iniciais definidos, privilegiam-se os parâmetros relativos à geração de energia, ao contributo para o desempenho energético, e à integração formal, atribuindo-lhes um peso relativo maior.

Tabela 7.10 – Resultados da avaliação das propostas (avaliação detalhada no Desdobrável 1)

		Classificação das variantes			
	Categorias de integração	**A**	**B**	**C**	**Fator de importância**
A	**Integração energética**				
A1	Produção energética anual (kWh/m^2)	1	2	1	2
A2	Balanço energético	0	0	0	1
A3	Energia incorporada (anos)	1	2	0	1
A4	Potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\ equiv}$)	1	2	1	1
A5	Segurança abastecimento	*O edifício já possui um sistema backup.*			
A6	Contributo para o desempenho energético	1	1	2	2
B	**Integração morfológica**				
B1	Posicionamento - orientação e inclinação	0	0	0	1
B2	Posicionamento - sombreamento				
B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	1	1	1	1
B4	Coeficiente reflexão	0	0	0	1
B5	Controlo de operação e temperatura	0	1	1	1

Tabela 7.10 – (continuação)

		Classificação das variantes			
	Categorias de integração	A	B	C	Fator de importância
C	**Integração multifuncional**				
C1	Contributo para o desempenho não energético	1	0	1	1
C2	Operabilidade e utilização	*Não considerado.*			
D	**Integração construtiva**				
D1	Grau de integração	1	1	1	1
D2	Solução construtiva - distribuição	1	1	1	1
D3	Solução construtiva - adaptabilidade	1	1	1	1
E	**Integração formal**				
E1	Integração no contexto urbano	*Não considerado.*			
E2	Superfície	0	1	0	2
E3	Componentes - módulos e coletores	1	1	1	2
E4	Componentes - partes complementares	1	1	1	2
F	**Integração temporal**				
F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	1	1	0	1
F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	1	1	1	1
F3	Manutenção - utilização	1	1	1	1
F4	Manutenção - acessibilidade	0	0	0	1
G	**Balanço económico**				
G1	Custo (€/m^2)	2	0	0	1
G2	Valor financeiro (€/m^2)	2	0	0	1
G3	Retorno do investimento	1	1	0	1
Total (soma dos parâmetros considerados - máximo 33)		**19**	**19**	**14**	
Total (aplicação do fator de importância em função dos requisitos estabelecidos pelo projetista e/ou Dono de Obra)		**23**	**25**	**21**	

Verifica-se que a variante mais vantajosa em relação aos objetivos propostos é a proposta B. Contudo, para o desenvolvimento das soluções terá sentido explorar também a proposta A. Salienta-se que se os objetivos iniciais fossem outros, tais como privilegiar a geração de energia e o menor preço inicial, ou seja, valorizando os parâmetros A1 e G1, a proposta A seria a mais vantajosa. Confrontando as

propostas com as medidas de melhoria do desempenho existentes (Tabela 7.2), a viabilidade de integração de SSA é positiva, uma vez que concilia a geração de energia com a melhoria do desempenho da envolvente, num tempo de retorno inferior a 15 anos.

Ainda com base na avaliação das 3 variantes é possível identificar aspetos a ter em conta, na sua redefinição ou no seu desenvolvimento nas fases posteriores, através da análise dos parâmetros com classificação nula. Neste caso, a classificação nula em determinados parâmetros deve-se, em geral, ao facto do edifício ser pré-existente, patente em aspetos como uma orientação e inclinação desfavoráveis. Contudo, no caso do parâmetro "F4 – Manutenção – acessibilidade" é percetível que uma possível reconfiguração das propostas poderia ser benéfica em termos de acessibilidade nas operações de manutenção.

A Tabela 7.11 e a Figura 7.14 apresentam a avaliação das 3 propostas em função dos indicadores de integração pré-definidos que poderão influir na decisão final.

Tabela 7.11 – Resultado dos indicadores de integração para cada variante

Indicadores	Parâmetros		A	B	C
Morfogénese	A6	Contributo para o desempenho energético	1	1	2
	B	Integração morfológica	0,25	0,50	0,50
	C1	Contributo para o desempenho não energético	1	0	1
	E	Integração formal	0,66	1	0,66
	Total (pontuação máxima: 6)		**2,91**	**2,5**	**4,16**
Interferência funcional	A6	Contributo para o desempenho energético	1	1	2
	C	Integração multifuncional	1	0	1
	D	Integração construtiva	1	1	1
	F3	Manutenção - utilização	1	1	1
	Total (pontuação máxima: 6)		**4**	**3**	**5**
Ambiental	A	Integração energética	1	2	1
	D3	Solução construtiva - adaptabilidade	1	1	1
	F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	1	1	0
	F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	1	1	1
	Total (pontuação máxima: 7)		**4**	**5**	**3**
Manutenção	B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	1	1	1
	F3	Manutenção - utilização	1	1	1
	F4	Manutenção - acessibilidade	0	0	0
	Total (pontuação máxima: 3)		**2**	**2**	**2**

		Classificação das variantes					
		A		**B**		**C**	
A	**Integração energética**						
A1	Produção energética anual	Total 71564 kWh/ano (fachada sul 16003 kWh/ano; fachada poente 55561 kWh/ano)	2	Total 48588 kWh/ano (fachada Sul 1265 kWh/ano; fachada poente 37323 kWh/ano)	1	Total 71399 kWh/ano (fachada Sul16603 kWh/ano; fachada poente 54796 kWh/ano)	1
		144 kWh/m^2	1	195 kWh/m^2	2	126 kWh/m^2	1
A2	Balanço energético [(a)]	NZEB = 0,18 “Balanço negativo”.	0	NZEB = 0,14 “Balanço negativo”.	0	NZEB = 0,18 “Balanço negativo”.	0
A3	Energia incorporada [(b)]	EPBT = 2,5 anos; ERF = 12.	1	EPBT = 1,85 anos; ERF = 16.	2	EPBT = 2,87 anos; ERF = 10.	0
A4	Potencial de aquecimento global [(c)]	A geração de eletricidade fotovoltaica corresponde uma redução de 25763 kg CO_2 equiv/ano na fase de utilização.	1	A geração de eletricidade fotovoltaica corresponde a uma redução de 17492 kg CO_2 equiv/ano na fase de utilização.	2	A geração de eletricidade fotovoltaica corresponde a uma redução de 25704 kg CO_2 equiv/ano na fase de utilização.	1
A5	Segurança abastecimento	*Não considerado. O edifício já possui um sistema backup.*					
A6	Contributo para o desempenho energético	Isolamento térmico.	1	Proteção solar (redução dos ganhos solares).	1	Proteção solar, isolamento térmico, recuperação de calor e ventilação.	2
B	**Integração morfológica**						
B1	Posicionamento - orientação e inclinação	Fachada sul – 65%; fachada poente – 51%.	0	Fachada sul – 100%; fachada poente – 69%.	0	Fachada sul 53%; fachada poente 53%.	0
B2	Posicionamento - sombreamento	O modo como as superfícies são afetadas pelo sombreamento é similar nas três propostas. Verificam-se sombreamentos parciais pelo próprio edifício (devido à sua configuração volumétrica). As árvores localizadas em frente da fachada poente poderão projetar sombras parciais no final do dia, efeito minimizado no inverno por serem de folha caduca. O projeto deverá ter em conta estas condicionantes.					
B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	O ângulo de instalação permite a autolimpeza.	1	O ângulo de instalação permite a autolimpeza.	1	O ângulo de instalação permite a autolimpeza.	1
B4	Coeficiente reflexão	A solução arquitetónica não inclui elementos que potenciem a radiação incidente nos sistemas.	0	A solução arquitetónica não inclui elementos que potenciem a radiação incidente nos sistemas.	0	A solução arquitetónica não inclui elementos que potenciem a radiação incidente nos sistemas.	0
B5	Controlo de temperatura	Nesta solução a ventilação não é possível (a solução existente não consiste numa fachada ventilada convencional, mas numa fachada cortina).	0	A ventilação é garantida pelo modo como os módulos são integrados na fachada.	1	A ventilação é garantida pelo modo como os módulos são integrados na fachada.	1
C	**Integração multifuncional**						
C1	Contributo para o desempenho não energético	Proteção climática, estanquidade, acústica.	1	Apesar das lamelas de sombreamento contribuírem para proteger a fachada do clima, como da chuva incidente, o desempenho da envolvente não depende deste sistema.	0	Proteção climática, acústica	1
C2	Operabilidade e utilização	*Não considerado. Os SSA não conformam sistemas passiveis de operação pelo utilizador.*					
D	**Integração construtiva**						
D1	Grau de integração	Os módulos são um pré-requisito para a integridade funcional.	1	Os módulos são um pré-requisito para a integridade funcional.	1	Os módulos são um pré-requisito para a integridade funcional.	1
D2	Solução construtiva - distribuição	Possibilidade de integração no espaço de ar conformado pela fachada cortina.	1	Possibilidade de integração nos sistemas de fixação.	1	Possibilidade de integração nos sistemas de fixação.	1
D3	Solução construtiva - adaptabilidade	A substituição ou remoção dos módulos é idêntica ao preenchimento da fachada cortina.	1	Os cenários de reparação e substituição não colocam em causa a integridade da envolvente. Futura intervenção facilitada.	1	Os cenários de reparação e substituição não colocam em causa a integridade da envolvente. Futura intervenção facilitada.	1
E	**Integração formal**						
E1	Integração no contexto urbano	*Não considerado.*					
E2	Superfície	Ao manter a grelha existente dos perfis de alumínio, a superfície conformada pelos SSA mantém a coordenação dimensional, geométrica e morfológica da envolvente. Contudo a marcação dos vãos é acentuada.	0	Apesar da alteração da superfície, o ritmo das lamelas contribui para uma qualidade figurativa uniforme da envolvente, mantendo assim o princípio compositivo sugerido pelo revestimento existente (vidro exterior colado) que anula a perceção entre vão-janela e revestimento.	1	A superfície dos SSA mantém a coordenação dimensional, geométrica e morfológica da envolvente. Contudo a marcação dos vãos é acentuada na fachada poente, e o aumento da fachada em altura modifica a leitura da fachada original.	0

(a) Para o balanço energético é contabilizada a produção estimada do sistema fotovoltaico existente na cobertura do edifício no total de energia renovável produzida, e excluído o consumo dos equipamentos;

(b) Considerando a energia incorporada em módulos fotovoltaicos monocristalinos de 3257 MJ_{ep}/m^2, relativamente à produção e fim de vida (Fthenakis et al., 2009), 2,5 kWh_{ep}/kWh como fator de conversão entre energia primária e energia final para eletricidade (Despacho n.º 15793-L/2013), um ciclo de vida de 30 anos, e sem entrar em conta com a energia despendida na instalação, operação e manutenção;

(c) Considerando 2,5 kWh_{ep}/kWh o fator de conversão entre energia primária e energia final para eletricidade, e 0,144 (kg CO_2/kWh) o fator de conversão de energia primária (sendo a eletricidade a fonte de energia) para CO_2 (Despacho n.º 15793-L/2013);

Desdobrável 1 – Avaliação das variantes de projeto

		A		B		C	
E	**Integração formal**						
E3	Componentes – módulos e coletores	A forma e dimensão modular da fachada, assim como a leitura da junta não se alteram em termos de composição. A cor predominante também é mantida através do tipo de célula (silício monocristalino), e da opção da mesma cor na camada posterior do módulo. Contudo, a textura altera-se (apesar do efeito à distância ser uniforme).	1	A distribuição das lamelas segue o princípio compositivo e geométrico da fachada. A cor predominante é mantida através do tipo de célula (silício monocristalino),e da opção da mesma cor na camada posterior do módulo.	1	O segundo pano de vidro, composto pelos módulos, segue a forma e dimensão modular da fachada, e mantem a leitura da junta. A cor predominante é mantida através do tipo de célula (silício monocristalino). A opção por módulos vidro/vidro permite uma ligeira transparência em relação ao pano de vidro existente.	1
E4	Componentes – partes complementares	O circuito solar e partes complementares não são visíveis na envolvente, enquadrados na caixa-de-ar.	1	O circuito solar é integrado nas fixações, que seguem o esquema compositivo da fachada existente.	1	O circuito solar é integrado nas fixações, que seguem o esquema compositivo da fachada existente.	1
F	**Integração temporal**						
F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	Módulos fotovoltaicos (vidro duplo) – 497,6 m^2 Substituição do vidro duplo dos vãos-janela – 123,6 m^2 Reciclagem dos envidraçados existentes – 621,2 m^2	1	Módulos fotovoltaicos (lamelas) – 249 m^2 Perfis de fixação e capeamento – 773,8 ml Perfis da estrutura de fixação – 418,8 ml Reciclagem perfis de colagem do vidro - 773,8 ml	1	Módulos fotovoltaicos (vidro/vidro) – 497,6 m^2 Vidro (sobre vãos-janela) - 123,6 m^2 Perfis de fixação e capeamento - 773,8 ml Perfis de fachada dupla – 418,8 ml Remate platibanda e gaveto – 60,7 m^2 Grelhas – 55,2 m^2 Estrutura metálica platibanda - 26 ml (contabilizar ligações a sistema AVAC) Reciclagem perfis de colagem do vidro - 773,8 ml	0
F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	Vidro e alumínio são materiais recicláveis.	1	Vidro e alumínio são materiais recicláveis.	1	Vidro, alumínio e aço são materiais recicláveis.	1
F3	Manutenção - utilização	A manutenção não condiciona o funcionamento ou a utilização do edifício. A substituição do revestimento coloca em causa a camada exterior de proteção climatérica da envolvente durante essa operação, contudo não condiciona a utilização do edifício.	1	A manutenção e substituição dos módulos fotovoltaicos não condicionam o funcionamento ou a utilização do edifício	1	A manutenção e substituição dos módulos fotovoltaicos não condicionam o funcionamento ou a utilização do edifício.	1
F4	Manutenção - acessibilidade	Manutenção dos módulos possível apenas pelo exterior e através de sistemas de elevação/suspensão. Eventual necessidade de desmontagem dos módulos para acesso às partes complementares (idealmente promover o acesso pontual pelo interior da fachada).	0	Manutenção dos módulos possível apenas pelo exterior e através de sistemas de elevação/suspensão. Necessidade de desmontagem dos módulos para acesso à fachada envidraçada.	0	Manutenção dos módulos possível apenas pelo exterior e através de sistemas de elevação/suspensão. Necessidade de desmontagem dos módulos para acesso à fachada envidraçada (possibilidade de criação de um corredor técnico entre panos envidraçados que permita a circulação e a manutenção).	0
G	**Balanço económico**						
G1	Custo [(d)]	Módulos, inversor e ligações – 83 597 € Intervenção fachada – 19 904 € Transporte e montagem – 68 657 € Manutenção – 3 662 €/ano Custo – 172 158 € (sem manutenção)	0	Módulos, inversor e ligações – 41 832 € Intervenção fachada – 27 390 € Transporte e montagem – 39 459 € Manutenção – 2 104 €/ano Custo – 108 681 € (sem manutenção)	2	Módulos, inversor e ligações – 106 513 € Intervenção fachada – 81 619 € Transporte e montagem – 70 036 € Manutenção – 3 735 €/ano Custo – 258 168 € (sem manutenção)	0
		Custo (m^2) – 346 € (sem manutenção)	2	Custo (m^2) – 436 € (sem manutenção)	0	Custo (m^2) – 455 € (sem manutenção)	0
G2	Valor financeiro	Consumo de energia evitado [(e)] – 10 162 €/ano Materiais evitados (vidro duplo) – 24 880 € Balanço económico (custo – materiais evitados) – 147 278 €	0	Consumo de energia evitado [(e)] – 6 899 €/ano Materiais evitados (lamelas alumínio) – 7 470 € Balanço económico (custo – materiais evitados) – 101 211€	2	Consumo de energia evitado [(e)] – 10 139 €/ano Materiais evitados (vidro) – 17 004 € Balanço económico – 241 164 €	0
		Balanço económico (m^2) – 296 €	2	Balanço económico (m^2) – 406 €	0	Balanço económico (m^2) – 425 €	0
G3	Retorno do investimento [(f)]	14,5 anos.	1	14,7 anos.	1	23,8 anos.	0
	TOTAL[(g)] (pontuação máxima: 33)		**19**		**19**		**14**

(d) Os custos representam ordens de grandeza de acordo com os resultados PVSYST, os custos relativos à intervenção na fachada foram adaptados às variantes propostas, não inclui o fim de vida. Cálculos com maior precisão devem ser efetuados em fases posteriores de projeto;

(e) O consumo de energia evitado tem como referência o valor de 0,142 €/kWh, baseado no preço eletricidade no segmento de consumo industrial relativo ao 2º semestre de 2015 (DGEG, 2016b);

(f) Sem considerar o aumento do preço da energia;

(g) Na pontuação máxima não são contabilizados os parâmetros não considerados (A5, B2, C2 e E1), e nos parâmetros A1, G1 e G2 é tida em conta a valorização por m^2 (e não o valor total).

Desdobrável 1 - (continuação)

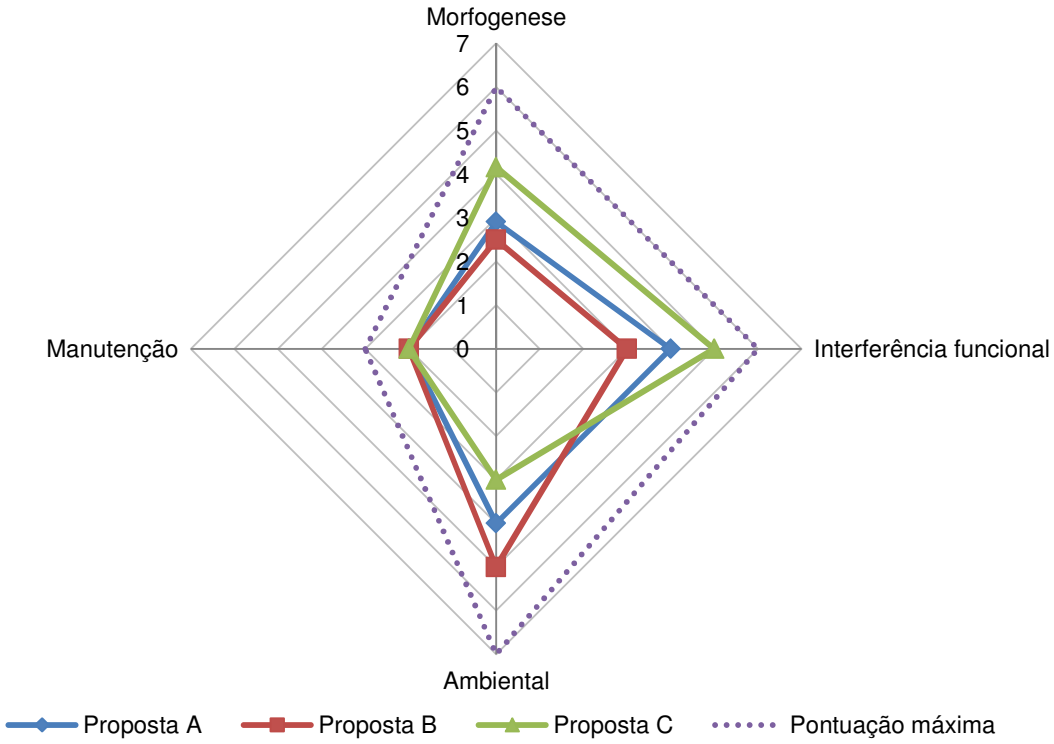


Figura 7.14 – Relação entre os indicadores de integração das 3 variantes

Salienta-se ainda que a proposta A aumenta o isolamento térmico pela melhoria do revestimento envidraçado em zona opaca. No entanto, a envolvente já possui uma configuração com um desempenho térmico considerável e, nesse sentido, melhorar o seu desempenho através do aumento da espessura do isolamento térmico em detrimento dos envidraçados de revestimento da zona opaca seria uma opção razoável (atuando contudo na melhoria dos envidraçados dos vãos-janela). Neste contexto, as propostas B e C reduzem os ganhos térmicos de toda a fachada através da proteção solar. Contudo, estas 3 opções também demonstram que seria possível recorrer a uma solução construtiva de fachada ventilada (em detrimento de uma fachada cortina aplicada sobre uma envolvente pesada), na qual se poderia recorrer a uma tecnologia fotovoltaica com um custo menor, como as células de filme fino, que permitiria, para além do revestimento da zona opaca (sem serem integrados em vidros duplos), ser utilizados nos vãos-janela, neste caso através de sua inserção em vidro duplos, permitindo o contacto visual devido à sua natureza translúcida (apesar de filtrar a luz e afetar a ligação visual em termos de cor). Esta solução mudaria a cor da fachada para os tons disponíveis nos filmes finos, no entanto, manteria o seu aspeto uniforme resultante das características de um revestimento envidraçado.

7.3 CASO DE ESTUDO 2 – HABITAÇÃO UNIFAMILIAR

O segundo caso de estudo consiste numa habitação unifamiliar de carácter social, localizada no Bairro Maria dos Anjos Amaral (lote 13), na cidade de Lagoa (ilha de São Miguel, no Arquipélago dos Açores). Trata-se de uma habitação de tipologia T3, com 2 pisos acima do solo e uma área útil de 81 m^2. Situa-se num loteamento em banda (Figura 7.15) composto por 17 habitações. O projeto data de 2010 e a primeira habitação começou a ser construída em 2011. O conjunto encontra-se neste momento perto da sua conclusão, sendo a construção efetuada em regime de autoconstrução.

As habitações possuem uma área de implantação quadrada (8x8 m), e a orientação predominante, ditada pela frente de rua, é este/oeste. Devido à sua configuração volumétrica possuem dois pequenos vãos orientados a norte, e uma cobertura inclinada orientada a sul (Figura 7.17).



Figura 7.15 – Vista da frente de rua (imagem virtual)

Relativamente à organização interior, no piso térreo localizam-se as zonas comuns, designadamente sala e cozinha, com ligação direta ao logradouro, assim como um quarto e instalação sanitária com acessibilidade universal (por imposição programática). No piso superior situam-se dois quartos, um quarto de banho, e um amplo terraço. Salienta-se que esta tipologia foi concebida de modo a facilmente evoluir para uma tipologia T4, na qual o quarto adicional ocupa parte do terraço formando duas varandas (Figura 7.16). Assim como a tipologia T2 permite a evolução para T3, através da adição de um quarto no piso térreo (Figura 7.17). Refere-se que a configuração volumétrica foi concebida de modo às diferentes tipologias manterem uma leitura urbana uniforme. Através da cobertura inclinada, que providencia uma volumetria comum às três tipologias, é mantida uma leitura constante da frente de rua, independentemente do tipo de tipologia existente.

