

**Desenvolvimento e aplicação do conceito nZEB em construções de habitação modular**

**ColdKit Ibérica Materiais Isolantes, S.A.**

*Rui Miguel Magalhães Fonseca*

**Dissertação do MIEM**

Orientador na ColdKit Ibérica Materiais Isolantes, Lda: Engenheiro Alberto Montenegro

Orientador na FEUP: Prof. José Luís Alexandre



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Junho 2014

*“You must be the change you want to see in the world”*

*Mahatma Gandhi*

## Resumo

A elevada taxa de urbanização dos países latino-americanos apresenta-se como uma oportunidade de negócio para a Purever Group, que através do desenvolvimento de habitações modulares, consegue dar uma resposta eficaz à procura de soluções rápidas para o problema da construção de habitações relativamente pequenas.

Tendo em conta a conjuntura socioeconómica atual, em que os edifícios são responsáveis por um terço do consumo energético mundial, a eficiência energética e os impactos ambientais são temas de crescente importância e que a empresa tenciona não descurar.

Neste contexto, surge o presente estudo que visa avaliar três impactos da aplicação deste tipo de soluções: conhecimento técnico, oportunidade de investimento e avaliação ambiental. Para tal foram consideradas, como base de comparação, seis cidades, três capitais sul-americanas e três cidades portuguesas.

Na primeira avaliação, correspondente ao conhecimento técnico, determinou-se os climas a que o edifício modular está adaptado, ou seja, em quais é que tem um bom comportamento térmico. Além disso, analisaram-se as alterações que podem ser realizadas para o tornar mais eficiente energeticamente, ao ponto de se obter um *Zero Energy Building*.

Na segunda análise, a empresarial, comparou-se o edifício efetivamente produzido pela empresa ao edifício típico português e latino-americano em diferentes climas, tendo em conta os materiais, o modo de construção e o comportamento térmico, seguido de uma análise SWOT da aplicação do edifício a cada clima.

Por último, realizou-se uma análise à possibilidade de certificar energeticamente o edifício através do sistema de classificação internacional LEED, uma vez que é o instrumento de avaliação ambiental dos edifícios mais amplamente reconhecido a nível mundial e passível de aplicação com impacto positivo na América Latina.

Após estas etapas, determinou-se em quais mercados a empresa deve explorar e em quais terá mais possibilidade para atingir um edifício eficiente ou mesmo um *Zero Energy Building*. Concluiu-se que o investimento deve ser dirigido para o mercado latino-americano, não só pelas oportunidades supracitadas, como também pelo comportamento térmico superior do edifício modular relativamente às construções típicas desta região. Além disso, em climas quentes, como Caracas, o edifício com pequenas alterações pode atingir a designação ZEB. Por último, no mercado português, o edifício modular não tem hipótese de competir com o atual modelo de construção.

Em suma, o investimento deverá ser dirigido principalmente para os países latino-americanos, com especial atenção em climas quentes, devido à adaptabilidade dos edifícios modulares a estes.

## Development and application of the nZEB concept on a modular dwelling

### Abstract

The high rate of urbanization of Latin American countries presents itself as a business opportunity to the Purever Group, which can provide an efficient response to the existing demand for rapid construction, through the development of its modular dwellings.

Given the current socio-economic situation, buildings are responsible for one third of global energy consumption and, therefore, subjects as energy efficiency and environmental impacts of buildings have become extremely important and discussed worldwide. The company intends not to overlook this subjects regarding its modular houses.

Concerning this context, this study features three different evaluations of the company's product: technical knowledge, investments potential and environmental impacts. In order to achieve this, six cities were considered which represented different climates: three South American capitals and three Portuguese cities.

On the first evaluation, technical knowledge, it was determined how the thermal behaviour of the modular building was influenced by different climates and what changes could be made on it in order to become more efficient and achieve a Zero Energy Building classification.

On the second analysis, regarding the economics of the company, the modular building was compared to the typical Portuguese and Latin-American buildings. It was taken into account the materials, the method of construction and the thermal behaviour of the different dwellings. A SWOT analysis was also performed to analyse the exporting potential of the modular house to the different cities.