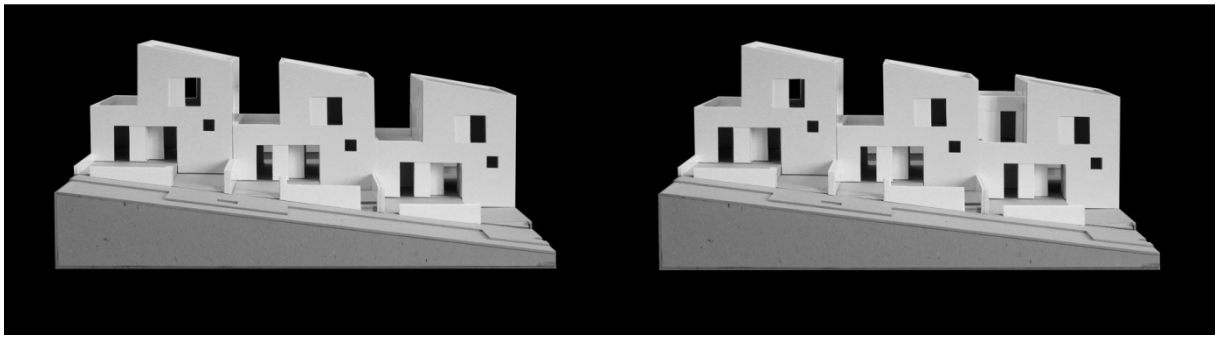


Figura 7.16 – Evolução da tipologia T3 para T4 através da ocupação do terraço

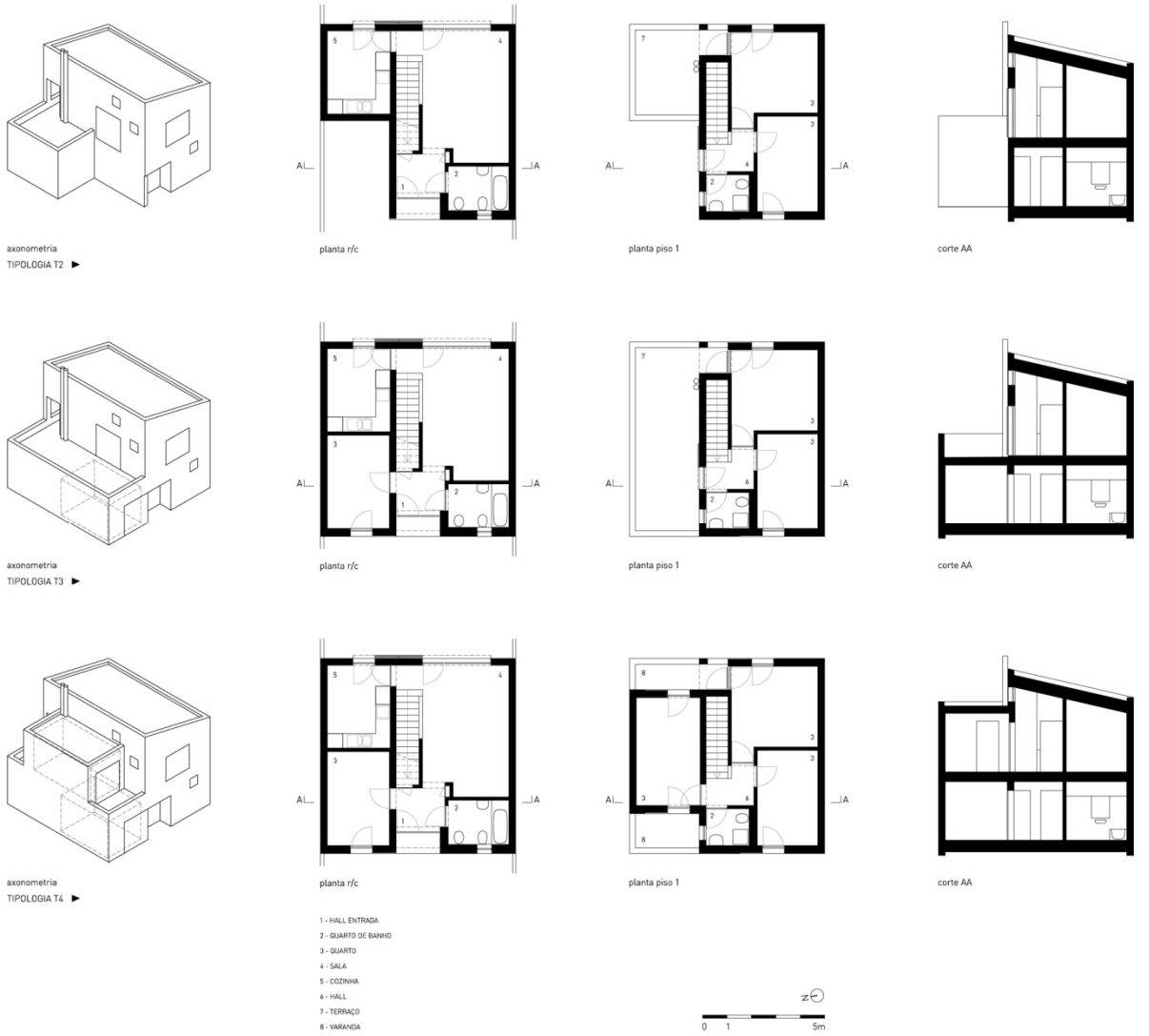


Figura 7.17 – Axonometrias, plantas e cortes das 3 tipologias

Tendo em conta os elementos necessários para a aplicação da metodologia, caracteriza-se a envolvente e o consumo energético da habitação.

7.3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE

A fachada consiste numa parede de alvenaria de bloco de betão de pano simples com isolamento térmico pelo interior, pontuada por vãos de dimensão variável. A envolvente vertical apresenta a seguinte constituição (do exterior para o interior): reboco; alvenaria (espessura variável); isolamento térmico; e gesso cartonado. Em zonas com elementos estruturais, estes substituem os panos de alvenaria, resultando numa composição heterógena. A fachada possui coeficientes de transmissão térmica entre 0,60 e 0,33 $W/m^2.ºC$ (Filipe, 2010). Os vãos são constituídos por caixilharias de alumínio com vidro duplo, apresentamdo coeficientes de transmissão térmica de 2,2 e 2,1 $W/m^2.ºC$ (Martins e Câmara, 2010). À exceção de três vãos de pequena dimensão, os restantes possuem proteção solar pelo exterior através de portadas de correr em alumínio.

Existem dois tipos de cobertura, plana e inclinada. Ambas consistem numa laje de betão aligeirada com isolamento térmico. A cobertura plana consiste numa solução invertida revestida com lajetas de betão, e apresenta um coeficiente de transmissão térmica de 0,52 W/m^2.ºC. A cobertura inclinada é revestida com uma chapa metálica de cor cinza, e apresenta um coeficiente de transmissão térmica de 0,37 W/m^2.ºC (Filipe, 2010).

7.3.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO

A habitação situa-se uma altitude de 104,47 m (cota de soleira), na região climática I1V1. No Certificado de Desempenho Energético (Filipe, 2010) é atribuída uma classe energética B- (salienta-se que o contexto especifico do projeto condicionava a obtenção de uma classificação superior, devido a vários motivos, tais como a altitude do local de implantação, a orientação predominante, o fator forma e o limite de custos), e são apresentados os seguintes valores para as condições de conforto térmico de referência, com base nas necessidades nominais de energia útil:

- Aquecimento – 48,38 kWh/m^2.ano;
- Arrefecimento – 7,95 kWh/m^2.ano;
- Preparação das águas quentes sanitárias - 34,44 kWh/m^2.ano.

Estes valores traduzem-se num consumo anual de 7352 kWh (baseado nas formas de utilização de energia previstas no Certificado Energético e excluindo a energia gerada pelo coletor solar térmico). A energia utilizada na habitação é a energia elétrica, fornecida a partir da rede pública, e a energia térmica, destinada a AQS, fornecida através de dois coletores solares térmicos planos. Os coletores, que funcionam com um sistema de termossifão, possuem uma área de captação de 4 m^2, tendo sido prevista a sua instalação de forma "adicionada" à cobertura e com a orientação e inclinação desta e produzem anualmente 1577 kWh. Deste modo, considera-se o consumo final anual para balanço energético de 8929 kWh.

7.3.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Procede-se à verificação da viabilidade da inclusão de sistemas solares ativos, tendo em conta o programa funcional do edifício, as características do local e a regulamentação existente.

7.3.3.1 Determinação da viabilidade da integração dos SSA (Programa preliminar)

Tendo em conta as necessidades energéticas, considera-se como objetivo principal atingir um balanço energético quase nulo. Propõe-se a intervenção na cobertura inclinada a sul, recorrendo a sistemas solares ativos, de forma a aproveitar a energia gerada e explorar a sua capacidade multifuncional. Como objetivos adicionais, pretende-se verificar o impacto na aparência do edifício, no que respeita a volumetria e a materialidade visível, e como a aplicação da metodologia poderia condicionar decisões de projeto, assim como analisar o custo da integração e da geração de energia numa situação de custos controlados.

As tabelas seguintes reúnem a informação inicial necessária relativa ao programa funcional, ao local, e a nível regulamentar.

Tabela 7.12 – Programa funcional do edifício

Uso	Tipo de edifício – habitação unifamiliar. Horário geral de funcionamento – desconhecido (maior percentagem de utilização provavelmente fora de um horário laboral corrente).
Área	Área útil - 81 m^2.
Necessidades energéticas	Consumo anual global – 8929 kWh (consumo associado ao desempenho energético – aquecimento, arrefecimento e aquecimento de águas sanitárias, excluindo iluminação).
Requisitos da envolvente	Sem condicionantes específicas para além dos regulamentos gerais.

Tabela 7.13 – Características do local

Localização	37°43'20" Norte, 25°30'51" Oeste.
Exposição solar	Radiação média anual no plano horizontal - 4240 Wh/m^2/dia (PVGIS, 2010)
Orientação	Frente de rua (Oeste), azimute de 100°. Plano da cobertura, azimute 10°.
Inclinação	As superfícies de fachada do edifício são verticais (90°), a cobertura plana e inclinada (possui uma inclinação de 13°).
Sombreamento	Devido à conformação do terreno, a superfície da cobertura inclinada é isenta de sombra.
Requisitos da envolvente	Sem condicionantes específicas.

Tabela 7.14 – Condicionantes regulamentares

Urbanística	Neste caso, como se trata de um edifício existente, não se colocam condicionantes regulamentares urbanísticas.
Energética	Obrigatória a instalação de coletores térmicos para AQS.

A partir da informação sintetizada nas tabelas anteriores, verifica-se que no programa funcional do edifício (habitação), de uma forma geral, o horário típico de utilização não coincide com o período de maior disponibilidade de radiação solar. Contudo, não existem condicionantes regulamentares que ponham em causa a utilização de SSA, existindo, inclusivamente, a imposição da utilização de coletores solares térmicos para AQS. Como se trata de um edifício existente, a implantação e a volumetria encontram-se definidas. A cobertura inclinada destaca-se como superfície com potencial para a integração de SSA (Figura 7.18 e Tabela 7.15).

Através da metodologia proposta estabeleceram-se variantes, em termos de inclinação da cobertura e tipo de tecnologia solar, de modo a perceber qual o seu impacto. Nesse sentido, recorre-se a esquemas de possíveis conformações arquitetónicas e do contributo integrado dos SSA, estimando-se a produção energética bruta associada.

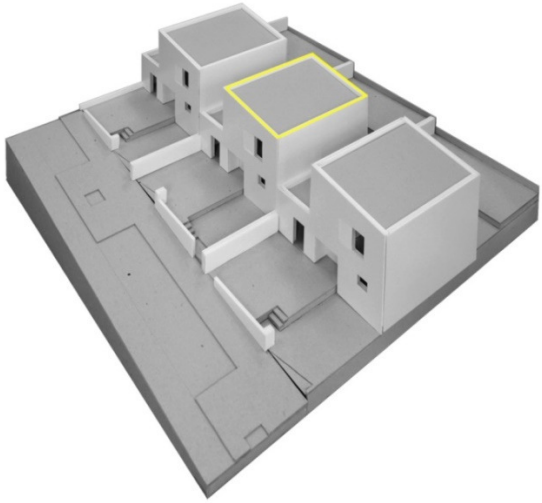


Figura 7.18 – Superfície da cobertura inclinada existente SSA (identificada a amarelo)

Tabela 7.15 – Superfície da cobertura inclinada existente

Piso	**Orientação (azimute)**	**Inclinação**	**Descrição**	**Área[(a)] m²**
2	10° (sul)	13°	Revestimento zona opaca.	42,4

(a) Área determinada a partir das telas finais do projeto de Arquitetura.

7.3.3.2 Geração de variantes (Programa Base e Estudo Prévio)

Tendo em conta os objetivos definidos e a delimitação da zona da envolvente a estudar, explora-se o potencial de algumas opções de integração dos sistemas solares ativos através das respetivas estimativas brutas de produção de energia (Tabela 7.16).

Tabela 7.16 - Potencial de integração de SSA e estimativas brutas de produção energética (período anual)

Potencial de integração de SSA (por área de sistema)		**Estimativa[(a)] (kWh/ano)**	**Relação com posição otimizada** (35° inclinação e 0° orientação)
1	Alteração do revestimento da cobertura		
1.1	Revestimento da cobertura em módulos fotovoltaicos monocristalinos (38 m²), mantendo a inclinação de 13°.	8005	95,5% (8377 kWh/ano)
1.2	Revestimento da cobertura em módulos fotovoltaicos monocristalinos (38 m²), com a inclinação otimizada (35°).	8362	99,8% (8377 kWh/ano)
1.3	Revestimento da cobertura para módulos fotovoltaicos de filme fino (38 m²), com a inclinação otimizada (35°).	5226	97,9% (5236 kWh/ano)

(a) Estimativas brutas da geração de energia obtidas através da opção de pré-dimensionamento do software PVSYST, considerando a região climática de Ponta Delgada.

Verifica-se que em termos de produção de energia é possível atingir um desempenho de balanço energético quase nulo (tendo como referência um consumo de 8929 kWh/ano). Para além da geração de energia, os SSA podem constituir o revestimento final da cobertura e assegurar a proteção climatérica. Tendo em conta estas possibilidades, e assumindo que no processo de conceção poderia ser aceite a alteração da inclinação da cobertura para 35°, propõe-se a análise de diferentes tecnologias fotovoltaicas na conformação do revestimento da cobertura:

- Proposta A – Coletores solares térmicos para AQS e restante cobertura revestida a módulos fotovoltaicos monocristalinos;
- Proposta B – Coletores solares térmicos para AQS e restante cobertura revestida a módulos fotovoltaicos policristalinos;
- Proposta C - Coletores solares térmicos para AQS e restante cobertura revestida a módulos fotovoltaicos de filme fino (existem à partida as vantagens do seu menor custo e do comportamento melhorado à radiação difusa, relativamente às tecnologias cristalinas).

7.3.3.3 Avaliação das variantes

Os parâmetros de integração não considerados na avaliação, devido à sua inadequação ao caso de estudo, consistem nos seguintes: "C2 – Operabilidade e utilização", devido às propostas não possuírem mecanismos operáveis; e "F1 - Redução da utilização de recursos e do desperdício", devido ao facto das variantes utilizarem o mesmo tipo de recursos na conformação da solução construtiva, apenas variando o tipo de tecnologia fotovoltaica.

Na Tabela 7.17 estão reunidas as classificações obtidas na avaliação (no Desdobrável 2 está patente uma descrição detalhada de cada parâmetro). Relativamente aos parâmetros A1, G1 e G2, foram consideradas as valorizações totais (em detrimento do valor por m^2) e, no caso do parâmetro G3, e em função dos objetivos definidos, determinou-se que o retorno económico deveria ser igual ou inferior a 10 anos. Considerando os 25 parâmetros avaliados (de 27 no total) foram definidos os respetivos fatores de importância, neste caso de acordo com os objetivos iniciais definidos, privilegiando os parâmetros relativos ao balanço energético, à integração formal e ao retorno económico.

Tabela 7.17 – Resultados da avaliação das propostas (avaliação detalhada no Desdobrável 2)

		Classificação das variantes			
	Categorias de integração	**A**	**B**	**C**	**Fator de importância**
A	**Integração energética**				
A1	Produção energética anual (kWh/m^2)	2	1	1	1
A2	Balanço energético	2	2	1	2
A3	Energia incorporada (anos)	2	2	1	1
A4	Potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\ equiv}$)	0	1	2	1
A5	Segurança abastecimento	1	1	1	1
A6	Contributo para o desempenho energético	0	0	0	1

Tabela 7.17 – (continuação)

		Classificação das variantes			
		A	B	C	Fator de importância
B	**Integração morfológica**				
B1	Posicionamento - orientação e inclinação	1	1	1	1
B2	Posicionamento - sombreamento	1	1	1	1
B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	1	1	1	1
B4	Coeficiente reflexão	0	0	0	1
B5	Controlo de operação e temperatura	1	1	1	1
C	**Integração multifuncional**				
C1	Contributo para o desempenho não energético	1	1	1	1
C2	Operabilidade e utilização	*Não considerado.*			
D	**Integração construtiva**				
D1	Grau de integração	1	1	1	1
D2	Solução construtiva - distribuição	1	1	1	1
D3	Solução construtiva - adaptabilidade	1	1	1	1
E	**Integração formal**				
E1	Integração no contexto urbano	0	0	1	2
E2	Superfície	1	1	1	2
E3	Componentes - módulos e coletores	0	0	1	2
E4	Componentes - partes complementares	1	1	1	2
F	**Integração temporal**				
F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	*Não considerado.*			
F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	1	1	1	1
F3	Manutenção - utilização	1	1	1	1
F4	Manutenção - acessibilidade	1	1	1	1
G	**Balanço económico**				
G1	Custo (€/m^2)	0	1	2	1
G2	Valor financeiro (€/m^2)	0	1	2	1
G3	Retorno do investimento	0	0	0	2
Total (soma dos parâmetros considerados – máximo 35)		**20**	**22**	**25**	
Total (aplicação do fator de importância em função dos requisitos estabelecidos pelo projetista e/ou Dono de Obra)		**24**	**26**	**30**	

		Classificação das variantes					
		A		**B**		**C**	
A	**Integração energética**						
A1	Produção energética anual	Total 9939 kWh/ano: 8362 kWh/ano (fotovoltaico), 1577 kWh/ano (solar térmico).	2	Total 9416 kWh/ano: 7839 kWh/ano (fotovoltaico), 1577 kWh/ano (solar térmico).	1	Total 6803 kWh/ano: 5226 kWh/ano (fotovoltaico), 1577 kWh/ano (solar térmico).	1
		234 kWh/m^2	2	222 kWh/m^2	1	160 kWh/m^2	1
A2	Balanço energético [(a)]	NZEB = 1,11 “Balanço positivo”.	2	NZEB = 1,05 “Balanço positivo”.	2	NZEB = 0,76 “Balanço quase nulo”.	1
A3	Energia incorporada [(b)]	EPBT = 1,51 anos; ERF = 20.	2	EPBT = 1,51 anos; ERF = 20.	2	EPBT = 1,66 anos; ERF = 18.	2
A4	Potencial de aquecimento global [(c)]	A geração de eletricidade fotovoltaica e térmica corresponde uma redução de 32374 kg CO_2 equiv/ano na fase de utilização.	0	A geração de eletricidade fotovoltaica e térmica corresponde uma redução de 30492 kg CO_2 equiv/ano na fase de utilização.	1	A geração de eletricidade fotovoltaica e térmica corresponde uma redução de 21084 kg CO_2 equiv/ano na fase de utilização.	1
A5	Segurança abastecimento	O coletor térmico pode garantir parte das necessidades de AQS.	1	O coletor térmico pode garantir parte das necessidades de AQS.	1	O coletor térmico pode garantir parte das necessidades de AQS.	1
A6	Contributo para o desempenho energético	Os sistemas não influem no desempenho energético.	0	Os sistemas não influem no desempenho energético.	0	Os sistemas não influem no desempenho energético.	0
B	**Integração morfológica**						
B1	Posicionamento - orientação e inclinação	Posicionamento próximo do ideal, com perdas inferiores a 10%.	1	Posicionamento próximo do ideal, com perdas inferiores a 10%.	1	Posicionamento próximo do ideal, com perdas inferiores a 10%.	1
B2	Posicionamento - sombreamento	As superfícies não são afetadas por sombreamentos.	1	As superfícies não são afetadas por sombreamentos.	1	As superfícies não são afetadas por sombreamentos.	1
B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	O ângulo de instalação permite a autolimpeza.	1	O ângulo de instalação permite a autolimpeza.	1	O ângulo de instalação permite a autolimpeza.	1
B4	Coeficiente reflexão	A solução arquitetónica não inclui elementos que potenciem a radiação incidente nos sistemas.	0	A solução arquitetónica não inclui elementos que potenciem a radiação incidente nos sistemas.	0	A solução arquitetónica não inclui elementos que potenciem a radiação incidente nos sistemas.	0
B5	Controlo de temperatura	Nesta solução a ventilação é possível (e deverá ser prevista no desenvolvimento da solução construtiva).	1	Nesta solução a ventilação é possível (e deverá ser prevista no desenvolvimento da solução construtiva).	1	Nesta solução a ventilação é possível (e deverá ser prevista no desenvolvimento da solução construtiva).	1
C	**Integração multifuncional**						
C1	Contributo para o desempenho não energético	Proteção climática.	1	Proteção climática.	1	Proteção climática.	1
C2	Operabilidade e utilização	*Não considerado. Os sistemas não configuram soluções passiveis de serem operadas.*					
D	**Integração construtiva**						
D1	Grau de integração	Os SSA são um pré-requisito para a integridade funcional.	1	Os SSA são um pré-requisito para a integridade funcional.	1	Os SSA são um pré-requisito para a integridade funcional.	1
D2	Solução construtiva - distribuição	Possibilidade de integração no espaço de ar.	1	Possibilidade de integração no espaço de ar.	1	Possibilidade de integração no espaço de ar.	1
D3	Solução construtiva - adaptabilidade	A substituição ou remoção dos módulos é facilitada.	1	A substituição ou remoção dos módulos é facilitada.	1	A substituição ou remoção dos módulos é facilitada.	1
E	**Integração formal**						
E1	Integração no contexto urbano	A coloração dos módulos de silício monocristalino não permite uma integração cromática com os telhados tradicionais.	0	A coloração dos módulos de silício policristalino não permite uma integração cromática com os telhados tradicionais.	0	A coloração castanha-avermelhada e escura dos módulos de silício amorfo permite uma integração cromática com os telhados tradicionais.	1

(a) Contabilizando a produção estimada do sistema fotovoltaico existente na cobertura do edifício no total de energia renovável produzida, e excluído o consumo dos equipamentos;

(b) Considerando apenas a energia incorporada no fabrico dos módulos fotovoltaicos e do conjunto de coletores térmicos e tanque (sem entrar em conta com a energia despendida na instalação, manutenção e fim de vida, de modo a tornar comparável os dados existentes cujas fontes não abrangem as mesmas fases de ciclo de vida) - módulos fotovoltaicos monocristalinos 2900 MJ_{ep}/m^2 e policristalinos de 2700 MJ_{ep}/m^2 (Fthenakis et al., 2009), módulos de filme fino de silício amorfo 1980 MJ_{ep}/m^2 (Alsema, 1998) e coletores térmicos planos com sistema de termossifão 12202 MJ_{ep} (todo o sistema) (Ardente et al., 2005), e assumido 2,5 kWh_{ep}/kWh como fator de conversão entre energia primária e energia final para eletricidade (Despacho n.º 15793-L/2013), e um ciclo de vida de 30 anos;

(c) Considerando 2,5 kWh_{ep}/kWh o fator de conversão entre energia primária e energia final para eletricidade, e 0,144 (kg CO_2/kWh) o fator de conversão de energia primária (sendo a eletricidade a fonte de energia) para CO_2 (Despacho n.º 15793-L/2013);

		A		B		C	
E	**Integração formal**						
E2	Superfície	Ao constituir o pano da cobertura, a superfície composta pelos SSA apresenta uma total coordenação dimensional, geométrica e morfológica com a restante envolvente, existindo uma qualidade figurativa uniforme da envolvente. Os coletores térmicos, devido à área que ocupem, integram-se como um elemento pontual nessa superfície.	1	Ao constituir o pano da cobertura, a superfície composta pelos SSA apresenta uma total coordenação dimensional, geométrica e morfológica com a restante envolvente, existindo uma qualidade figurativa uniforme da envolvente. Os coletores térmicos, devido à área que ocupem, integram-se como um elemento pontual nessa superfície.	1	Ao constituir o pano da cobertura, a superfície composta pelos SSA apresenta uma total coordenação dimensional, geométrica e morfológica com a restante envolvente, existindo uma qualidade figurativa uniforme da envolvente. Os coletores térmicos, devido à área que ocupem, integram-se como um elemento pontual nessa superfície.	1
E3	Componentes – módulos e coletores	A modularidade das células cristalinas provoca dissonância em relação à superfície dos coletores térmicos.	0	A modularidade das células cristalinas provoca dissonância em relação à superfície dos coletores térmicos.	0	A modularidade das células de filme fino sugere um aspeto uniforme compatível com a textura dos coletores térmicos.	1
E4	Componentes – partes complementares	As cablagens poderão ser distribuídas sob os módulos ou através de perfis laterais. O tanque do sistema termossifão é colocado como elemento compositivo da cobertura.	1	As cablagens poderão ser distribuídas sob os módulos ou através de perfis laterais. O tanque do sistema termossifão é colocado como elemento compositivo da cobertura.	1	As cablagens poderão ser distribuídas sob os módulos ou através de perfis laterais. O tanque do sistema termossifão é colocado como elemento compositivo da cobertura.	1
F	**Integração temporal**						
F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	*Não considerado. As variantes utilizam o mesmo tipo de recursos na conformação da solução construtiva, apenas varia o tipo de tecnologia fotovoltaica.*					
F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	Os materiais utilizados são recicláveis.	1	Os materiais utilizados são recicláveis.	1	Os materiais utilizados são recicláveis.	1
F3	Manutenção - utilização	A substituição do revestimento coloca em causa a camada exterior de proteção climatérica da cobertura durante essa operação, contudo não condiciona o funcionamento ou a utilização do edifício.	1	A substituição do revestimento coloca em causa a camada exterior de proteção climatérica da cobertura durante essa operação, contudo não condiciona o funcionamento ou a utilização do edifício.	1	A substituição do revestimento coloca em causa a camada exterior de proteção climatérica da cobertura durante essa operação, contudo não condiciona o funcionamento ou a utilização do edifício.	1
F4	Manutenção - acessibilidade	Manutenção dos módulos possível pelo exterior. Eventual necessidade de desmontagem dos módulos para acesso às partes complementares.	1	Manutenção dos módulos possível pelo exterior. Eventual necessidade de desmontagem dos módulos para acesso às partes complementares.	1	Manutenção dos módulos possível pelo exterior. Eventual necessidade de desmontagem dos módulos para acesso às partes complementares.	1
G	**Balanço económico**						
G1	Custo [(d)]	Coletores térmicos – 1 800 € Módulos, inversor e ligações – 7 600 € Suportes – 6 080 € Transporte e montagem – 8 770 € Manutenção – 548 €/ano Custo – 24 250 € (sem manutenção)	0	Coletores térmicos – 1 800 € Módulos, inversor e ligações – 7 125 € Suportes – 6 080 € Transporte e montagem – 8 329 € Manutenção – 524 €/ano Custo – 23 244 € (sem manutenção)	1	Coletores térmicos – 1 800 € Módulos, inversor e ligações – 4 940 € Suportes – 6 080 € Transporte e montagem – 6 022 € Manutenção – 401 €/ano Custo – 18 842 € (sem manutenção)	2
		Custo (m^2) – 572 € (sem manutenção)	0	Custo (m^2) – 548 € (sem manutenção)	1	Custo (m^2) – 444 € (sem manutenção)	2
G2	Valor financeiro	Consumo de energia evitado [(e)] – 2 271 €/ano Materiais evitados (revestimento) – 352 € Balanço económico (custo – materiais evitados) – 23 898 €	0	Consumo de energia evitado [(e)] – 2 151 €/ano Materiais evitados (revestimento) – 352 € Balanço económico (custo – materiais evitados) – 22 892 €	1	Consumo de energia evitado [(e)] – 1 554 €/ano Materiais evitados (revestimento) – 352 € Balanço económico (custo – materiais evitados) – 18 490 €	2
		Balanço económico (m^2) – 564 €	0	Balanço económico (m^2) – 540 €	1	Balanço económico (m^2) – 436 €	2
G3	Retorno do investimento [(f)]	10,5 anos.	0	10,6 anos.	0	12,2 anos.	0
	TOTAL[(g)] (pontuação máxima: 35)		**20**		**22**		**25**

(d) Os custos representam ordens de grandeza de acordo com os resultados PVSYST, os custos relativos à intervenção na fachada foram adaptados às variantes propostas, não inclui o fim de vida. Cálculos com maior precisão devem ser efetuados em fases posteriores de projeto;

(e) O consumo de energia evitado tem como referência o valor de 0,2285 €/kWh com taxas, baseado no preço da eletricidade no segmento de consumo doméstico, banda DC, relativo ao 2º semestre de 2015 (DGEG, 2016a);

(f) Sem considerar o aumento do preço da energia;

(g) Na pontuação máxima não são contabilizados os parâmetros não considerados (C2 e F1), e nos parâmetros A1, G1 e G2 é tido em conta o valor toral (e não o valor por m^2).

Como a solução construtiva é idêntica nas 3 propostas, estas possuem naturalmente valorações equivalentes em diversos parâmetros. Todavia, verifica-se que a variante com maior pontuação é a proposta C e que, apesar de não possuir a classificação máxima no parâmetro "A2 – Balanço energético", satisfaz os objetivos de balanço energético quase nulo. A viabilidade de integração de SSA é positiva, uma vez que concilia geração de energia com o desempenho funcional da envolvente, apesar de não garantir um período de retorno igual ou inferior a 10 anos.

Através da análise dos parâmetros com classificação nula, neste caso, do parâmetro "A1 – Contributo para o desempenho energético", é possível identificar aspetos a ter em conta, na sua redefinição ou no seu desenvolvimento em fases posteriores. Como exemplo, poderá equacionar-se a possibilidade de estudar um esquema de ventilação que tire partido da caixa-de-ar sob os sistemas fotovoltaicos.

A Tabela 7.18 e a Figura 7.19 apresentam a avaliação das propostas em função dos indicadores de integração pré-definidos que poderão influir na decisão final.

Tabela 7.18 – Resultado dos indicadores de integração para cada variante

Indicadores	**Parâmetros**		**A**	**B**	**C**
Morfogénese	A6	Contributo para o desempenho energético	0	0	0
	B	Integração morfológica	0,8	0,8	0,8
	C1	Contributo para o desempenho não energético	1	1	1
	E	Integração formal	0,5	0,5	1
	Total (pontuação máxima: 6)		**2,3**	**2,3**	**2,8**
Interferência funcional	A6	Contributo para o desempenho energético	0	0	0
	C	Integração multifuncional	1	1	1
	D	Integração construtiva	1	1	1
	F3	Manutenção - utilização	1	1	1
	Total (pontuação máxima: 6)		**3**	**3**	**3**
Ambiental	A	Integração energética	1,16	1,16	1
	D3	Solução construtiva - adaptabilidade	1	1	1
	F1	Redução da utilização de recursos e do desperdício	-	-	-
	F2	Reutilização, reciclagem e recuperação de energia	1	1	1
	Total (pontuação máxima: 5)		**3,16**	**3,16**	**3**
Manutenção	B3	Posicionamento - acumulação de sujidade	1	1	1
	F3	Manutenção - utilização	1	1	1
	F4	Manutenção - acessibilidade	1	1	1
	Total (pontuação máxima: 3)		**3**	**3**	**3**

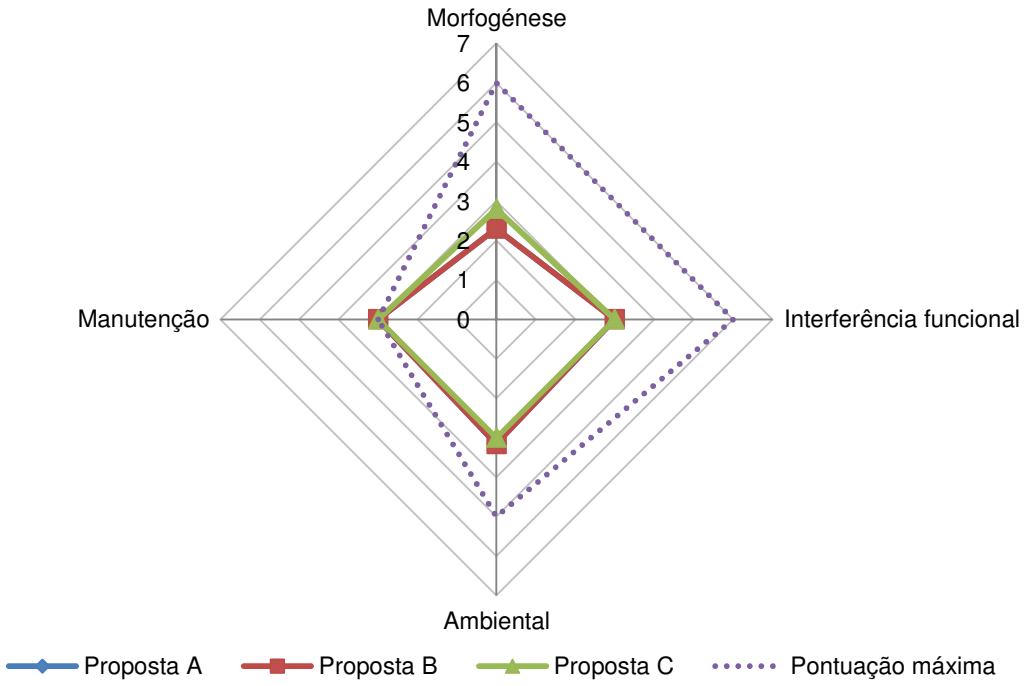


Figura 7.19 – Relação entre os indicadores de integração das 3 variantes (a Proposta A e a Proposta B são coincidentes)

No que respeita o indicador de integração ambiental, refere-se que na proposta C o valor assumido relativamente à energia incorporada nos módulos de silicio amorfo (com influência no parâmetro "A3 – Energia incorporada") é obtido de um estudo que data de 1998 (Alsema, 1998) e que, dos valores disponíveis a partir de um intervalo expressivo (990 - 1980 MJ_{ep}/m^2), foi assumido o valor mais desfavorável, ou seja, o resultado neste parâmetro é conservador e provelmente influencuará de forma negativa a proposta C, comparativamente às soluções com módulos cristalinos das propostas A e B.

7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos dois casos de estudo apresentados a aplicação da metodologia assentou em abordagens diferentes. No primeiro caso de estudo pretendeu-se analisar a possibilidade de intervenção com vista à melhoria de determinados aspetos do desempenho da envolvente, enquanto no segundo caso de estudo pretendeu-se explorar a influência da metodologia num possível processo de conceção. Nas duas abordagens foi possível avaliar a integração dos SSA de uma forma multifuncional em função de determinados objetivos definidos inicialmente.

Na aplicação da metodologia foi previsto um ciclo de vida de 30 anos para os sistemas solares ativos. Pretendendo uma abordagem à avaliação tendo em conta todo o ciclo de vida do edifício, seria necessário prever a forma como ocorreria a adaptação da envolvente no futuro, se efetuada em função de uma tecnologia semelhante, das perspetivas futuras ao nível da investigação, ou recorrendo a outros tipos de materiais. Para tal devem ser estabelecidos cenários e definidos os pressupostos em que estes assentam, de modo a permitir a comparação das variantes. Refere-se ainda que no segundo caso de estudo, também seria pertinente avaliar o impacto do recurso a uma bateria que garantisse a possibilidade do autoconsumo da energia elétrica produzida.

Paralelamente, salienta-se que através da análise dos parâmetros com classificação nula, a aplicação da metodologia também permitiu evidenciar as questões com potencial de redefinição ou de desenvolvimento em fases posteriores, permitindo deste modo manter uma visão abrangente ao longo do processo de conceção.

Finalmente, tendo em conta a natureza do ambiente edificado em Portugal, do ponto de vista das suas necessidades de reabilitação e de melhoria da eficiência energética, as abordagens possíveis através da metodologia proposta permitem conciliar essas vertentes com a produção de energia e coordenar o projeto de uma forma mais eficaz relativamente à integração dos sistemas solares ativos.

8
CONCLUSÃO

8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sistemas solares ativos têm adquirido uma presença cada vez mais expressiva no ambiente construído. O recurso generalizado a estes sistemas dá-se devido a diversos fatores, entre os quais se destacam as políticas energéticas que têm vindo a ser implementadas, a obtenção de potenciais vantagens económicas, e uma crescente consciência ambiental coletiva. No entanto, os coletores térmicos e os módulos fotovoltaicos são normalmente equacionados em fases tardias do desenvolvimento do projeto e, consequentemente, adicionados à envolvente após a conclusão do edifício. Neste contexto, para além de gerarem energia, estes sistemas também geram constrangimentos funcionais, construtivos e formais, uma vez que a sua inclusão não é considerada no processo de projeto de uma forma abrangente.

A previsão da integração de sistemas solares ativos como elementos multifuncionais durante as fases iniciais da conceção, pode contribuir para a exploração do seu contributo ao nível do desempenho do edifício e da procura da sustentabilidade das soluções construtivas. Contudo, apesar de uma crescente divulgação das estratégias de integração destes sistemas nos edifícios, não existe uma relação entre estas e os indicadores de sustentabilidade que permita auxiliar a tomada de decisão num processo de conceção, o que faria sentido pela importância que a geração de energia renovável geralmente assume numa avaliação de sustentabilidade. Neste sentido, corre-se o risco, na fase de conceção, de estar constantemente a adicionar camadas na configuração da envolvente, em detrimento da sua resolução de uma forma estruturante, baseada na complementaridade e multifuncionalidade dos produtos de construção. Verifica-se também que a investigação existente sobre o tema da integração possui um caracter de disseminação e de potenciação da utilização dos sistemas solares ativos, valorizando a sua visibilidade, e que as análises de ciclo de vida existentes centram-se nos sistemas e não na sua utilização integrada como componente da envolvente.

Face a este cenário, foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão em fase de projeto, através da verificação das opções de integração - funcional, construtiva e formal - no desempenho relativo às várias dimensões da sustentabilidade das obras de construção - ambiental, económica e social - ao longo de todo o ciclo de vida do edifício.

O trabalho desenvolvido cumpriu o objetivo principal, assim como os diversos objetivos parciais, propostos inicialmente. Relativamente aos objetivos parciais, foi enquadrado o conhecimento existente relativo aos produtos (SSA, BIPV e BIST), e foram definidos alguns conceitos estruturantes como o de integração, o de multifuncionalidade e o de adaptabilidade, que, no âmbito deste tema, se encontravam num estado de desenvolvimento incipiente.

Em resposta ao objetivo principal, a metodologia para a integração de sistemas solares ativos na envolvente resultou do estabelecimento de um conjunto de parâmetros de integração em função dos SSA e da sua utilização na envolvente de edifícios. Os parâmetros de integração definidos complementam-se com uma lista de requisitos e orientações a ter em conta e, através da sua inter-relação, formam um conjunto de indicadores que permitem reforçar a avaliação e a análise das soluções de projeto.

Relativamente ao estado da arte, a metodologia desenvolvida é mais abrangente e os parâmetros definidos possuem, de uma forma geral, um grau de subjetividade menor que o conjunto de critérios presente nas metodologias existentes. A metodologia proposta, através dos requisitos e orientações, parâmetros e indicadores definidos, abarcam as várias questões suscitadas no enquadramento proposto (com base na integração "vitruviana" e na "sustentabilidade das obras de construção"). Na Tabela 8.1 esta questão é visível a nível macro, obviamente que em cada categoria de integração existem diversos sub-parâmetros que nem sempre são considerados ou determinados de forma objetiva nas restantes metodologias.

Tabela 8.1 - Categorias a que pertencem os critérios das metodologias analisadas no Capítulo 3 e da metodologia proposta

Categorias de integração e de sustentabilidade			**Metodologias analisadas**					**Metodologia proposta**
			"General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment"	"BIPV evaluation benchmark model"	"Design methodology for building integration of photovoltaics"	"Sistema di valutazione del livello di integrazione fotovoltaica"	"Development of a holistic evaluation system for BIPV facades"	Metodologia para a integração de sistemas solares ativos na envolvente de edifícios
Energia			■	■	■	■	■	■
Integração "vitruviana"	Funcional		■	■	■	■	■	■
	Construtiva		■	■	■	■	■	■
	Formal		■	■	■	■	■	■
Sustentabilidade das obras de construção	Social	Acessibilidade						■
		Adaptabilidade						■
		Saúde e conforto					■	■
		Pressões na vizinhança						■
		Manutenção		■				■
		Segurança e proteção		■			■	■
	Ambiental		■			■	■	■
	Económico	Custo	■		■	■	■	■
		Valor financeiro	■				■	■
Adequação às fases de projeto			■		■		■	■

Na definição dos parâmetros de integração da metodologia proposta foram excluídas as questões que se prendem com a especificidade dos projetos, ou que não devem ser avaliadas de forma absoluta, de modo a dotar o procedimento de um carácter universal e adaptável. Do mesmo modo, não foram consideradas questões como "inovação" e "efeito motivacional" uma vez que se destinam a estratégias de disseminação.

8.2 IMPLICAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS

A metodologia desenvolvida foi aplicada a dois casos de estudo. Através dos quais, foi possível verificar que a previsão dos SSA em fases iniciais de conceção, promove a exploração do seu potencial, a multifuncionalidade, e a obtenção de mais-valias. Através do processo proposto é possível ponderar uma série de questões que na prática corrente não são frequentemente equacionadas, permitindo assim a conjugação e resolução de várias necessidades do edifício/envolvente através da implementação de soluções multifuncionais, contribuindo para um ambiente edificado sustentável. Este é um aspeto importante, uma vez que a implementação de medidas relativas à produção de energia renovável, assim como de medidas relativas à eficiência energética, resulta frequentemente de análises especializadas e sectoriais do comportamento do edifício e dos seus equipamentos. Este procedimento dá origem a propostas de melhoria assentes em soluções que apresentam um elevado grau de independência ao nível dos equipamentos propostos na sua relação com a configuração da envolvente e, sobretudo, em relação ao conceito global do edifício. Nesse sentido, no campo dos SSA, a sua articulação com a envolvente, através da metodologia proposta, resulta numa integração abrangente e multifuncional, obtendo vantagens ao nível do desempenho do edifício, assim como em termos ambientais e sociais, e podendo alcançar a repercussão destas vantagens na avaliação económica, por oposição a medidas de produção de energia isoladas. Confirmou-se assim que a integração dos sistemas solares ativos em fases iniciais de projeto proporciona uma utilização sinergética destes sistemas, permitindo desta forma atingir resultados benéficos em termos de soluções construtivas, da sustentabilidade das obras de construção e do conceito global do edifício.

A metodologia para a integração de SSA na envolvente, face ao contexto regulamentar (relativo ao desempenho energético) e geográfico do país (em termos de disponibilidade de radiação solar) é pertinente, pois permite uma consideração mais abrangente do papel multifuncional dos SSA na envolvente, na satisfação dos requisitos de integração "vitruviana" e de sustentabilidade. Adicionalmente, como a aplicação da metodologia é ajustável aos objetivos de cada projeto, os resultados que produz permitem a redução do risco para o investidor e constituem uma ferramenta útil para o projetista, permitindo reduzir o desfasamento entre o rápido desenvolvimento tecnológico e os processos mais lentos de adaptação a nível conceptual de projeto, e potenciando a minimização dos impactes ambientais, económicos e sociais na conceção da envolvente solar ativa. A metodologia proposta é, deste modo, um contributo na procura de novos modelos de abordar as necessidades e o desempenho dos "edifícios solares".

Contudo, o processo proposto possui limitações, nomeadamente nas questões de avaliação ambiental, cujas definições, procedimentos e formas de cálculo ainda se encontram no âmbito da investigação e são difíceis de traduzir operativamente num processo de projeto, nomeadamente na verificação das suas implicações de forma clara nos resultados. Da mesma forma, conceitos como o de adaptabilidade, ligados às questões temporais e de ciclo de vida, ainda são vagos e pouco explorados de uma forma científica. Neste contexto, o estabelecimento de cenários é uma atividade sensível, sobretudo na previsão dos sistemas que substituirão os SSA. Por outro lado, a aplicação da metodologia implica

também algum conhecimento e experiência do coordenador de projeto relativamente aos sistemas solares ativos e às questões de eficiência energética.

8.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como a metodologia desenvolvida resulta da síntese analítica de uma série de parâmetros cuja natureza é abrangente e por vezes díspar, e cuja articulação e complementaridade é essencial para o objetivo que se pretendeu atingir, alguns dos temas explorados geram um contributo pertinente para discussão e desenvolvimento futuro. Como tal, é possível aprimorar o processo metodológico a diferentes níveis. Ao nível de determinados parâmetros é possível uma maior definição no modo como são avaliados. Como exemplo, no parâmetro "A4 – Potencial de aquecimento global" poderá definir-se o equivalente à energia primária da geração de eletricidade por região, em detrimento do recurso a valores generalizados. Complementarmente, com a disponibilidade futura das Declarações Ambientais de Produto (DAP) poderão obter-se valores da energia embebida específicos para determinado produto SSA, o que permitirá obter o retorno energético, tendo em conta a realidade regional da produção de energia, de uma forma precisa.