Finally, it was determined the possibility of getting an energy certification through the application of the LEED international rating system. It is the most widely recognized instrument of environmental assessment and could enforce a positive impact to the company's product, particularly, at Latin America.

After these analysis, it was concluded which markets the company should explore and whose have more possibility to achieve an efficient building. It was concluded that the investment should be directed to the Hispanic market, not only due to the aforementioned opportunities, but also because of the better thermal behaviour of the modular dwelling compared to the typical construction of this region. Moreover, on hot climates, such as Caracas, through minor changes, the building could achieve a ZEB designation. Finally, on the Portuguese market, the modular building has no chance of competing with the current traditional building.

In one word, the investment should be directed primarily to Latin American countries, with special attention to hot climates, due to the adaptability of modular buildings on these kind of climates.

## **Agradecimentos**

Agradeço ao Prof. José Luís Alexandre não só pela orientação e acompanhamento do presente trabalho, como também pela contínua transmissão de conhecimentos ao longo deste semestre.

Agradeço ao Eng.º Alberto Montenegro pela oportunidade que dispus de trabalhar diretamente num ambiente empresarial e pelas informações facultadas indispensáveis à realização deste estudo.

Aos meus pais por todo o apoio e sacrifícios para que pudesse atingir todos os meus objetivos. Aos meus amigos pelo companheirismo e amizade desenvolvida ao longo destes anos. Aos meus colegas de faculdade e professores pelo aguçar do pensamento crítico e pela partilha de ideias e conhecimento.

Por último, agradeço a todos, de uma forma geral, que me acompanharam direta e indiretamente ao longo deste fantástico percurso.

## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	A empresa: Purever Group .....	1
1.2	Caso de estudo: Edifício Modular .....	2
1.3	Enquadramento e objetivos do projeto .....	2
1.4	Organização e Temas Abordados .....	3
2	Rumo à construção sustentável – <i>Zero Energy Building</i> .....	5
2.1	Perspetiva histórica de um <i>Zero Energy Building</i> .....	5
2.2	Definição <i>Zero Energy Building</i> .....	8
2.3	Propostas para atingir <i>Zero Energy Building</i> – Tecnologias e Soluções .....	14
2.3.1	Redução dos consumos energéticos .....	15
2.3.2	Fontes de energias renováveis disponíveis on-site .....	16
2.3.3	Fontes de energias renováveis disponíveis off-site.....	18
2.4	Conclusão.....	19
3	Clima e conforto térmico .....	21
3.1	Clima.....	21
3.2	Conforto térmico .....	26
3.3	Conclusão.....	29
4	Caso de estudo: Edifício modular .....	31
4.1	Materiais.....	31
4.1.1	Edifício Modular .....	31
4.1.2	Edifício Português .....	33
4.1.3	Edifício Latino-Americano.....	35
4.2	Modo de construção .....	36
4.2.1	Edifício Modular .....	36
4.2.2	Edifício Português .....	37
4.2.3	Edifício Latino-Americano.....	37
4.3	Comportamento térmico.....	38
4.3.1	Caso I – Simulação do edifício sem ventilação .....	39
4.3.2	Caso II – Simulação do edifício com ventilação mecânica.....	43
4.3.3	Caso III - Simulação do edifício com ventilação natural.....	46
4.4	Conclusão.....	50
5	Discussão dos resultados obtidos.....	51
5.1	Análise do comportamento do edifício modular nos diferentes climas .....	51
5.2	Análise do edifício modular comparativamente ao edifício típico local.....	55
5.2.1	Bogotá.....	55
5.2.2	Caracas .....	56
5.2.3	Lima .....	58
5.2.4	Porto.....	59
5.2.5	Coimbra.....	61
5.2.6	Lisboa.....	62
5.3	Conclusão.....	64