Também ao nível dos resultados, nomeadamente da perceção da sua influência e da sua utilidade operativa, deverá ser verificado o impacto das soluções multifuncionais no consumo energético final, assim como noutros desempenhos relevantes. Ou seja, há a necessidade de aferir os contributos para o desempenho energético e não energético, de um modo quantificável em fases de posterior desenvolvimento, recorrendo ao cálculo e/ou a simulações. Nesse sentido, a metodologia poderá ser desenvolvida de modo a prever o contributo dessa influência como critério de avaliação. Podendo inclusivamente determinar essa influência ao nível da classificação energética ou de outras classificações de desempenho. Relativamente à contínua validação da metodologia, será relevante a sua aplicação a uma fase de conceção posterior à inicial, em que a descriminação e quantificação dos produtos e materiais que compõem a envolvente possuam uma maior definição, o que permitirá a comparação desses resultados com os da fase anterior, verificando as implicações na avaliação das variantes. Da mesma forma, será relevante aplicar a metodologia a um caso de estudo que consista num processo de conceção de um edifício novo.

Adicionalmente, ao nível de interface de utilização, o conjunto de processos que a metodologia implica poderá simplificar-se ao constituir uma ferramenta informática, de modo a facilitar a sua aplicação. Uma ferramenta informática também permitiria o acesso a bases de dados sobre os SSA e as suas características, como a energia incorporada, assim como o preço da eletricidade por região e tipo de contrato, entre outros aspetos.

Ao nível do âmbito da utilização da metodologia, esta poderá ser explorada em contextos de avaliação diversos, para além do apoio à conceção, nos quais se pretenda uma utilização multifuncional dos SSA, como em concursos públicos ou na atribuição de financiamento. Destaca-se o potencial de influência ao nível regulamentar, se se pretender valorizar a integração à semelhança de outros países, pois como foi referido, os projetos de eficiência energética onde estes sistemas são muitas vezes preconizados, resultam de uma abordagem especializada que implementa medidas válidas e legítimas, porém muitas vezes díspares e desconexas em relação ao conceito global do edifício.

Finalmente, e no seguimento da questão anterior, o âmbito e o processo de integração poderão ser ampliados, abarcando não só os sistemas solares ativos, mas outros sistemas de produção de energia renovável, assim como questões adicionais ao nível energético. Ou seja, constituir uma metodologia que permitisse, na fase de projeto, uma maior relação e interdependência entre o consumo energético,

a eficiência energética e a geração de energia renovável, ao longo do ciclo de vida do edifício, por estes serem aspetos fundamentais para a sustentabilidade do ambiente edificado e estruturais na conceção de edifícios no futuro próximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu-Zour, A. M.; S. B. Riffat; M. Gillott. 2006. "New design of solar collector integrated into solar louvres for efficient heat transfer." *Applied Thermal Engineering* 26 (16):1876-1882. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.01.024.

Aden, Samira; Johannes Arend; Jan Iwanowicz; Negar Jahadi Rafigh; Jan Juraschek; Thorsten Klooster; Heike Klussmann; Bernhard Middendorf; Roman Polster; Tanja Simonovic; Pat Taylor. 2015. "DysCrete: Experimental Energy Production Systems." Acedido a 04-04-2014. http://www.baukunsterfinden.org/en/research/projects/dyscrete-energy-production-systems/.

ADENE; INETI; SPES; APISOLAR. 2004. Utilização de colectores solares para a produção de calor de processo industrial. Lisboa: DGGE, IP-AQSpP.

ADENE; LNEG; SPES; APISOLAR. 2003. "Água quente solar." Acedido a 05-10-2011. http://www.aguaquentesolar.com/.

Aelenei, Laura; Ricardo Pereira; Ana Ferreira; Helder Gonçalves; António Joyce. 2014. "Building Integrated Photovoltaic System with Integral Thermal Storage: A Case Study." *Energy Procedia* 58:172-178. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.425.

Aelenei, Laura; Ricardo Pereira; Helder Gonçalves; Andreas Athienitis. 2014. "Thermal Performance of a Hybrid BIPV-PCM: Modeling, Design and Experimental Investigation." *Energy Procedia* 48:474-483. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.056.

Agentschap NL. 2011. *Gebouwintegratie zonnestroomsystemen: Praktijkvoorbeelden van succesvolle producten*. Utrecht: Agentschap NL.

Aguiar, Ricardo; Marta Oliveira; Hélder Gonçalves. 2006. "7 - Energia." In *Alterações climáticas em Portugal cenários, impactos e medidas de adaptação: projecto SIAM II*. Lisboa: Gradiva.

Aikivuori, A. M. 1999. "Critical loss of performance: What fails before durability." Durability of building materials and components 8, Ottawa, Canada.

Alsema, Erik. 1998. "Energy requirements of thin-film solar cell modules - a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2 (4):387-415. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(98)00019-7.

Anderson, T. N.; M. Duke; G. L. Morrison; J. K. Carson. 2009. "Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector." *Solar Energy* 83 (4):445-455. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.013.

Andrews, Rob W.; Joshua M. Pearce. 2013. "The effect of spectral albedo on amorphous silicon and crystalline silicon solar photovoltaic device performance." *Solar Energy* 91:233-241. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.030.

Antunes, Alfredo da Mata; António Azevedo Gomes; António Menéres; António Pinto de Freitas; Arnaldo Araújo; Artur Pires Martins; Carlos Carvalho Dias; Celestino de Castro; Fernando Távora; Fernado Torres; Francisco Keil Amaral; Francisco da Silva Dias; Frederico George; João José Malato; José Huertas Lobo; Nuno Teotónio Pereira; Octávio L. Figueiras; Rui Pimentel. 1998. *Arquitectura popular em Portugal*. Lisboa: Ordem dos Arquitetos.

APA, Agência Portuguesa do Ambiente. n. d. "O Clima em Portugal." Acedido a 21-05-2012. http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=118&sub3ref=393.

APISOLAR. 2012. Estatísticas Solar Térmico 2012. Editado por Observatório Solar Térmico.

APISOLAR. 2014. Estatísticas solar térmico 2014. Editado por Observatório solar térmico.

Archdaily. 2010. "Housing Bjørnveien: Dahle Dahle Breitenstein." Acedido a 21-06-2014. http://www.archdaily.com/91125/housing-bj%25c3%25b8rnveien-dahle-dahle-breitenstein.

Ardente, Fulvio; Giorgio Beccali; Maurizio Cellura; Valerio Lo Brano. 2005. "Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances." *Renewable Energy* 30 (2):109-130. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.006.

ARUP. 2015. "GreenPix zero-energy media wall." Acedido a 23-11-2014. http://www.arup.com/projects/greenpix_zero_energy_media_wall.

Azevedo, Isabel; Vitor Leal. 2010. "Net Zero Energy Buildings: A comparative analysis of alternatives including on-site vs. off-site offset." Congresso de Inovação na Construção Sustentável, Cúria.

Bachman, Leonard R. 2003. *Integrated Buildings: The Systems Basis of Architecture*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Banham, Reyner. 1969. *The architecture of the well-tempered enviroment*. London: Architectural Press.

Battista, Gabriele; Emiliano Carnielo; Luca Evangelisti; Marco Frascarolo; Roberto Vollaro. 2015. "Energy Performance and Thermal Comfort of a High Efficiency House: RhOME for denCity, Winner of Solar Decathlon Europe 2014." *Sustainability* 7 (7):9681.

Baum, Robert. 2011. "Architectural Integration of Light-Transmissive Photovoltaic (LTPV)." 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg.

Baumschlager Eberle. 2000. "Lohbach Residential Project." Acedido a 02-05-2015. http://www.baumschlager-eberle.com/en/projects/chronological/details-of-project/project/wohnen-am-lohbach.html.

Bayoumi, Mohannad; Dietrich Fink. 2014. "Maximizing the performance of an energy generating façade in terms of energy saving strategies." *Renewable Energy* 64:294-305. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.054.

Beachside Solar Technologies. 2016. "Beachside Solar Technologies." Acedido a 19-02-2011. http://www.beachsidesolarhawaii.com.

Behling, S.; A. Fuchs; T. Volz. 2007. "Solar architecture: research and development." *Detail Review of architecture: Energy-efficient architecture*, 666-669.

Behling, Stefan; Tina Volz. n. d. "Integration von Solarthermie " Acedido a 01-02-2010. http://www.uni-stuttgart.de/ibk2/index.php/forschung/solar/34-integrationsolarthermie.

Blengini, Gian Andrea; Tiziana Di Carlo. 2010. "The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings." *Energy and Buildings* 42 (6):869-880. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009.

Blok, R.; F. van Herwijnen. 2006. "Quantifying Structural Flexibility for performance based life cycle design of buildings." Adaptables2006, TU/e, International Conference On Adaptable Building Structures, Eindhoven.

Bonomo, Pierluigi. 2012. "Integrazioni di sistemi fotovoltaici nell'involucro edilizio. Sviluppo di un metodo di valutazione per applicazioni di BIPV." Tese de doutoramento, Università degli Studi di Pavia.

Brand, Stewart. 1994. *How buildings learn: what happens after they´re built*. London: Phoenix Illustrated.

Bultman, J.H.; A.W. Weeber; M.W. Brieko; J. Hoornstra; A.R. Burgers; J.A. Dijkstra; A.C. Tip; F.M. Schuurmans. 2000. "Pin-up module: a design for higher efficiency, easy module manufacturing and attractive appearance." 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow.

Campioli, Andrea; Monica Lavagna. 2007. "Integrating life cycle assessment in building. Environmental and energy certification." SB07 Torino, Italy "People for Sustainability", Torino, Italy 5-7 June 2007, Rotterdam, Netherlands.

Caponetto, Riccardo; Rosa Caponetto; Carlo Cecere; Antonio Culla; Sebastiano D'Urso; Emanuele Habib; Giuseppe Margani; Vincenzo Sapienza. 2013. "Active building envelopes: An integrated solution for solar cooling and heating " PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany.

Carbajal, W. M.; M. C. Pereira. 2008. "Integration of solar collectors in buildings: A study of the performance of flat-plate and CPC collectors on a building facade." EuroSun 2008 - 1ST International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Lisboa.

Carrilho da Graça Arquitetos. n. d. "Operation Co-ordination centre of Brisa Carcavelos, Portugal (2004)." Acedido a 01-02-2011. http://jlcg.pt/.

CASE. 2016. "High Efficiency Solar Energy Systems." Acedido a 05-02-2015. http://www.case.rpi.edu/page/project.php?pageid=1.

CEN. 2010a. EN 15643-1: Sustainability of construction works: Sustainability assessment of buildings - Part 1: General framework. CEN.

CEN. 2010b. prEN 15978:2010 - Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.
CEN. 2010c. prEN 16309: Sustainability of construction works. Assessment of social performance of buildings. Methods.
CEN. 2012. EN 15643-4:2012 - Sustainability of construction works. Assessment of buildings. Part 4 - Framework for the assessment of economic performance.
CENELEC. 2014a. Photovoltaics in buildings - Part 1: Modules. Brussels: CENELEC.
CENELEC. 2014b. Photovoltaics in buildings - Part 2: Systems. Brussels: CENELEC.
Certiel. 2012. "Instalações fotovoltaicas." Jornadas Certiel 2012, Urgeiriça, Viseu.
Chemisana, Daniel; Jesús López-Villada; Alberto Coronas; Joan Ignasi Rosell; Chiara Lodi. 2013. "Building integration of concentrating systems for solar cooling applications." *Applied Thermal Engineering* 50 (2):1472-1479. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.005.
CIB W104. 2006. "CIB W104 Open Building Implementation." Acedido a 03-09-2012. http://open-building.org/.
City of Boston, Environmental & Energy Services. 2010. Solar Boston Permitting Guide: A resource for building owners and solar installers.
City of Chicago, Department of Planning Development. 2015. City of Chicago Solar Zoning Policy
City of Santa Barbara, Community Development Department. 2006. Solar Energy System Design Guidelines & Solar Recognition Program.
Colt. 2016. "Colt Group." Acedido a 12-02-2015. http://www.coltgroup.com/.
Colt. n. d. "Q-Cells." Acedido a 12-02-2015. http://www.coltinfo.nl/buitenzonwering-q-cells.html.
Colt. n.d. "EWE Arena, Oldenburg, Germany." Acedido a 12-02-2015. http://www.coltgroup.com/ewe-arena.html.
Conserval Engineering. 2015. "Solar Wall." Acedido a 01-02-2015. http://solarwall.com/en/home.php.
Construct PV. n. d. "Construct PV: Constructing building with a customizable size PV modules integrated in the opaque part of the building skin." Acedido a 24-09-2012. http://www.constructpv.eu/homepage/.
COST Office. 2015. COST Action TU1205 (BISTS): Overview of BISTS state of the art, models and applications.
Costa, Ana. 2011. Certificado de desempenho energético e da qualidade do ar interior: Nº CER CE0000045958536.
Costa, Teresa; Carlos Botelho. 2010. Auditoria energética: EDP Coimbra.
Dave, Malay; Arvind Varshney; Peter Graham. 2012. Assessing the climate change adaptability of buildings. *Accarnsi Discussion Paper*.
Davidsson, Henrik; Bengt Perers; Björn Karlsson. 2012. "System analysis of a multifunctional PV/T hybrid solar window." *Solar Energy* 86 (3):903-910. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.020.
Decreto-Lei n.º 25/2012, Ministério da Economia e do Emprego. 2012. Decreto-Lei n.º 25/2012 - Diário da República. Série I. 26 (2012-02-06).
Decreto-Lei n.º 34/2011, Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento. 2011. Decreto-Lei n.º 34/2011 - Diário da República. Série I. 47 (2011-03-08).
Decreto-lei n.º 96/2008, Ministério do Ambiente, do Ordenamento, do Território e do Desenvolvimento Regional. 2008. Decreto-lei n.º 96/2008 - Diário da República. Série I. 110 (09-06-2008).
Decreto-Lei n.º 118/2013, Ministério da Economia e do Emprego. 2013. Decreto-Lei n.º 118/2013. Diário da República. Série I. 159 (2013-08-20).
Decreto-Lei n.º 153/2014, Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. 2014. Decreto-Lei n.º 153/2014 - Diário da República. Série I. 202 (2014-10-20).
Decreto-Lei n.º 163/2006, Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social. 2006. Decreto-Lei n.º 163/2006 - Diário da Républica. Série I. 152 (08-08-2006).
Decreto-Lei n.º 215-B/2012, Ministério da Economia e do Emprego. 2012. Decreto-Lei n.º 215-B/2012 - Diário da República. Série I. 194 (2012-10-08).

Decreto-Lei n.º 220/2008, Ministério da Administração Interna. 2008. Decreto-Lei n.º 220/2008 - Diário da República. Série I. 220 (12-11-2008).
Decreto-Lei n.º 363/2007, Ministério da Economia e da Inovação. 2007. Decreto-Lei n.º 363/2007 - Diário da República. Série I. 211 (2007-11-02).
Despacho n.º 15793-L/2013. 2013. Despacho n.º 15793-L/2013 - Diário da República. Série II. 234 (03-12-2013).
Detail. 2012. "Solare Tarnkappe: Umweltarena in Spreitenbach." Acedido a 15-11-2015. http://www.detail.de/artikel/solare-tarnkappe-umweltarena-in-spreitenbach-9584/.
DGEG. 2015a. "Balanço Energético 2013." Acedido a 12-11-2015. http://www.dgeg.pt/.
DGEG. 2015b. "Energia em Portugal: 2013." Acedido a 06-10-2015. http://www.dgeg.pt/.
DGEG. 2015c. "Energia Solar Térmica em Portugal." Acedido a 2015-12-09. http://aguaquentesolar.com/observatorio/emPortugal/index.asp.
DGEG. 2016a. "Preços Médios Ponderados de Energia Elétrica no Setor Doméstico, em Portugal." Acedido a 05-05-2016. http://www.dgeg.pt/.
DGEG. 2016b. "Tarifas de energia elétrica na Indústria, em Portugal e na União Europeia: Preços médios ponderados de energia elétrica na indústria, em Portugal." Acedido a 05-05-2016. http://www.dgeg.pt/.
DGS. 2004. *Energia fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*. Traduzido por IST.
Drück, Harald; Elke Streicher. 2008. "NEGST: New Generation of Solar Thermal Systems." http://www.swt-technologie.de/html/negst.html.
Duffy, Francis. 1990. "Measuring building performance." *Facilities* 8 (5):17-20. doi: http://dx.doi.org/10.1108/EUM0000000002112.
Duffy, Francis. 1998. *Design for change: the architecture of DEGW*. Basel: Birkhäuser
Durmisevic, Elma. 2006. "Transformable building structures: design for dissassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction." Tese de doutoramento, Architecture, Delft University of Technology.
Dyson, A.; P. Stark; M. Jensen. 2007. "Integrated concentrating (IC) solar facade system." DOE/EEE Annual Program Review Meeting.
Eldridge, David. 2013. "Photovoltaic cells designed to blend in with terracotta roofs." Acedido a 05-02-2016. http://www.plasticsnews.com/article/20130603/NEWS/130609999/photovoltaic-cells-designed-to-blend-in-with-terracotta-roofs.
Enerconcept Distribution. n. d. "Enerconcept Distribution." Acedido a 26-10-2015. http://www.enerconcept.com/en/.
EnergyGlass. n. d. "EnergyGlass." Acedido a 11-10-2015. http://energyglass.com/egl/index.php.
EOTA. 1999. Assumption of working life of construction products in Guidelines for European Technical Approval. Editado por European Technical Approvals and Harmonized Standards.
Epstein, Kyra. 2008. "NYC's Living Lesson." *High Performing Buildings*.
Ertex-Solar. n. d. LSG-Sound PV: Building integrated photovoltaics. Panfleto Ertex-Solar.
ESTIF. 2011. Converting Installed Solar Collector Area & Power Capacity into Estimated Annual Solar Collector Energy Output. Explanation note.
ESTIF. 2015. Solar Thermal Markets in Europe: Trends and Market Statistics 2014. Brussels.
ETERNIT, Technical Service Centre. 2015. Zonnepanelen: Solesia Zonnepan. Deel 2 - Specifieke Technische Gegevens per Zonnepaneel. Bruxelas: Eternit.
Etherington, Rose. 2008. "Greenpix media wall by Simone Giostra & Partners." Acedido a 29-10-2014. http://www.dezeen.com/2008/05/07/greenpix-media-wall-by-simone-giostra-partners/.
European Commission. 2013. "Widespread exploitation of building integrated photovoltaics in the Nordic dimension of the European Union." Acedido a 05-05-2012. http://cordis.europa.eu/project/rcn/86820_en.html.
EUROSTAT. 2015a. Simplified energy balances - annual data.
EUROSTAT. 2015b. Supply, transformation and consumption of electricity - annual data.
EVO. 2012. "Constructeur de panneaux photovoltaïques Systaic." http://www.energies-renouvelable.com/nouvelle/dossier-photovoltaique,systaic,NUMERO51.html.

Farkas, Klaudia; Francesco Frontini; Laura Maturi; Maria Cristina Munari Probst; Christian Roecker; Alessandra Scognamiglio; Isa Zanetti. 2013. T.41.A.2: Solar Energy Systems in Architecture: Integration Criteria and Guidelines. In *IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture*, Editado por MariaCristina Munari Probst & Christian Roecker (EPFL-LESO): IEA - SHC.

Fernandes, Eduardo de Oliveira; Maria João Samúdio; Francisco Pacheco Craveiro; Vasco Peixoto de Freitas; Cláudia Ferreira; Miguel Vieira; Nuno Valentim; Jorge da Costa; José Patrício Martins. 2010. Reabilitação de Edifícios do Centro Histórico do Porto: Guia de Termos de Referência para o Desempenho Energético-Ambiental. Porto.

Filipe, Duarte. 2010. Certificado de desempenho energético e da qualidade do ar interior: Anexo I: Certificado tipo A. DCR0000334/2010.

Fontaine, Benjamin; Marie Latour. 2013. Global market outlook: For photovoltaic 2013-2017. Editado por Craig Winneker.

Fontaine, Benjamin; Sinead Orlandi. 2014. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018. Editado por Tom Rowe.

Frischknecht, R.; R. Itten; P. Sinha; M. de Wild-Scholten; J. Zhang; V. Fthenakis; H. C. Kim; M. Raugei; M. Stucki. 2015a. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. In *Photovoltaic Power Systems Programme*, Editado por International Energy Agency. Report IEA-PVPS T12-04:2015.

Frischknecht, R.; R. Itten; P. Sinha; M. de Wild-Scholten; J. Zhang; V. Fthenakis; H. Chul Kim; M. Raugei; M. Stucki. 2015b. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. Editado por International Energy Agency. Report IEA-PVPS T12-04:2015.

Frischknecht, Rolf; Garvin Heath; Marco Raugei; Parikhit Sinha; Mariska de Wild-Scholten; Vasilis Fthenakis; Hyung Chul Kim; Erik Alsema; Michael Held. 2016. Methodology Guidelines on Life Cycle: Assessment of Photovoltaic Electricity. Editado por International Energy Agency. Report IEA-PVPS T12-06:2016.

Frontini, Francesco. 2010. "BIPV a-Si through facade: Development, evaluation and Radiance simulations." 9th International Radiance Workshop, Freiburg.

Fthenakis, V.; H.C. Kim; M. Held; M. Raugei; J. Krones. 2009. "Update of PV energy payback times and life-cycle greenhouse gas emissions." 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg.

Fung, Tady Y. Y.; H. Yang. 2008. "Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings." *Energy and Buildings* 40 (3):341-350. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.002.

Gattermann, Marah; Corinna Fischer. 2014. Topten Technology Paper on Photovoltaic Modules Editado por Öko-Institut e.V. Freiburg.

Golić, K.; V. Kosorić; A. Krstić Furundžić. 2011. "General model of solar water heating system integration in residential building refurbishment—Potential energy savings and environmental impact." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (3):1533-1544. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.052.

Gonçalves, H.; A. Silva; A. Ramalho; C. Rodrigues. 2008. "Thermal performance of a passive solar office building in Portugal." EuroSun 2008 - 1ST International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Lisboa.

Google. 2016. "Google maps." Acedido a 15-01-2016. https://www.google.pt/maps/.

GSE Gestore dei Servizi Energetici. 2012. Guida alle applicazioni innovative finalizzate all'integrazione architettonica del fotovoltaico - 5º Conto Energia. GSE.

Guardian Industries. 2012. Building Integrated Photovoltaic. SunGuard PVGU: Generate Electricity With New Glazing Solution. Panfleto Guardian Industries.

Gupta, Deepak K.; Matthijs Langelaar; Marco Barink; Fred van Keulen. 2016. "Optimizing front metallization patterns: Efficiency with aesthetics in free-form solar cells." *Renewable Energy* 86:1332-1339. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.071.

Habraken, N. J. 1972. *Supports: an alternative to mass housing*. London: The Architectural Press.

Hagemann, Ingo. 1996. "Architectural considerations for building-integrated photovoltaics." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 4 (4):247-258. doi: http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(199607/08)4:4<247::AID-PIP135>3.0.CO;2-E.

Hegger, Manfred; Matthias Fuchs; Thomas Stark; Martin Zeumer. 2008. *Energy Manual:Sustainable Architecture*, *Edition DETAIL*. München, Basel, Berlin, Boston: Institut für Internationale Architekturdokumentation, Birkhäuser.

Hermann, M.; T. E. Kuhn; M. Rommel. 2008. "Development of a multifunctional semi-transparent facade collector." Eurosun 2008: 1st International Congress on Heating, Cooling and Buildings, Lisboa.

Herzog, Thomas; Roland Krippner; Werner Lang. 2004. *Facade construction manual*. Detail ed. Basel: Birkhäuser.

Hestnes, A.G.; T. Esbensen; P. Jaboyedoff; J.D. Balcomb; B. Poel. 2001. "IEA SHC Task 23: Optimization of Solar Energy use in Large Buildings " ISES 2001 Solar World Congress Adelaide.

Hestnes, Anne Grete. 1999. "Building Integration Of Solar Energy Systems." *Solar Energy* 67 (4–6):181-187. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00065-7.

HHS. n. d. "Aktiv-Stadthaus Frankfur." Acedido a 17-11-2015. http://www.hhs.ag/projects.html?projekt=aktiv-stadthaus-frankfurt&typologie=.

Hildebrandt, Max. 2014. "Residential Energy Storage in Germany." Cleantuesday. Paris.

Hill, John. 2015. "Designing with Solid Wood." Acedido a 03-11-2015. http://www.world-architects.com/architektur-news/insight/Designing_with_Solid_Wood_2990.

Hormigo, João; Dulce Henriques. 2015. "Energy reduction measures in office buildings converging no NZEB: Three case studies." 8th AECEF Symposium - New actions and roles of civil engineers: Sustainability and energy, Porto.

Huld, Thomas; Richard Müller; Attilio Gambardella. 2012. "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa." *Solar Energy* 86 (6):1803-1815. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006.

Hussain, F.; M. Y. H. Othman; K. Sopian; B. Yatim; H. Ruslan; H. Othman. 2013. "Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PV/T) air base solar collector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25:431-441. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.014.

IEA-ETSAP; IRENA. 2013. Solar photovoltaics: Technology brief. IRENA.

IEA-PVPS. 2015. Trends 2015 in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2004. Report IEA-PVPS T1-27:2015.

IEA-PVPS. 2016. "IEA Photovoltaic Power Systems Programme." http://www.iea-pvps.org/.

IEA-SHC. 2015. "IEA Solar Heating and Cooling Programme." Acedido a 23-01-2015. https://www.iea-shc.org/.

Industrie Cotto Possagno. n. d. "Industrie Cotto Possagno." Acedido a 15-03-2015. http://www.cottopossagno.com/index.php.

Inspectapedia. 2015. "Antique Attic Water Storage Tanks vs. Antique Solar Water Heaters." Acedido a 16-01-2016. http://inspectapedia.com/Solar/Solar_Water_Heaters_Antique.php.

Inventum. 2004. Nok-Zonneboilers Eco-Nok. Panfleto Inventum.

IPQ. 2009a. NP EN 1990:2009 - Eurocódigo bases para o projecto de estruturas. IPQ.

IPQ. 2009b. NP EN 13830:2009 - Fachadas cortina. IPQ.

IPQ. 2011. NP EN 15643-1:2011 - Sustentabilidade das obras de construção. Avaliação da sustentabilidade dos edifícios. Parte 1: Enquadramento geral. IPQ.

IPQ. 2015a. NP EN 15643-2:2014 - Sustentabilidade das obras de construção. Avaliação da sustentabilidade dos edifícios. Parte 2 - Enquadramento para avaliação do desempenho ambiental.

IPQ. 2015b. NP EN 15643-3:2014 - Sustentabilidade das obras de construção. Avaliação da sustentabilidade dos edifícios. Parte 3: Enquadramento para a avaliação do desempenho social. IPQ.

IRENA. 2012. Solar Photovoltaics. In *Reneable Energy Technologies: Cost Analysis Series*.

ISO. 1984. ISO 6241-1984 - Performance standards in building: Principles for their preparation and factors to be considered.

ISO. 2000. ISO 15686-1:2000 - Buildings and constructed assets service life planning: Parte 1 - general principles.

ISSF. n. d. Case Study: The stainless steel solar façade of a highway maintenance building at Bursins, Switzerland. Editado por International Stainless Steel Forum.

Jäger-Waldau, Arnulf. 2014. PV Status Report 2014. Luxembourg: European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit.

Jong, P. C. de. 2008. Sunovation II: Development of a module production line for PUM. Editado por Energy research center of the Netherlands. ECN-E--08-075.

JRC-IET. 2015. "PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps." Acedido a 23-11-2015. http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#.

Kalogirou, Soteris. 2012. "Transport and Urban Development COST Action TU1205: Building Integration of Solar Thermal Systems (BISTS) " Acedido a 06-11-2014. http://www.cost.eu/COST_Actions/tud/TU1205.

Kämpfen für architektur. 2011. "Kämpfen für architektur." Acedido a 12-05-2012. http://kaempfen.com/en/.

Kennedy and Violich Architecture. 2013. "Soft House." Acedido a 24-09-2014. http://www.kvarch.net/projects/74.

Kim, Byung-ju; Ji-yong Lee; Kyung-hwan Kim; Tak Hur. 2014. "Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea." *Solar Energy* 99:100-114. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.038.

Kirsch, Karin. 2013. *The Weissenhofsiedlung: Experimental Housing Built for the Deutscher Werkbund: Stuttgart, 1927*. Axel Menges ed. Stuttgart, London.

Klussmann, Heike; Uni Kassel. 2014. "Dyscrete: Sonnenstrom aus beton." *Zukunft bauen Magazine*.

Kollektorfabrik. 2011. D3.2.2 Prototype of an air heating vacuum tube collector for façade integration. In *Cost-Effective: Resource- and Cost-effective integration of renewables in existing high-rise buildings*.

Kosoric, Vesna; Stephen Wittkopf; Yixiang Huang. 2011. "Testing a design methodology for building integration of photovoltaics (PV) using a PV demonstration site in Singapore." *Architectural Science Review* 54 (3):192-205. doi: http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2011.590052.

Krauter, Stefan; Rodrigo Guido Araújo; Sandra Schroer; Rolf Hanitsch; Mohammed J. Salhi; Clemens Triebel; Reiner Lemoine. 1999. "Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation." *Solar Energy* 67 (4–6):239-248. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00071-2.

Krippner, Roland. 2003. "Solar technology: from innnovative building skin to energy-efficient renovation." In *Solar architecture: strategies, visions, concepts*, Editado por Christian Schittich. München; Basel; Boston: Edition Detail; Birkhäuser.

Krippner, Roland. 2005. "More than just a facade..." *Sunny magazine*.

Kuhn, Tilmann E. 2009. "Cost-Effective - Resource and Cost-effective integration of renewables in existing high-rise buildings." Acedido a 29-11-2012. http://www.cost-effective-renewables.eu/.

Kuhn, Tilmann E. 2013. Resource- and Cost-effective integration of renewables in existing high-rise buildings: Deliverable D0.1.4 Final publishable summary report Freiburg.

Leupen, B. 2006. *Frame and Generic Space*. Rotterdam: 010 Publishers.

LIN. 2009. Cité du design, Saint-Etienne. Berlin.

Lopez, C. Polo; F. Frontini; P. Bonomo; A. Scognamiglio. 2014. "PV and façade systems for the building skin. Analysis of design effectiveness and technological features." 29th Europen Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam.

Martins, António Manuel; André Gago da Câmara. 2010. Lote 13: Tipologia T3: Bairro Maria dos Anjos Amaral, Água de Pau, Lagoa: Projecto de Térmica.

Matuska, Tomas; Borivoj Sourek. 2006. "Façade solar collectors." *Solar Energy* 80 (11):1443-1452. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.04.006.

Maurer, Christoph; Thibault Pflug; Paolo Di Lauro; Joze Hafner; Friderik Knez; Sabina Jordan; Michael Hermann; Tilmann E. Kuhn. 2012. "Solar Heating and Cooling with Transparent Façade Collectors in a Demonstration Building." *Energy Procedia* 30 (0):1035-1041. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.116.

Mauthner, Franz; Werner Weiss; Monika Spörk-Dür. 2015. Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2013. Editado por IEA Solar Heating & Cooling Programme.

Minimize Group. 2015. "Hybrid PV-T range." Acedido a 08-03-2015. http://www.minimisegroup.com/hybrid-solar-pvt-panels.html.

MIT Solar Decathlon Team. n. d. "History." Acedido a 08-03-2015. http://web.mit.edu/solardecathlon/solar1.html.

Mitchell, Beverley. 2014. "RhOME for denCity's Passive Solar Home Wins Grand Prize at Solar Decathlon Europe 2014 " Acedido a 25-04-2015. http://inhabitat.com/rhome-for-dencitys-solar-decathlon-home-boasts-adjustable-photovoltaic-shading-screens/.

Mora, Rodrigo; Girma Bitsuamlak; Miljana Horvat. 2011. "Integrated life-cycle design of building enclosures." *Building and Environment* 46 (7):1469-1479. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.018.

Mourant, Andrew. 2014. "BIPV: Better form, improved function." *Renewable Energy Focus* 15 (5):20-23. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1755-0084(14)70115-2.

Nextroom. 2003. "Wohnen am Lohbach." Acedido a 02-05-2015. http://www.nextroom.at/building.php?id=67&lang_id=de.

Ng, Poh Khai; Nalanie Mithraratne; Harn Wei Kua. 2013. "Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings." *Energy and Buildings* 66 (0):274-281. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.029.

Nielsen, Søren. 2010. "A dynamic building culture."

Nigg, Sarah. 2015. "A beautiful way of producing electricity." Acedido a 15-03-2016. https://www.hslu.ch/en/lucerne-university-of-applied-sciences-and-arts/about-us/medien/magazin/archiv/2015/06/09/schoen-viel-strom-produzieren.

NREL. 2016. "Research Cell Efficiency Records." Acedido a 02-04-2015. http://www.nrel.gov/ncpv/.

OECD/IEA. 2015a. IEA Headline Global Energy Data: 2015 Edition. Base de dados em linha.

OECD/IEA. 2015b. Key World Energy Statistics. Paris.

Palmero-Marrero, Ana I.; Armando C. Oliveira. 2006. "Evaluation of a solar thermal system using building louvre shading devices." *Solar Energy* 80 (5):545-554. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.003.

Parlamento Europeu, Conselho da União Europeia. 2009. DIRECTIVA 2009/28/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE, Jornal Oficial da União Europeia L140/16.

Parlamento Europeu, Conselho da União Europeia. 2010. DIRECTIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação), Jornal Oficial da União Europeia L 153/13.

Peng, Jinqing; Lin Lu; Hongxing Yang; Tao Ma. 2015. "Comparative study of the thermal and power performances of a semi-transparent photovoltaic façade under different ventilation modes." *Applied Energy* 138 (0):572-583. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.003.

Perez, Marc J. R.; Vasilis Fthenakis; Hyung-Chul Kim; Anthony O. Pereira. 2012. "Façade–integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 20 (8):975-990. doi: http://dx.doi.org/10.1002/pip.1167.

Petter Jelle, Bjørn; Christer Breivik; Hilde Drolsum Røkenes. 2012. "Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 100:69-96. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016.

Phileas, Atelier. n. d. "Office building, Dijon." http://www.atelier-phileas.com/projets/bureaux-lieux-de-travail/article/immeuble-de-bureaux-dijon-21?lang=en.

Philippon Kalt. n. d. "Philippon Kalt Architectes Urbanistes." Acedido a 26-04-2014. http://www.philippon-kalt.fr/.

Pinto, Ricardo. 2014. "Reabilitação energética de um edifício de serviços. Convergência para NZEB." Tese de Mestrado, Engenharia Civil, ISEL.

Portaria n.º 701-H/2008, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. 2008. Portaria n.º 701-H/2008 - Diário da República. Série I. 145 (29-07-2008).

Portugal, Governo de. 2009. "Painéis solares." Acedido a 04-02-2014. http://www.paineissolares.gov.pt/.

Prasad, Deo; Mark Snow. 2005. *Designing with solar power: A source book for building integrated photovoltaics (BIPV)*. London: Earthscan.

Probst, Maria Cristina Munari. 2009. "Architectural integration and design of solar thermal systems." Tese de doutoramento, EPFL.

PROCIV. 2014. Avaliação nacional de risco.

PSE; BEAR iD. 2011. D4.1.4 Integrated Concepts - Technical Composition. Contract No. 212206 Cost-Effective: Resource-and Cost-efective integration of renewables in existing high-rise buildings.

PVACCEPT. 2005. PVACCEPT: Final report. Editado por Christine Rüb e Ingrid Hermannsdörfer. Innovation and SME IPS-2000-0090.

PVACCEPT. n. d. "Solar Information Board at Castello San Giogio in La Spezia (Italy)." Acedido a 28-04-2015. http://www.pvaccept.de/pvaccept/eng/laspezia.htm.

PVGIS. 2010. "Photovoltaic Geographical Information System, Interactive Maps." Acedido a 15-05-2013. http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php.

Ramirez-Stefanou, M.; T. Mallick; M. Smyth; J. D. Mondol; A. Zacharopoulos; T. J. Hyde. 2011. "Characterisation of a Line-Axis Solar Thermal Collector for Building Façade Integration." In *Sustainability in Energy and Buildings: Results of the Second International Conference on Sustainability in Energy and Buildings (SEB'10)*, Editado por Robert J. Howlett, Lakhmi C. Jain Shaun H. Lee, 277-287. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Regulamento UE N.º 305/2011, Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. 2011. Regulamento UE N.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho de 9 de Março de 2011 que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Directiva 89/106/CEE do Conselho. Jornal Oficial da União Europeia. L 88 (4.4.2011). .

Renzo Piano Building Workshop. n. d. "California Academy of Sciences." Acedido a 12-11-2015. http://www.rpbw.com/en/home/.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, Presidência do Conselho de Ministros. 2013. Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013. Diário da Rébuplica. 1.ª série. 70 (10 de Abril de 2013).

Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008, Presidência do Conselho de Ministros. 2008. Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008. Diário da Rébuplica. 1.ª série. 97 (20 de Maio de 2008).

Rheinzink. 2010. Quick Step: The Rheinzink Stepped Roof. Dattlen: Panfleto Rheinzink.

Rheinzink. n. d.-a. Quick Step: Solar PV. Panfleto Rheinzink.

Rheinzink. n. d.-b. "Rheinzink." Acedido a 04-05-2010. https://www.rheinzink.ae/.

Richter Dahl Rocha & Associés architectes. n. d. "EPFL Quartier Nord, SwissTech Convention Center, Ecublens, Switzerland." Acedido a 12-11-2015. http://www.richterdahlrocha.com/en/project/swisstech_congress_epfl#/image/1.

Roberts, Simon; Nicolò Guariento. 2009. *Building Integrated Photovoltaics: A Handbook*. Germany: Birkhäuser.

Rodrigues, Carlos; Susana Viana; António Joyce; Helder Gonçalves; António Rocha e Silva. 2008. "Solar XXI building PV systems: performance during the two first years of operation."

EuroSun 2008 - 1ST International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Lisboa.
Ross, Adam M.; Donna H. Rhodes; Daniel E. Hastings. 2008. "Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value." *Systems Engineering* 11 (3):246-262. doi: http://dx.doi.org/10.1002/sys.20098.
Rush, Richard D. 1991. *The Building Systems Integration Handbook*: Architectural Press.
Russel, P.; S. Moffat. 2001. Assessing buildings for adaptability. In *IEA Annex 31: Background reports*.
Santos, F. D. ed lit; P. ed lit Miranda. 2006. *Alterações climáticas em Portugal cenários, impactos e medidas de adaptação: projecto SIAM II*. Lisboa: Gradiva.
Santos, F. D.; K. Forbes; R. Moita. 2002. *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Project*. Lisboa: Gradiva.
Santos, Filipe Duarte, ed. lit.; Ricardo Aguiar, ed. lit. 2006. *Clima e metereologia dos arquipélagos atlânticos : impactos e medidas da adaptação às alterações climáticas no arquipélago da Madeira*. Funchal: Direcção Regional do Ambiente da Madeira.
Scheer, Hermann. 2005. *The solar economy renewable energy for a sustainable global future*. London: Earthscan.
Schittich, Chirstian. 2009. "Marché international support office: Zero-energy architecture in Switzerland." *Detail Green*.
Schmidhuber. 2014. "German Pavilion Expo Milano 2015: The Solar Trees " Acedido a 12-11-2015. http://www.schmidhuber.de/en/project/german-pavilion-expo-milano-2015-0.
Schoof, Jakob. 2013. "Dialogue with the sun." *Daylight & Architecture*.
Schott. 2013. "Glass made of ideas: The Schott synopsis." The Schott synopsis Corporate Presentation.
Schüco. 2014. "B.O.C.Bonneshof Office Center, Düsseldorf " Acedido a 28-11-2015. https://www.schueco.com/web2/de-en/company/press/pressreleases/building_reports_2014_09_15_boc_duesseldorf.
Schuetze, Thorsten; Wolfgang Willkomm; Maria Roos. 2015. "Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Facades." *Energies* 8 (6):6135.
Schweizer. 2016. "Ernst Schweizer AG, Metallbau." Acedido a 25-01-2015. https://www.schweizer-metallbau.ch/de/home.html.
Schweizer Energie. 2014. "Schweizer Energie." Acedido a 14-11-2015. https://www.schweizer-energie.ch/.
Service immeubles, patrimoine et logistique. n. d. Centre d'entretien des routes nationales: Bursins. Editado por Service immeubles Département des infrastructures, patrimoine et logistique.
SHC-IEA. 2015. "SHC Task 39: Polymeric Materials for Solar Thermal Applications." Acedido a 17-01-2015. http://task39.iea-shc.org/.
Sick, Friedrich; Thomas Erge. 2013. *Photovoltaics in Buildings*. New York: Routledge.
SMIT. n .d. "Solar Ivy." Acedido a 07-11-2012. http://www.solarivy.com/.
Snow, Mark; Deo Prasad. 2011. Climate Change Adaptation for Building Designers: An Introduction. *Environment Design Guide* 66.
Solar Home. 2015. "Your Solar Home." Acedido a 01-02-2015. http://www.yoursolarhome.com/.
SolTech Energy. 2016. "SolTech Energy." Acedido a 02-03-2015. http://www.soltechenergy.com/en.
Soltecture. n. d. Corium facade solution: New dimension of solar architecture. Berlin: Panfleto Soltecture.
Sphelar. 2016. "Sphelar Power." Acedido a 26-11-2015. http://sphelarpower.com/.
Stephan, André; Robert H. Crawford; Kristel de Myttenaere. 2013. "A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses." *Applied Energy* 112:23-34. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.076.
Straube, John. 2006. The Building Enclosure. *Building Science Digest*. Accessed 28-11-2012.
Sunaitec. 2014. "Sunaitec." Acedido a 15-05-2010. http://www.sunaitec.pt/.
Sunstyle. n. d. "Sunstyle." Acedido a 15-04-2013. http://www.sunstyle.com/.
Sunways. n. d. Solar cells. Panfleto Sunways.

SUPSI; ISAAC. 2013. "Patterns, dimensions and grids." Acedido a 09-06-2015. http://www.bipv.ch/index.php/en/technology-top-en/visual-aspects/patterns-dimensions-and-grids.

SUPSI; ISSAC. 2013. "Paul Horn Arena." Acedido a 09-06-2015. http://www.bipv.ch/index.php/en/sport-s-en/item/599-paulhornarena.

Tripathy, M.; P. K. Sadhu; S. K. Panda. 2016. "A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61:451-465. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.008.

Ulbikas, Juras; Tomas Lenkimas. n. d. Smartflex Solar Facades: Solar facades of any shape and color at a click of a button, on a industrial scale. Panfleto Smartflex Solarfacades.

UMA Solar. 2013. "Solene: It's Not Your Grandpa's Solar Water Heater." Acedido a 25-01-2016. http://blog.umasolar.com/2013/05/solene-its-not-your-grandpas-solar.html.

Unterrainer, Walter. n. d. "Walter Unterrainer Architektur Atelier." Acedido a 29-10-2012. http://www.architekt-unterrainer.com/.

Ventura, José Miguel Gião Beja. 2014. "Estudo Experimental de um Sistema BIPV/T-PCM." Tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa.

Visa, Ion; Mihai Comsit; Anca Duta. 2014. "Urban Acceptance of Facade Integrated Novel Solar Thermal Collectors." *Energy Procedia* 48:1429-1435. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.161.

Vitrúvio, Marco. 2009. *Vitrúvio: Tratado de Arquitectura* Traduzido por Manuel Justino Pinheiro Maciel. Lisboa: IST Press.

WAF Fassadensysteme. n. d. "WAF." Acedido a 02-02-2016. http://www.waf.at/?lang=en.

Wall, Maria. 2012. "Solar Energy and Architecture." Acedido a 27-02-2015. http://task41.iea-shc.org/.

Weller, Bernhard; Jasmin Fischer; Hubertus Wabnitz. 2013. Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme (PV-WDVS). Editado por Fraunhofer IRB Verlag.

Weller, Bernhard; Caludia Hemerle; Sven Jacubetz; Stefan Unnewehr. 2010. *Photovoltaics: Technology, Architecture, Installation*, *Detail Practice*. Munich: Birkhäuser.

Yang, Rebecca Jing. 2015. "Overcoming technical barriers and risks in the application of building integrated photovoltaics (BIPV): hardware and software strategies." *Automation in Construction* 51:92-102. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.005.

Yano, Akira; Mahiro Onoe; Josuke Nakata. 2014. "Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications." *Biosystems Engineering* 122:62-73. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.04.003.

Yin, H. M.; D. J. Yang; G. Kelly; J. Garant. 2013. "Design and performance of a novel building integrated PV/thermal system for energy efficiency of buildings." *Solar Energy* 87:184-195. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.10.022.

Yu, P.M.; C.L. Cheng; L.M. Liao; Y.T. Yu. 2009. "An Evaluation and Benchmarking Study of the Building Integrated Photovlatic (BIPV)." Conference on Green Building Towards Eco-City, Rotterdam (Netherlands), 2009.

Zhang, Xingxing; Jingchun Shen; Yan Lu; Wei He; Peng Xu; Xudong Zhao; Zhongzhu Qiu; Zishang Zhu; Jinzhi Zhou; Xiaoqiang Dong. 2015. "Active Solar Thermal Facades (ASTFs): From concept, application to research questions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50:32-63. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.108.

Zhao, Yimu; Garrett A. Meek; Benjamin G. Levine; Richard R. Lunt. 2014. "Near-Infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators." *Advanced Optical Materials* 2 (7):606-611. doi: 10.1002/adom.201400103.

ANEXO A
CATEGORIAS DE INTEGRAÇÃO

As “categorias de integração” reúnem 27 parâmetros qualitativos e quantitativos que permitem a avaliação da integração de sistemas solares ativos na envolvente de edifícios, através da comparação de soluções de projeto (variantes).

Em geral, o critério de valorização é qualitativo e corresponde à atribuição de uma classificação numérica, em que “0” equivale a uma prática não desejada, “1” à satisfação do parâmetro em questão, e “2” à satisfação do parâmetro a um nível acima do que se poderá considerar uma prática corrente. Em determinados parâmetros (A1, A3, A4, F1, G1 e G2) a classificação é quantitativa corresponde a um valor absoluto. Nestes casos, de modo a uniformizar os resultados, é aplicada uma valorização idêntica aos parâmetros qualitativos, considerando como referência a variante que apresenta o melhor resultado.

Nos quadros seguintes é apresentada a descrição detalhada de cada parâmetro, assim como os respetivos critérios de valorização.

Categoria	**A - Integração energética**		
Parâmetro	**A1 – Produção energética anual**		
Descrição	Estimativa do total anual da energia produzida pelos SSA.		
Critério de valorização	Valor total da energia produzida anualmente (kWh/a) ou total de energia produzido anualmente por área da envolvente (kWh/a/m^2).		
Critério de valorização entre variantes "V"	$V = kWh/a_{max}$	Variante com a maior produção anual de energia.	2
	$\frac{kWh/a_{max}}{2} < V < kWh/a_{max}$	Variante ou variantes com uma produção anual de energia considerada razoável.	1
	$V \leq \frac{kWh/a_{max}}{2}$	Variante ou variantes com uma produção anual de energia considerada baixa.	0

Categoria	**A - Integração energética**		
Parâmetro	**A2 – Balanço energético**		
Descrição	Os SSA devem produzir energia em função das necessidades energéticas relacionadas com o funcionamento do edifício (aquecimento, arrefecimento, AQS, iluminação), sendo o seu contributo valorizado através do conceito de "balanço energético quase nulo". Como o conceito de "balanço energético quase nulo" ainda não foi definido a nível nacional, considera-se um edifício como tal quando a energia produzida anualmente a partir de fontes renováveis corresponde a 50% ou mais do seu consumo energético anual, relativamente à fase de uso. $NZEB = \frac{\text{Produção de energia renovável}}{\text{Necessidades energéticas}}$ (A1)		
Referências	DIRECTIVA 2010/31/UE - A partir de 2020, os edifícios novos terão de possuir um "balanço energético quase nulo", sendo o prazo 2018 para os edifícios públicos (Parlamento Europeu, 2010).		
Critério de valorização	$NZEB \geq 1$	"Balanço nulo ou balanço positivo"	2
	$0,5 \leq NZEB < 1$	"Balanço quase nulo"	1
	$NZEB < 0,5$	"Balanço negativo"	0

Categoria	**A - Integração energética**		
Parâmetro	**A3 – Energia incorporada**		
Descrição	É avaliado o tempo necessário à produção de energia equivalente à energia despendida em todo o ciclo de vida dos SSA, através do indicador "EPBT – Energy payback time", e número de vezes que o sistema "paga" a energia nele "investida" ao longo do ciclo de vida através do indicador "ERF – Energy return factor". O "EPBT" é determinado através da seguinte expressão: $$EPBT = \frac{(E_{materias} + E_{manufatura} + E_{transporte} + E_{instalação} + E_{fim\ de\ vida})}{((G_{geração\ anual\ de\ energia} / \eta G) - E_{operação\ e\ manutenção})} \quad (A2)$$ E – energia primária necessária (para cada uma das fases indicadas); G – geração de energia; ηG – eficiência da rede na conversão de energia primária em eletricidade.		
Referências	"Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems" (Frischknecht et al., 2015b).		
Critério de valorização	O EPBT é expresso por um valor único (anos), e o ERF é expresso por um valor único (sem unidade).		
Critério de valorização entre variantes "V"	$V = EPBT_{min}$	Variante com o menor EPBT.	2
	$EPBT_{min} < V \leq EPBT_{min} .1,5$	Variante ou variantes com um EPBT razoável.	1
	$V > EPBT_{min} .1,5$	Variante ou variantes com um EPBT excessivo.	0

Categoria	**A - Integração energética**		
Parâmetro	**A4 – Potencial de aquecimento global**		
Descrição	Potencial de mitigação dos gases com efeito estufa, tendo em conta as emissões evitadas ao longo do ciclo de vida dos SSA, por comparação com outras fontes de produção energética do edifício e o *mix* energético nacional.		
Critério de valorização	O potencial de aquecimento global (PAG) é expresso por um valor único (kg CO_2 equiv).		
Critério de valorização entre variantes "V"	$V = PAG_{min}$	Variante com o menor PAG.	2
	$PAG_{min} < V \leq PAG_{min} .1,5$	Variante ou variantes com um PAG razoável.	1
	$V > PAG_{min} .1,5$	Variante ou variantes com um PAG excessivo.	0

Categoria	**A - Integração energética**	
Parâmetro	**A5 - Segurança abastecimento**	
Descrição	É avaliada a capacidade do edifício manter as funções e serviços no caso de interrupção da rede, através da utilização dos SSA como equipamento *backup* de energia elétrica e térmica.	
Critério de valorização	Os SSA configuram um sistema de *backup* de energia elétrica e térmica.	2
	É garantido a função *backup* apenas em termos de energia elétrica ou térmica.	1
	Os SSA não fazem parte de um sistema de *backup.*	0

Categoria	**A - Integração energética**	
Parâmetro	**A6 - Contributo para o desempenho energético**	
Descrição	Contributo arquitetónico e bioclimático das soluções de integração dos SSA no desempenho energético através de funções como: • Potenciar ou reduzir os ganhos solares; • Iluminação natural; • Proteção solar; • Isolamento térmico; • Recuperação de calor; • Ventilação. O desempenho energético depende não só das características dos SSA, mas também da forma como estes são articulados em projeto. Como exemplo, ao fazerem parte da envolvente envidraçada ou de dispositivos de sombreamento, os SSA acumulam funções para além das comuns num revestimento, permitindo inclusivamente diferentes opções de controlo e/ou filtragem de luz, de acordo com o tipo de tecnologia e a configuração dos módulos/coletores.	
Critério de valorização	Os SSA influem diretamente e de forma determinante no desempenho energético.	2
	Os SSA influem diretamente no desempenho energético.	1
	Os SSA não influem no desempenho energético ou provocam um efeito negativo.	0

Categoria	**B – Integração morfológica**	
Parâmetro	**B1 - Posicionamento - orientação e inclinação**	
Descrição	A integração dos SSA depende de um conjunto de fatores que frequentemente implicam não dispor das condições de posicionamento ideais. O posicionamento é avaliado em função da energia gerada nas condições de orientação e inclinação decorrentes da integração na envolvente, por comparação com a energia gerada em condições de posicionamento otimizado e livre de constrangimentos (por uma instalação equivalente, no mesmo local e em função do mesmo período sazonal privilegiado - inverno, verão ou anual).	
Critério de valorização	Sem perdas ou com perdas inferiores a 10% em relação à produção energética de uma instalação equivalente considerando a orientação e a inclinação otimizadas.	1
	Perdas superiores a 10% em relação à produção energética de uma instalação equivalente considerando a orientação e a inclinação otimizadas.	0

Categoria	**B – Integração morfológica**	
Parâmetro	**B2 - Posicionamento - sombreamento**	
Descrição	A colocação de SSA em zonas não totalmente isentas de sombras é praticamente inevitável em muitas situações urbanas. O sombreamento pode ser distante (horizonte), próximo (sombreamentos parciais), e temporário (acumulação de sujidade e detritos – parâmetro B3). A influência do sombreamento é diversa de acordo com o tipo de SSA (nos sistemas fotovoltaicos depende do tipo de tecnologia e pode por em causa o desempenho global, nos sistemas térmicos é proporcional à diminuição de desempenho e sem risco). O sombreamento (horizonte e próximo) é avaliado pela sua influência na produção de energia.	
Critério de valorização	A produção de energia não é afetada por sombreamento ou é afetada de forma ligeira, com perdas inferiores a 10% em relação à mesma instalação isenta de sombra.	1
	A produção de energia é afetada por sombreamento, com perdas superiores a 10% em relação à mesma instalação isenta de sombra.	0

Categoria	**B – Integração morfológica**	
Parâmetro	**B3 - Posicionamento – acumulação de sujidade**	
Descrição	Os SSA devem ser instalados de modo a evitar a acumulação de sujidade e, consequentemente, o aumento da frequência e tempo necessários à manutenção regular. Nesse sentido, os SSA com caixilho devem ser montados com um ângulo mínimo de 10 a 15°, e os SSA sem caixilho com um ângulo mínimo de 3 a 5°, de modo a potenciar a autolimpeza.	
Critério de valorização	A instalação dos SSA permite a autolimpeza.	1
	A instalação dos SSA não permite a autolimpeza.	0

Categoria	**B – Integração morfológica**	
Parâmetro	**B4 – Coeficiente de reflexão**	
Descrição	O coeficiente de reflexão, ou albedo, consiste na fração de energia refletida por uma superfície em relação ao total de energia nela incidente (expresso de 0 a 1). As superfícies de cor clara, como a neve, possuem uma albedo elevada (próxima de 1), refletindo quase a totalidade da energia solar incidente. As superfícies de cor escura possuem uma albedo baixa, devido à elevada absorção de radiação solar. Quanto maior a inclinação dos raios solares maior é a albedo. Andrews e Pearce (2013) demonstraram um aumento até 10% na geração de eletricidade prevista em sistemas fotovoltaicos de silício, devido à radiação refletida. A radiação incidente na superfície dos SSA pode ser potenciada pela utilização de superfícies refletivas na envolvente do edifício ou em áreas adjacentes a este.	
Critério de valorização	São tomadas medidas para potenciar a radiação solar incidente nos SSA.	1
	Não são tomadas medidas para potenciar a radiação solar incidente nos SSA.	0

Categoria	**B – Integração morfológica**	
Parâmetro	**B5 – Controlo de temperatura**	
Descrição	Nos sistemas fotovoltaicos o controlo da temperatura de funcionamento é fundamental de modo a garantir um desempenho elevado. A necessidade e a dimensão do espaço de ventilação dependem do tipo de tecnologia e da inclinação da superfície coletora (cobertura inclinada ou fachada).	
Critério de valorização	Espaço de ventilação dos sistemas fotovoltaicos adequado, sem perda de potência devido à temperatura de funcionamento.	1
	Espaço de ventilação dos sistemas fotovoltaicos reduzido ou nulo.	0

Categoria	**C – Integração multifuncional**	
Parâmetro	**C1 - Contributo para o desempenho não energético**	
Descrição	Contributo para o desempenho não energético através da adequação das características dos SSA na compatibilização construtiva, em funções como: • Conforto acústico – atenuação de ruído aéreo pela envolvente (RRAE); • Conforto visual - ligação visual ao exterior; • Segurança e proteção; • Proteção climática (resistência às ações climáticas); • Segurança contra incêndio.	
Critério de valorização	Os SSA contribuem de modo determinante para o desempenho não energético.	2
	Os SSA contribuem para o desempenho não energético.	1
	Os SSA não contribuem para o desempenho não energético.	0

Categoria	**C – Integração multifuncional**	
Parâmetro	**C2 – Operabilidade e utilização**	
Descrição	Nos casos em que os SSA conformam soluções operáveis pelos utilizadores, avalia-se a universalidade da operação de interruptores/sistemas de controlo e a sua adaptabilidade (no sentido de articular requisitos individuais tais como temperatura, humidade, velocidade do ar, iluminação natural, encandeamento, ligação visual ao exterior).	
Referências	Regime de acessibilidade aos edifícios (Decreto-Lei n.º 163/2006).	
Critério de valorização	O acesso é universal e os sistemas permitem o controlo individual.	2
	O acesso é universal.	1
	O acesso não é universal.	0

Categoria	**D – Integração construtiva**	
Parâmetro	**D1 - Grau de integração**	
Descrição	O grau de integração avalia o contributo dos SSA para a integridade construtiva e funcional da envolvente.	
Critério de valorização	Os SSA constituem um pré-requisito para a integridade funcional da envolvente.	1
	Os SSA não constituem um pré-requisito para a integridade funcional da envolvente: quando os SSA fazem parte de um produto de construção, mas a base que os suporta é que satisfaz os requisitos da envolvente, como no caso das telhas cerâmicas tradicionais com um módulo fotovoltaico sobreposto (acoplação); quando os SSA duplicam funções inteiramente garantidas pela envolvente; ou quando são simplesmente sobrepostos à envolvente (adição).	0

Categoria	**D – Integração construtiva**	
Parâmetro	**D2 – Solução construtiva - distribuição**	
Descrição	Compatibilização construtiva do circuito solar e partes complementares (inversor, cabos, tubagens, conexões, diodos, dispositivos de segurança, estruturas e elementos de correlação).	
Critério de valorização	O circuito solar e as partes complementares são construtivamente integrados na solução da envolvente.	1
	O circuito solar e as partes complementares não são construtivamente integrados na solução da envolvente.	0

Categoria	**D – Integração construtiva**	
Parâmetro	**D3 – Solução construtiva - adaptabilidade**	
Descrição	As soluções de integração devem ser adaptáveis, em função da necessidade de substituição dos SSA e de acordo com os cenários estabelecidos. São consideradas adaptáveis em função dos seguintes aspetos: • Independência (interfaces projetados para a separação); • Capacidade de atualização/facilidade de reconfiguração; • Compatibilidade de vida útil.	
Critério de valorização	Os elementos e componentes construtivos estão hierarquicamente organizados de forma a assegurar uma estruturação em camadas facilmente reconfigurável, de acordo com os respetivos ciclos de vida, sem causarem uma interferência funcional negativa.	1
	A disposição de elementos e componentes construtivos não permite a adaptação da solução de uma forma facilitada.	0

Categoria	**E - Integração formal**	
Parâmetro	**E1 - Integração no contexto urbano**	
Descrição	Relação contextual da integração dos SSA na envolvente com o ambiente construído e/ou natural em termos de materialidade e acabamento.	
Critério de valorização	Os SSA possuem uma relação de diálogo com o contexto urbano e/ou paisagístico onde se inserem, através das suas qualidades materiais e de acabamento.	1
	Os SSA não possuem uma relação de diálogo com o contexto urbano e/ou paisagístico onde se inserem, devido às suas qualidades materiais e de acabamento.	0

Categoria	**E - Integração formal**	
Parâmetro	**E2 - Superfície**	
Descrição	Coordenação dimensional, geométrica e morfológica entre a superfície geradora de energia e a restante superfície da envolvente. A aplicação dos SSA deve ser efetuada em consonância com a estratégia global de composição formal da envolvente, em termos de: • Localização; • Posição e dimensão dos módulos/coletores; • Tipo de junta; • Tipo de fixações. Nota: em determinadas situações, a integração da superfície composta pelos SSA pode ser conseguida por contraste. Contudo, um elemento de exceção enquadra-se sempre numa narrativa figurativa geral, através do recurso a certas estratégias de dissonância compositiva.	
Critério de valorização	A superfície composta pelos SSA apresenta uma total coordenação dimensional, geométrica e morfológica com a restante envolvente, existindo uma qualidade figurativa uniforme da envolvente.	1
	A superfície composta pelos SSA apresenta uma baixa ou nula coordenação dimensional, geométrica e/ou morfológica com a restante envolvente. É dissonante da composição da restante envolvente, em termos de localização e modularidade. Apresenta juntas e zonas de transição de elevada tolerância e baixa qualidade figurativa.	0

Categoria	**E - Integração formal**	
Parâmetro	**E3 – Componentes – módulos e coletores**	
Descrição	Coordenação dimensional, geométrica e morfológica do módulo/coletor, ao nível da sua configuração, nomeadamente: • Forma e dimensão; • Material e textura superficial dos elementos visíveis; • Tipo e qualidades do vidro; • Cor e material das células e/ou do absorsor; • Caixilho; • Tipo de juntas; • Transparência; • Flexibilidade.	
Critério de valorização	O módulo/coletor apresenta uma total coordenação dimensional, geométrica e morfológica dos seus elementos com os elementos da envolvente.	1
	O módulo/coletor apresenta baixa ou nula coordenação dimensional, geométrica e morfológica dos seus elementos com os elementos da envolvente.	0

Categoria	**E - Integração formal**	
Parâmetro	**E4 – Componentes - partes complementares**	
Descrição	Coordenação dimensional, geométrica e morfológica do circuito solar e das partes complementares dos SSA na composição da envolvente (inversor, cabos, tubagens, conexões, diodos, dispositivos de segurança, estruturas e elementos de correlação).	
Critério de valorização	O circuito solar e as partes complementares apresentam uma total coordenação dimensional, geométrica e morfológica com os elementos da envolvente.	1
	O circuito solar e as partes complementares apresentam baixa ou nula coordenação dimensional, geométrica e morfológica com os elementos da envolvente.	0

Categoria	**F - Integração temporal**	
Parâmetro	**F1 – Redução da quantidade de recursos e do desperdício**	
Descrição	Quantificação dos materiais utilizados de modo a privilegiar soluções com menor impacto em termos de materiais aplicados e da geração de resíduos no transporte e obra.	
Critério de valorização	Quantificação dos materiais (ml, m^2, m^3, kg).	
Critério de valorização entre variantes "V"	Variante ou variantes com reduzida utilização de recursos.	1
	Variante ou variantes com uma utilização de recursos excessiva, por comparação à variante ou variantes com menor utilização de recursos.	0

Categoria	**F - Integração temporal**	
Parâmetro	**F2 – Reutilização, reciclagem e recuperação de energia**	
Descrição	Analise dos fluxos de saída através da determinação dos materiais com potencial para reutilização, reciclagem e recuperação de energia. Este parâmetro permite, com base nas soluções construtivas e nos cenários estabelecidos, a comparação das variantes em termos da adoção de materiais que possam ser substituídos de modo sustentável. Como exemplo, a reciclagem de materiais com um impacto ambiental elevado, como o alumínio, o cobre ou o aço, é ambientalmente positiva, e os resíduos de construção/demolição constituem uma fonte de matéria-prima importante na estratégia europeia de gestão de recursos.	
Critério de valorização	Utilização de materiais recicláveis, reutilizáveis e não considerados perigosos, com previsão do cenário de fim de vida, em termos de reutilização, reciclagem e/ou recuperação de energia.	2
	Utilização de materiais recicláveis, não recicláveis e/ou considerados perigosos, com previsão do cenário de fim de vida, em termos de reutilização, reciclagem e/ou recuperação de energia.	1
	Utilização de materiais recicláveis, não recicláveis ou considerados perigosos, sem previsão do cenário de fim de vida.	0

Categoria	**F - Integração temporal**	
Parâmetro	**F3 – Manutenção - utilização**	
Descrição	Impacto das ações de manutenção sobre a utilização do edifício em função das soluções conformadas pelo SSA, em termos de: • Efeito no desempenho do edifício durante as operações de manutenção; • Usabilidade do edifício durante manutenção.	
Critério de valorização	As operações de manutenção não interferem funcionalmente com o desempenho da envolvente ou com a utilização do edifício.	1
	As operações de manutenção interferem funcionalmente com o desempenho da envolvente ou com a utilização do edifício.	0

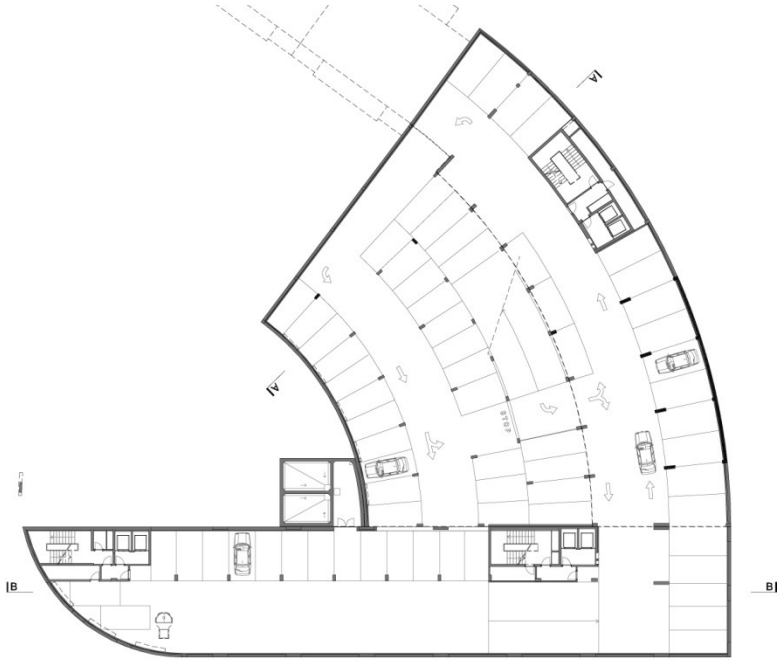
Categoria	**F - Integração temporal**	
Parâmetro	**F4 – Manutenção - acessibilidade**	
Descrição	Facilidade de acesso para o desempenho das operações de manutenção e reparação dos SSA e partes complementares.	
Critério de valorização	As soluções são facilmente acessíveis para o desempenho das operações de manutenção e reparação.	1
	As soluções não são facilmente acessíveis para o desempenho das operações de manutenção e reparação.	0

Categoria	**G - Económico**		
Parâmetro	**G1 - Custo**		
Descrição	Contabilização de todos os custos associados ao ciclo de vida, tais como: • Custo do sistema (incluindo os respetivos componentes acessórios); • Custo da instalação (mão de obra); • Custo de operação e manutenção; • Custo de fim de vida (eliminação/reciclagem).		
Critério de valorização	Custo total da solução de integração (€, €/m^2, €/kWh/a).		
Critério de valorização entre variantes "V"	$V = €_{min}$	Variante com o menor custo.	2
	$€_{min} < V \leq €_{min} .1,25$	Variante ou variantes com um custo razoável.	1
	$V > €_{min} .1,25$	Variante ou variantes com um custo excessivo.	0

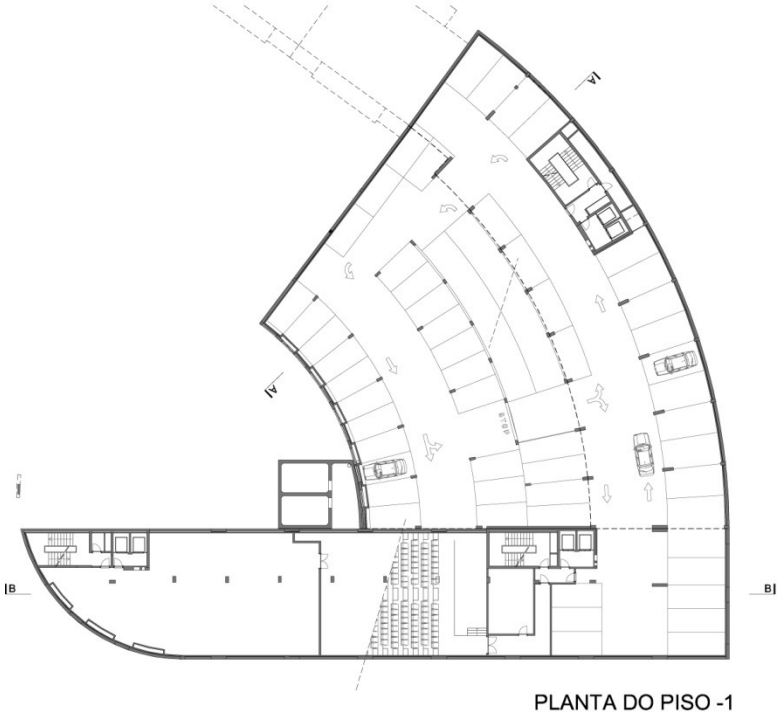
Categoria	**G - Económico**		
Parâmetro	**G2 - Valor financeiro**		
Descrição	Balanço entre o custo e as receitas ao longo do ciclo de vida. Consideram-se como receitas o valor gerado e os custos evitados, entre os quais: • Acesso a tarifas especiais (subsídios e incentivos); • Custos de consumo de energia evitados; • Custos de materiais evitados (materiais substituídos pela integração dos SSA); • Energia exportada; • SSA como sistema *backup*; • Reciclagem.		
Critério de valorização	Balanço económico (€, €/m^2, €/kWh/a)		
Critério de valorização entre variantes "V"	$V = €_{min}$	Variante com o balanço económico mais favorável.	2
	$€_{min} < V \leq €_{min} .1,25$	Variante ou variantes com balanços económicos razoáveis.	1
	$V > €_{min} .1,25$	Variante ou variantes com um balanço económico não favorável.	0

Categoria	**G - Económico**		
Parâmetro	**G3 – Retorno do investimento**		
Descrição	Determinação da viabilidade económica através do período de retorno simples do investimento (PRS), dado pela seguinte expressão: $$PRS = \frac{C}{P} \quad (A3)$$ PRS – período de retorno simples (anos); C – custos de investimento balançados com as receitas ao longo do ciclo de vida; P – poupança anual resultante da geração de energia ao preço da energia da rede.		
Referências	Período de retorno simples calculado segundo metodologia de apuramento da viabilidade económica da utilização de determinada medida eficiência energética, explícita no Despacho n.º 15793-L/2013 (2013) para efeito da regulamentação do desempenho energético dos edifícios (Decreto-Lei n.º 118/2013).		
Critério de valorização	Período de retorno do investimento coincidente ou inferior ao pretendido pelo investidor.		1
	Período de retorno do investimento superior ao pretendido pelo investidor.		0

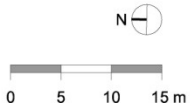
ANEXO B
CASO DE ESTUDO 1 - PLANTAS, CORTES E ALÇADOS

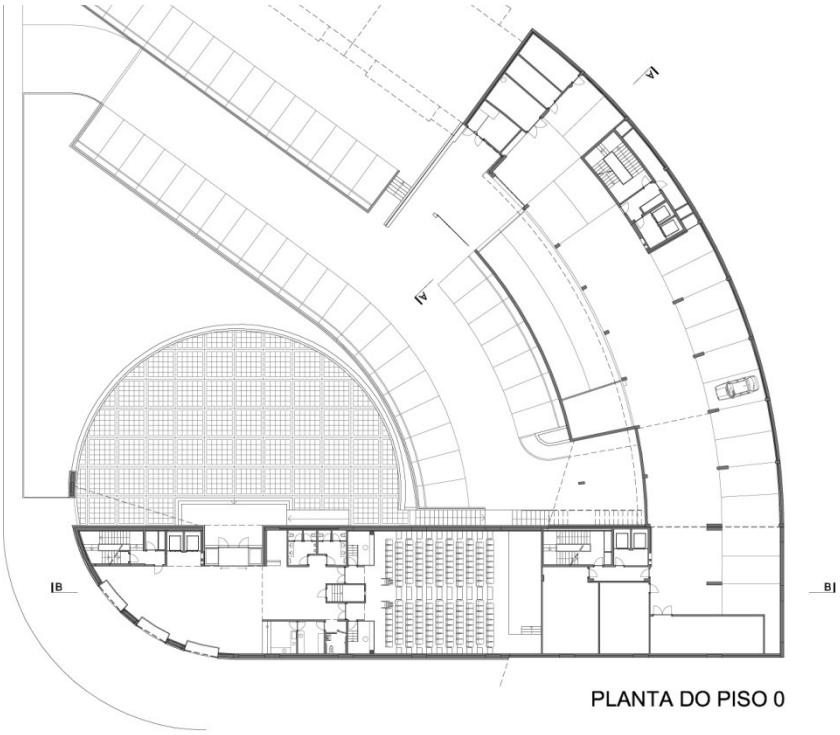


PLANTA DO PISO -2

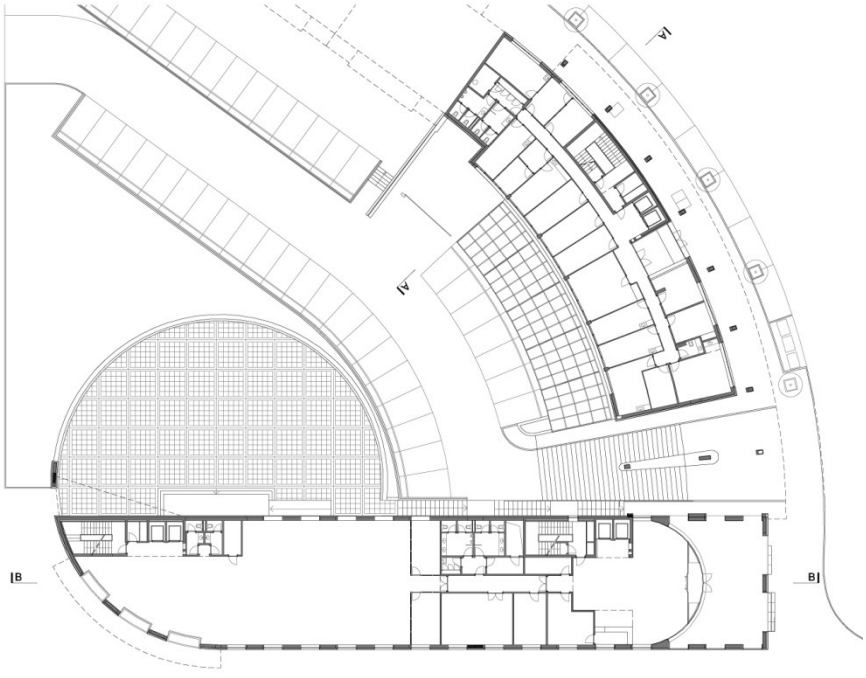


PLANTA DO PISO -1

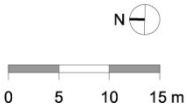


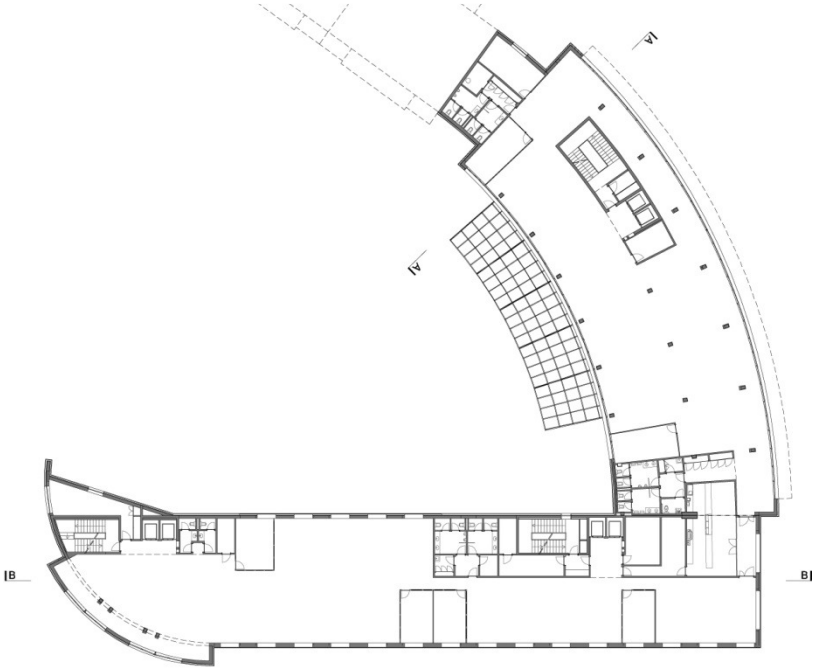


PLANTA DO PISO 0

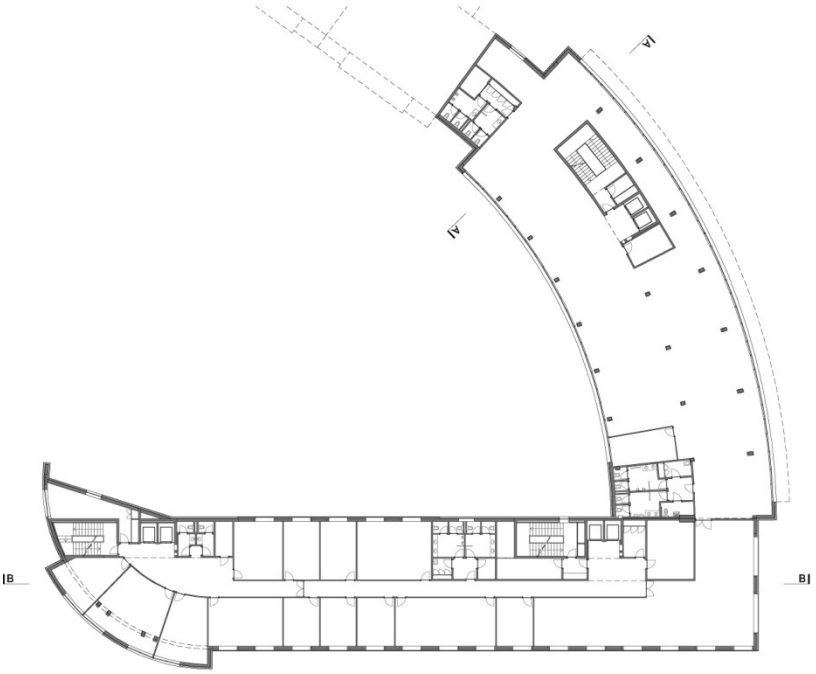


PLANTA DO PISO 1

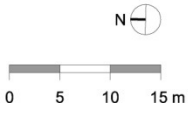


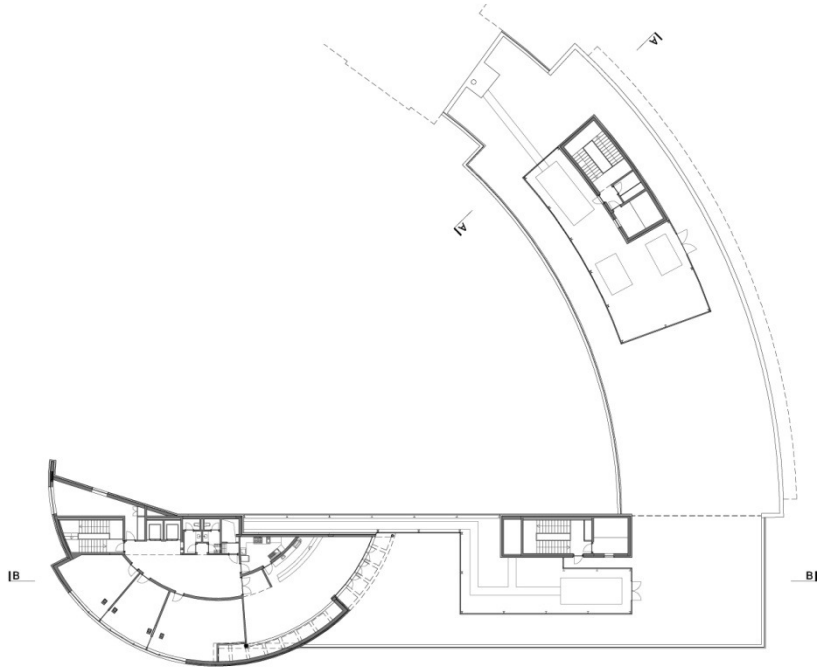


PLANTA DO PISO 2

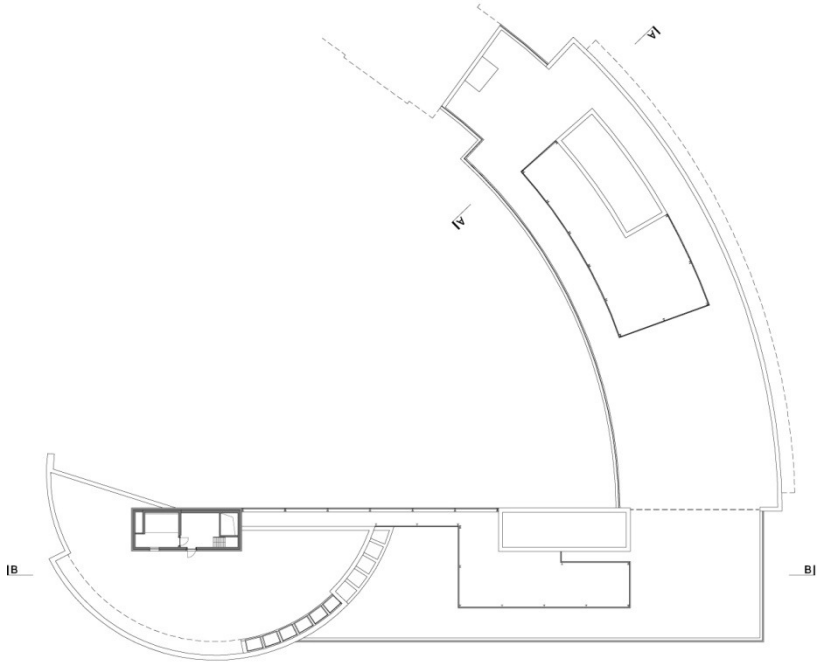


PLANTA DO PISO 3

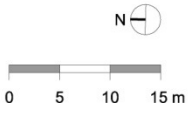


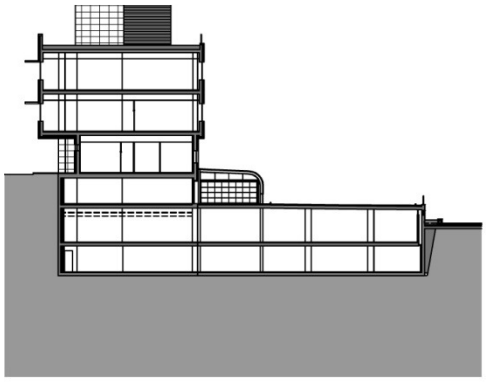


PLANTA DO PISO 4

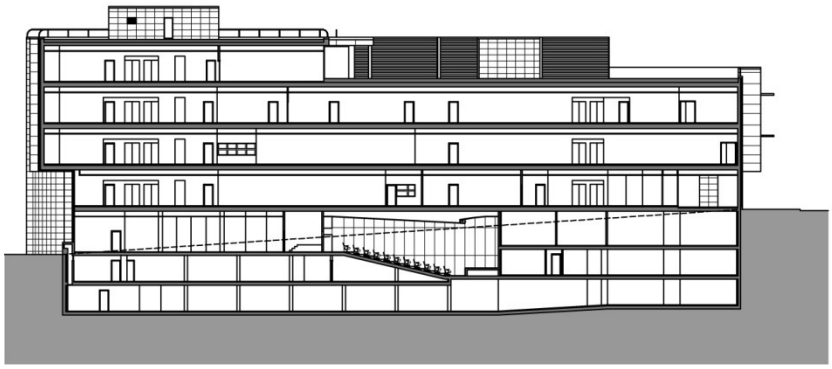


PLANTA DE COBERTURA

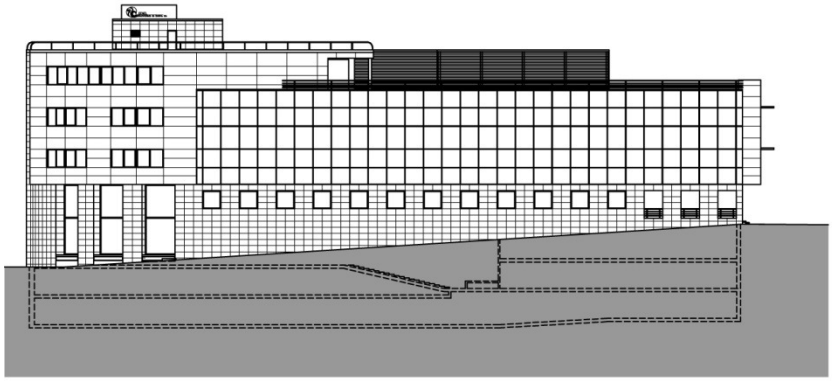




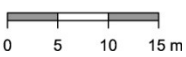
CORTE A



CORTE B

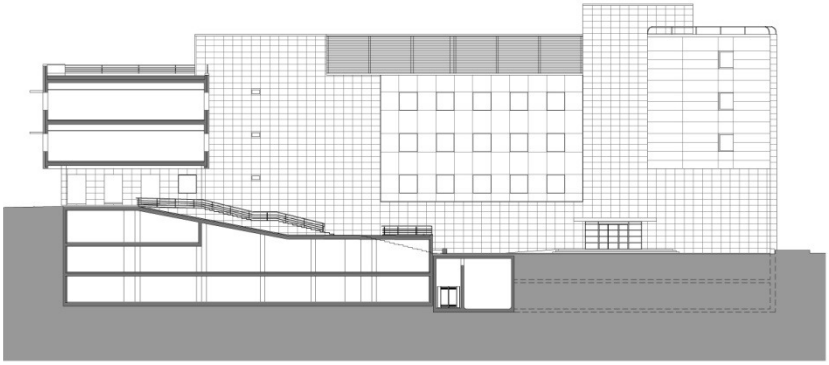


ALÇADO POENTE

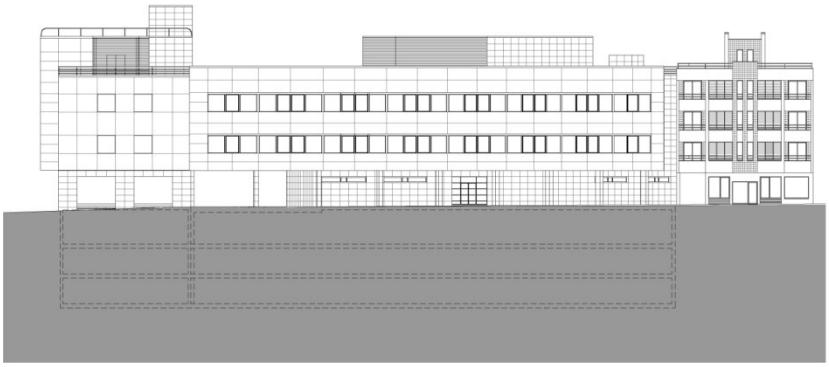




ALÇADO NORTE



ALÇADO NASCENTE



ALÇADO SUL



ANEXO C
SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS CORRENTES E ASPETOS DE INTEGRAÇÃO

A partir do potencial solar das possíveis interações que os sistemas solares ativos podem desempenhar na configuração da envolvente, identificam-se, com base na sua localização - cobertura, fachada e elementos exteriores à envolvente - as soluções construtivas tipo (em zona corrente) e descrevem-se alguns aspetos específicos relativos à sua integração – possíveis configurações e condicionantes energéticas, funcionais, construtivas e formais - assim como alguns aspetos relativos à manutenção e referem-se ainda algumas qualidades que os SSA podem adicionar à envolvente.

Como soluções construtivas correntes passiveis de integrar SSA, identificam-se as seguintes configurações (Tabela C.1).

Tabela C.1 – Soluções construtivas correntes com integração de SSA

Localização	**Solução construtiva tipo**
Cobertura	Cobertura inclinada
	Cobertura plana
	Cobertura envidraçada
	Claraboias, lanternins (iluminação natural, filtragem de luz, sombreamento) [(a)]
Fachada	Fachada ventilada
	Fachada cortina
	Fachada envidraçada de pano duplo [(b)]
	Vãos envidraçados (iluminação natural, filtragem de luz, sombreamento) [(a)]
Elementos exteriores à envolvente	Sombreamento/proteção solar
	Guarda-corpos
	Outros

(a) Estas soluções consistem em aplicações pontuais, poderão coexistir com as restantes soluções listadas.

(b) Solução ainda pouco frequente. No entanto, os exemplos de fachadas envidraçadas de duplo pano de vidro com sistemas solares ativos integrados apresentam perspetivas de desenvolvimento e desempenho promissoras.

COBERTURA

A cobertura de um edifício, em termos de conformação geométrica, pode ser inclinada ou plana. A localização dos sistemas solares ativos em cobertura poderá proporcionar, em determinados casos, algumas vantagens, tais como uma reduzida influência de sombras, uma maior facilidade em obter inclinações otimizadas para a geração de energia, e a possibilidade de não condicionar a imagem visível/pública do edifício. Devido a estas vantagens, o mercado disponibiliza diversos produtos para integração em cobertura, com as funções adicionais de revestimento final e de proteção aos elementos atmosféricos (como a estanquidade à água e ao vento).

Em termos térmicos a cobertura de um edifício pode ser quente ou fria. A cobertura fria é comum em coberturas inclinadas, mas também em coberturas planas quando o revestimento é elevado. Esta solução tem como vantagens a redução das ações ambientais sobre as restantes camadas e previne condensações internas. A cobertura quente é comum em coberturas planas e envidraçadas e requer medidas adicionais para evitar ou minimizar as condensações internas.

Os sistemas solares ativos integrados em coberturas podem conformar as seguintes aplicações:

- Revestimento final (zona opaca) – em coberturas inclinadas ou planas (garantido a proteção climática);
- Coberturas envidraçadas (onde podem conciliar a iluminação natural e o seu controlo através de filtragem de luz ou sombreamento);
- Claraboias, lanternins (iluminação natural, filtragem de luz, sombreamento).

REVESTIMENTO FINAL - COBERTURAS INCLINADAS

A integração de SSA em coberturas inclinadas pode aproximar-se do rendimento otimizado dos sistemas (em termos de produção de energia) com a possibilidade de configurar ângulos próximos do ideal (pequenas diferenças de orientação e inclinação implicam reduções de rendimento com pouca expressão). A definição geométrica da cobertura é assim determinante nas fases iniciais de projeto, pois ditará o posicionamento (orientação e inclinação) dos SSA. As coberturas inclinadas podem ter várias conformações, desde uma água até múltiplas águas de variada complexidade (como exemplo, uma cobertura em "serra" pode admitir variações geométricas e funcionais, tais como a face norte ser envidraçada e possibilitar a entrada de luz natural difusa e a face inclinada a sul gerar eletricidade através de SSA, ou até mesmo a face não ativa funcionar como refletora ou concentradora, aumentando a radiação incidente nos SSA).

Na integração dos SSA, as funções de revestimento final geralmente garantem a estanquidade à água, através da sobreposição dos módulos/coletores ou da sua inserção em perfis metálicos que rematam por encaixe ou por selagem da junta.

Relativamente aos sistemas fotovoltaicos, como referido no Capítulo 2, existem módulos correntes e módulos específicos para cobertura (entre os quais revestimentos tradicionais modificados com módulos fotovoltaicos acoplados). As soluções são conformadas por sistemas de pequena escala, como "telhas solares" até coberturas integrais pré-fabricados de grande formato.

Os sistemas fotovoltaicos laminados correntes, com ou sem caixilho, são fixos linearmente ou pontualmente através de perfis metálicos e/ou ganchos metálicos, ou acoplados a placas onduladas ou trapezoidais, sobre ripados tradicionais (podendo variar o seu espaçamento). Os módulos devem ser ventilados do mesmo modo que as coberturas convencionais no plano da subestrutura da cobertura.

Para grandes superfícies de captação, deve-se assegurar espaço suficiente para que a circulação do ar possa ocorrer naturalmente. É aconselhável uma segunda proteção à água, na zona inferior ao sistema, para remoção de eventuais infiltrações e possíveis condensações. Dependendo dos sistemas, a proteção climática é conseguida de forma diversa, nomeadamente através da sobreposição dos módulos (em "escada" como um telhado convencional, solução que normalmente consiste em módulos específicos) recorrendo a perfis de sobreposição lateral (replicando o encaixe das telhas cerâmicas) ou a perfis laterais que funcionam como caleiras para a drenagem da água. Existem também sistemas com selagem de junta entre módulos através de borrachas planas.

As ligações com os remates da cobertura (cumeeira, empena, chaminé) e outros revestimentos têm de ser detalhados, podendo recorrer-se a rufos para a ligação a telhas ou a outros revestimentos. Alguns sistemas específicos incluem remates de transição com revestimentos tradicionais.

Existem também módulos concebidos para a cobertura compatíveis com revestimentos existentes em termos de funcionamento e colocação. Geralmente através do recurso a perfis com encaixes perimetrais e compatíveis com sistemas de telhas existentes no mercado. Existem fabricantes que produzem sistemas de perfis que permitem combinar módulos fotovoltaicos e coletores térmicos com sistemas de iluminação natural para telhados (como a Velux ou a Systaic).

Apesar de não constituírem uma solução "integrada", existem ainda sistemas acoplados cuja proteção à água é assegurada pela peça à qual o módulo é fixo (funcionando como uma sub-telha), estes sistemas permitem retirar os módulos individualmente, sem comprometer a estanquidade da cobertura. Refere-se ainda que módulos pequenos como telhas fotovoltaicas implicam mais cablagens e ligações, contudo permitem geometrias de cobertura complexas e possuem facilidade na conjugação com revestimentos existentes a nível de encaixe e de sistema de suporte.

REVESTIMENTO FINAL – COBERTURAS PLANAS

Em coberturas planas, a maioria das soluções existentes para a zona opaca, consistem em SSA "adicionados" através de sistemas de lastro ou acoplados a revestimentos já existentes (revestimentos metálicos e telas de impermeabilização). Existem também soluções em que módulos fotovoltaicos cristalinos são acoplados a placas de isolamento térmico para a realização de coberturas invertidas.

COBERTURAS ENVIDRAÇADAS

A construção de coberturas envidraçadas baseia-se, de forma geral, nos princípios da fachada cortina, em que os montantes funcionam como vigas e as travessas como travamentos que transferem as ações para uma estrutura principal. Estas coberturas devem equilibrar a iluminação natural, os ganhos solares no verão, e as perdas de calor no inverno, para além de ser necessário ter em conta as cargas térmicas e as tensões mecânicas.

Os sistemas térmicos e fotovoltaicos podem desempenhar funções de sombreamento ou de controlo de encadeamento em envidraçados duplos, ou distanciados da área envidraçada por uma caixa-de-ar ventilada (o que constitui uma utilização como dispositivos de sombreamento, sendo assim considerados elementos exteriores à envolvente). A integração em coberturas envidraçadas ou grandes claraboias – normalmente situadas em átrios de equipamentos ou estruturas urbanas – torna os sistemas visíveis do interior. O padrão de sombra projetado pelos módulos de células cristalinas com afastamento entre estas, afeta o nível de iluminação interior com uma expressão de contraste formal forte.

Relativamente ao tipo de vidro, os módulos fotovoltaicos standard são normalmente compostos por um laminado de vidros temperados intercalados com EVA, possuindo assim um padrão de fratura inadequado. Na integração em coberturas acessíveis devem ser tomadas medidas de segurança adicionais e selecionados produtos SSA apropriados.

MANUTENÇÃO

O grau de inclinação da cobertura pode favorecer a autolimpeza dos sistemas. Em coberturas planas a capacidade de autolimpeza é menor, comparativamente a uma cobertura inclinada, sendo necessária uma limpeza regular, devido à maior apetência para a acumulação de sujidade. Em situações propícias à acumulação de sujidade, pode verificar-se uma redução significativa da produção de energia fotovoltaica. Nas coberturas de vidro, quando a inclinação é reduzida, para além da acumulação de sujidade, há a possibilidade de condensação na face interior.

De forma a facilitar a manutenção, devem ser tidos em conta os seguintes aspetos: localização e integração da caixa de junção; caminhos de cabos e tubagens; impermeabilização das furações dos perfis; durabilidade das selagens e a saída de cabos e tubagens; acesso (a circulação por cima dos sistemas depende de cada produto); e facilidade de manuseamento na substituição.

FACHADA

No que respeita a fachada, os tipos de aplicação dos SSA em função da solução construtiva são os seguintes:

- Fachada ventilada;
- Fachada cortina;
- Fachada envidraçada de pano duplo;
- Vãos envidraçados (iluminação natural, filtragem de luz, sombreamento).

FACHADA VENTILADA

Numa fachada ventilada a camada exterior funciona como uma primeira barreira à penetração da chuva, sendo o pano interior estanque ao ar e à chuva e separado da camada exterior por uma caixa-de-ar ventilada. O pano interior pode ser constituído por vários materiais (betão, alvenaria, estrutura metálica) e normalmente possui isolamento térmico na sua camada mais exterior (com uma barreira para-vapor na face quente e eventualmente uma membrana permeável ao ar e impermeável à água na face exterior). Devido a esta configuração a fachada é normalmente denominada em termos térmicos como uma fachada fria. Os efeitos de contração e expansão do pano interior são minimizados pela proteção exterior (chuva, radiação solar, etc.). A caixa-de-ar permite a ventilação e drenagem da fachada. Este tipo de fachada divide-se em dois tipos: com drenagem e ventilação posterior; e pressurizada. A diferença está no controlo da quantidade de água que penetra pelo pano exterior, na fachada pressurizada esse controlo é maior recorrendo a compartimentação, defletores, pingadeiras, rebordos, barreiras e controlo da dimensão das aberturas de forma a equalizar a pressão da caixa-de-ar com a do exterior. Estas medidas também melhoram a proteção ao fogo, dificultando o efeito chaminé.

O pano interior é estrutural e suporta o revestimento (pano exterior) através de montantes lineares ou de fixações pontuais (sendo o revestimento aparafusado ou apoiado/preso). As fachadas têm de

suportar as ações relativas ao peso próprio, às cargas permanentes, ao vento, neve, gelo, e ações excecionais. Assim como ter em conta as deformações da estrutura e as tensões dos elementos constituintes. O revestimento exterior assume a dimensão formal da fachada através da sua modularidade e do controlo da expressão das juntas, das fixações, da cor, da textura, entre outras questões. Os materiais mais utilizados são a pedra, o alumínio composto, a madeira e os seus derivados, a cerâmica, o vidro, ou resinas fenólicas.

A fachada ventilada é também uma solução eficaz na reabilitação de fachadas, podendo ser conciliada com o aumento do isolamento térmico, inclusive permitindo a permanência dos moradores ou utilizadores na fase de construção.

Em relação à integração dos sistemas solares ativos, esta solução é vantajosa para os sistemas fotovoltaicos, na medida em os módulos possuem versatilidade na inclusão, pois esta é semelhante aos envidraçados convencionais. A caixa-de-ar possibilita a ventilação posterior dos módulos e facilmente acondicionar cabos ou tubagens, podendo ainda tirar-se partido do calor gerado pelo funcionamento dos sistemas fotovoltaicos através de soluções híbridas PV/T. Existem soluções no mercado, quer para módulos fotovoltaicos, quer para coletores térmicos planos, em que os sistemas de fixação são os existentes para outros tipos de revestimentos. Os módulos fotovoltaicos podem ser fixos lateralmente através de perfis de alumínio (em dois ou quatro lados) e depois fixos à subestrutura. Podem também ser fixos pontualmente.

FACHADA CORTINA

De acordo com a norma NP EN 13830 "Fachadas cortina" (IPQ, 2009b), a fachada cortina é constituída por perfilados estruturais verticais e horizontais (alumínio ou aço), ligados entre si e fixos à estrutura do edifício que, em conjunto com o preenchimento, forma um revestimento continuo leve que proporciona, por si próprio ou em conjugação com o corpo do edifício, todas as funções exigíveis de uma parede exterior, embora não suporte nenhum tipo de carga afeta à estrutura do edifício. O preenchimento da grelha é geralmente feito por elementos vítreos (mas também por revestimentos de pedra, painéis metálicos, grelhas, vãos-janela, ou sistemas de ventilação). Existem vários subtipos: construção montante-travessa ou grelha (*stick construction*); modelada em quadro (*unitised construction*); e modulada inserida ou em banda (*spandrel construction*).

A construção montante-travessa ou grelha (*stick construction*) consiste numa estrutura composta por perfis leves, normalmente constituída por montantes verticais estruturais e travessas horizontais entre montantes, resultando numa grelha. Esta grelha suporta os painéis de preenchimento pré-fabricados, que podem ser opacos ou translúcidos (Figura C.1), fixos ou móveis. É necessário o controlo de tolerâncias, juntas de dilatação e da selagem do sistema. Esta é uma solução executada *in-situ*, a montagem requer andaimes, é morosa e depende das condições atmosféricas. A fixação pode ser mecânica através de um perfil de aperto, rematado por um perfil de capeamento, o que gera a grelha visível. O vidro pode também ser totalmente visível recorrendo a silicone estrutural (nesta solução, a substituição em obra é mais complexa, muitas vezes recorre-se a um sub-apoio fixo mecanicamente). Os caminhos de cabos elétricos podem ser inseridos nos perfis e cobertos por capas de remate.

A construção modelada em quadro (*unitised construction*) consiste numa estrutura modular pré-fabricada, que abrange a altura de um ou vários pisos e contem todos os elementos da fachada, incluindo os painéis de preenchimento. Normalmente possui a altura do piso e é pré-montada em fábrica. Em obra, pode ser montada a partir do interior tornando desnecessário o uso de andaimes. A construção modulada inserida ou em banda (*spandrel construction*) é também uma estrutura modular

pré-fabricada, abrangendo a altura do piso, que se distingue pelo modo de montagem e fixação. Estes sistemas de fachada cortina pré-fabricados são ideais para o manuseamento dos módulos em ambiente de fábrica, permitindo assegurar de forma facilitada a selagem e a disposição do caminho de cabos.

Os sistemas solares ativos são normalmente integrados nas zonas opacas, como parapeitos e padieiras, ou desempenhando a função de sombreamento e filtragem de luz nas zonas envidraçadas (não opacas). O tipo de vidro utilizado nos SSA é adaptado às funções a desempenhar no edifício (vidros de segurança, de baixa emissividade, entre outros). Os módulos podem ser integrados em vidros simples (laminados), duplos ou triplos, podem também ser inseridos numa caixa de sombra que deve ser drenada, ventilada e pressurizada. Deve ser estudada a hipótese de sombreamento dos módulos pelo perfil de capeamento.

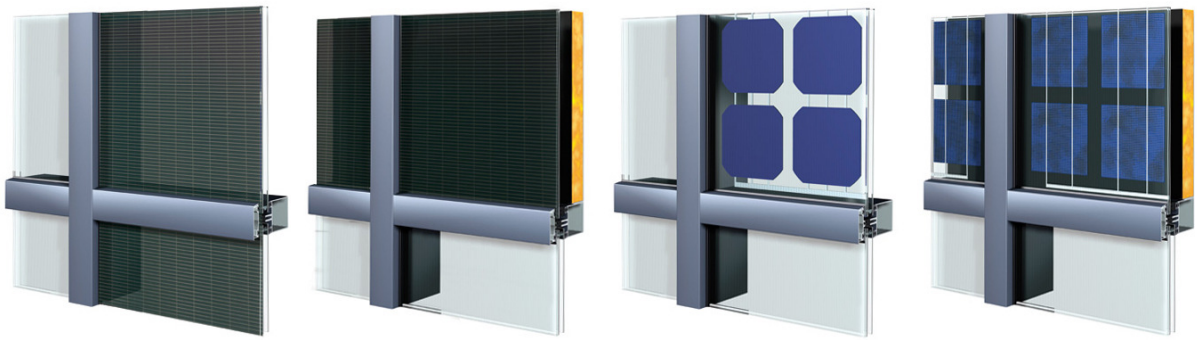


Figura C.1 - Módulos fotovoltaicos inseridos em fachada cortina montante-travessa, da esquerda para a direita: filme fino translúcido, filme fino (revestimento opaco); células cristalinas afastadas entre si permitindo a passagem de luz; e células cristalinas (revestimento opaco)

Numa fachada cortina a ventilação dos módulos fotovoltaicos não é tão eficaz como numa fachada ventilada, ou numa fachada dupla de vidro. Termicamente trata-se de uma fachada quente e o controlo dos ganhos solares e o conforto térmico são mais difíceis de atingir. Existem vários estudos para determinar o balanço energético dos SSA integrados em fachadas cortinas, sobretudo de sistemas fotovoltaicos semitransparentes (células cristalinas espaçadas entre si ou células de sicílico amorfo translucidas e/ou espaçadas entre si). Neste tipo de aplicação, os SSA influenciam diretamente o balanço energético em termos das necessidades de aquecimento e arrefecimento e da iluminação natural. Contudo, este tipo de envidraçados possui um desempenho vantajoso comparado com vidros duplos correntes e com vidros com desempenho melhorado (como vidros de baixa emissividade). No campo dos sistemas solares térmicos, existem soluções, como o sistema Robisun, que podem configurar soluções deste tipo, assim como outras em desenvolvimento que integram tubos de vácuo.

FACHADA ENVIDRAÇADA DE PANO DUPLO

A fachada envidraçada de pano duplo consiste numa fachada composta por dois panos separados por um espaço de ar não aquecido de dimensão significativa. Esta configuração aplica-se em fachadas orientadas a sul ou onde a radiação solar tenha impacto, tendo surgido de forma a melhorar termicamente e energeticamente as condições ambiente e as flutuações climáticas de fachadas envidraçadas ao longo do ano. Entre o pano interior (que possui mais requisitos de desempenho) e o pano exterior, o espaço de ar pode ser ventilado. O controlo do fluxo de ar pode ser natural, mecânico

ou híbrido, e é utilizado para moderar as cargas térmicas. Normalmente a admissão do ar é efetuada na zona inferior da fachada e a exaustão pelo topo, sendo o calor acumulado no espaço de ar utilizado de forma ativa. No inverno o espaço de ar é aquecido através dos ganhos solares, contribuindo positivamente para o isolamento térmico da fachada. No verão, através do arrefecimento noturno é possível reduzir a utilização diurna de sistemas mecânicos de arrefecimento.

Numa fachada com ventilação natural o movimento do ar depende das diferenças de pressão originadas pelo vento e pelo efeito chaminé causado pela flutuação térmica dentro do espaço de ar. O controlo da ventilação natural depende das condições da fronteira do sistema e limita-se aos registos nos panos de fachada. Nesta situação, o ar seria admitido e dissipado pela fachada no verão, e no inverno os registos estariam fechados, reduzindo a transmissão térmica da fachada. Numa fachada com ventilação mecânica, o ar é libertado no verão, e no inverno aproveitado, tirando partido do facto de se encontrar pré-aquecido, sendo depois encaminhado para um unidade de tratamento de ar onde seria posteriormente aquecido e libertado no ambiente interior.

Esta configuração de fachada permite a abertura de janelas no pano interior em condições climáticas desfavoráveis (como chuva incidente ou vento forte, devido à existência do pano exterior) e continuar a ter um desempenho favorável a determinados níveis, tal como a nível acústico.

O pano exterior permite alguma liberdade em termos formais, os envidraçados ou os SSA, podem ser fixos linearmente ou pontualmente, recorrendo a selagens entre vidros (o que promove uma imagem exterior vítrea) ou a junta aberta (não sendo neste caso o pano exterior estanque ao ar). Normalmente este pano é de vidro simples, sendo ideal para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Os módulos podem contribuir adicionalmente com funções de sombreamento e a sua utilização também reduz o risco de condensação no pano exterior. O espaço de ar que se segue ao pano exterior pode ser subdividido horizontal e verticalmente, podendo inclusivamente contemplar acessos para manutenção por piso e incorporar elementos diversos, tais como dispositivos de sombreamento (utilização que também é compatível com os SSA).

MANUTENÇÃO

No processo de projeto é necessário considerar a acessibilidade às fixações, e às partes complementares, tais como cabos ou tubagens. Em muitas situações os SSA são desmontados pelo exterior e o acesso às partes complementares é efetuado através da desmontagem de um ou mais módulos/coletores. No caso das fachadas ventiladas, parte das cablagens podem estar inseridas nas fixações/suportes. No caso das fachadas cortina, se os módulos estiverem integrados como elementos de preenchimento, é necessário desmontar o perfil de pressão e/ou fixações mecânicas, parafusos e vedações para libertar o módulo. Estes processos implicam a remoção temporária da proteção da fachada, com maior impacte quando o sistema solar ativo desempenha todas as funções da envolvente.

A sujidade pode alterar o grau de eficiência, a periodicidade de limpeza é semelhante à de fachadas envidraçadas correntes. Nesse sentido, depende das condições locais, pois a chuva desempenha um papel importante na definição do plano de limpeza. Salienta-se que a limpeza, manutenção e substituição das fachadas ventiladas e das fachadas cortina ocorre normalmente pelo exterior. Edifícios altos que possuam plataformas de manutenção e limpeza, podem recorrer a estes dispositivos para a substituição dos módulos/coletores, contudo, a dimensão e o peso destes podem ser limitadores Para elementos de grandes dimensões são necessários equipamentos de elevação e manuseamento específicos. Em algumas situações o acesso pode ser facilitado pelo desenho da envolvente através de elementos arquitetónicos que garantam a acessibilidade.

ELEMENTOS EXTERIORES À ENVOLVENTE

Relativamente aos sistemas exteriores à envolvente (que na sua essência conformam situações particulares de fachada ou cobertura) as aplicações mais comuns são:

- Sombreamento/proteção solar;
- Guarda-corpos.

Nos sistemas solares ativos exteriores à envolvente os requisitos de integração podem ser mais facilmente atingidos. Nestas aplicações, os sistemas são claramente multifuncionais, no entanto, não possuem uma relação direta com a totalidade dos requisitos da envolvente.

Os sistemas de sombreamento ou proteção solar podem ser fixos ou móveis (inclusivamente com seguimento solar), e materializam-se através de uma diversidade de opções arquitetónicas, tais como palas, *brise-soleil*, pérgulas, persianas, lâminas, entre outras. Estes elementos podem ser totalmente opacos, translúcidos e/ou parcialmente permeáveis à luz. No caso da utilização de SSA como dispositivos de sombreamento, concilia-se a produção de energia com a proteção solar, evitando o sobreaquecimento e o encadeamento. Os sistemas de sombreamento podem ser previstos com uma inclinação que favoreça a proteção solar e a produção de energia, otimizando as duas funções. No entanto, deve-se balançar a situação de inverno, uma vez que os sistemas poderão evitar ganhos solares diretos. A geometria solar é fundamental para a conceção e dimensionamento dos sistemas nesta questão, assim como para evitar o sombreamento pelo próprio sistema. No caso dos sistemas fotovoltaicos, a utilização como dispositivos de sombreamento, dependendo da solução adotada, tem como vantagem adicional permitir a ventilação dos sistemas. A operabilidade dos sistemas móveis pode ser elétrica, termo-hidráulica autorregulável com a energia solar, ou manual. As coberturas de vidro estão frequentemente equipadas com dispositivos de proteção solar, que evitam o sobreaquecimento ou o ofuscamento dos espaços que cobrem. Neste caso, é possível usar elementos fotovoltaicos para proporcionar sombra e evitar o encandeamento. Os telhados translúcidos sobre as áreas não aquecidas (escadas, átrios, etc.) e sobre espaços abertos (plataformas de caminhos-de-ferro, garagens, etc.) são particularmente adequados, uma vez que a eficiência dos módulos é maior em ambientes ventilados.

Na utilização como guarda-corpos, em terraços, varandas ou vãos, os sistemas podem ter diversas configurações e, tal como na aplicação anterior, serem opacos ou translúcidos, neste último caso com a possibilidade de apresentar variações em termos de percentagem de permeabilidade à luz (através de diferentes modos, consoante o tipo de sistema).

Nas aplicações exteriores à envolvente, os SSA são fixos à estrutura ou a elementos de revestimento (consoante as características de cada sistema). As fixações podem ser lineares e/ou pontuais, e devem garantir estabilidade, proteção à corrosão, facilidade de montagem, e relações coerentes de aspeto e modularidade com restante edifício. Aspetos importantes a considerar são a ação do vento, a durabilidade e o acesso para limpeza e manutenção dos sistemas e das partes complementares.