6	Do edifício modular a um <i>Zero Energy Building</i> .....	65
6.1	Análise do edifício modular .....	66
6.2	Bogotá.....	67
6.2.1	Passive Design .....	67
6.2.2	Sistemas solares.....	67
6.2.3	Análise SWOT .....	68
6.3	Caracas .....	70
6.3.1	Passive Design .....	70
6.3.2	Sistemas solares.....	70
6.3.3	Análise SWOT .....	71
6.4	Lima .....	73
6.4.1	Passive Design .....	73
6.4.2	Sistemas solares.....	73
6.4.3	Análise SWOT .....	74
6.5	Porto, Coimbra e Lisboa.....	76
6.5.1	Passive Design .....	76
6.5.2	Sistemas solares.....	76
6.5.3	Análise SWOT .....	79
6.6	Conclusão.....	81
7	Análise Regulamentar.....	83
7.1	LEED .....	83
7.2	Conclusão.....	93
8	Conclusão .....	95
9	Bibliografia .....	97
	ANEXO A: Classificação do clima mundial .....	103
	ANEXO B: <i>Design</i> Passivo .....	107
	ANEXO C: Energia solar .....	121
	Coletores solares.....	121
	Tecnologia.....	121
	Aplicações.....	122
	Painéis fotovoltaicos.....	129
	Tecnologia.....	129
	Aplicações.....	130
	Painéis solares híbridos .....	132
	ANEXO D: Conforto Térmico .....	133
	Abordagem por balanço térmico.....	133
	Abordagem adaptativa.....	134
	Comparação das diferentes abordagens .....	136
	A importância da humidade relativa no conforto térmico.....	138
	ANEXO E: Módulo Sandwich de Poliuretano .....	139
	Estudo de introdução de PCM's num módulo sandwich de PUR:.....	141
	ANEXO F: Comparação entre <i>software</i> de simulação dinâmica de edifícios .....	143
	EnergyPlus.....	143
	TRNSYS 16.....	144

ANEXO G: Parâmetros da simulação .....	147
Simulação do comportamento térmico dos edifícios .....	147
Ganhos internos.....	147
Horários de utilização.....	148
Simulação de um sistema de AQS .....	149
ANEXO H: Cálculo da quantidade de ar insuflado no edifício modular no caso II e III .....	151
Bogotá .....	151
Caracas .....	152
Lima .....	153
Porto, Coimbra e Lisboa .....	153
ANEXO I: Ferramentas de avaliação e certificação da sustentabilidade de um edifício.....	155
LEED ( <i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> ) .....	155
BREEAM .....	158
SB Tool ( <i>Sustainable Building Tool</i> ).....	159
LiderA .....	160
SCE (Sistema de Certificação Energética).....	162
ANEXO J: Análise do Ciclo de Vida ( <i>Life Cycle Assessment</i> ) .....	165

## Lista de Figuras

Figura 1 - Planta do edifício modular em estudo .....	4
Figura 2 – Distribuição percentual de cada setor no consumo total de energia, 2011 [6].....	6
Figura 3 - Consumo de energia primária e consumo total de energia por setor, 2011 [6] .....	6
Figura 4 – Distribuição percentual de cada setor no consumo energético na União Europeia, 2009 [7] 7	
Figura 5 - Distribuição percentual de cada setor no consumo energético em Portugal, 2011 [8] .....	7
Figura 6 - Frequência de projetos ZEBs por clima [9].....	7
Figura 7 - Balanço energético para um <i>Zero Energy Building</i> [12].....	9
Figura 8 - Representação gráfica dos três tipos de balanço[12].....	13
Figura 9 - Representação gráfica do conceito " <i>Zero Energy Building</i> " [12].....	15
Figura 10 - Mapa-múndi da irradiação global horizontal [22].....	17
Figura 11 - Resumo das variáveis de projeto e a sua influência a nível energético [27] .....	20
Figura 12 - Diferentes soluções aplicadas em Net ZEBs[9] .....	20
Figura 13 - Tecnologias aplicadas a diferentes tipologias de edifícios [9] .....	20
Figura 14 - Localização das três cidades tropicais [29] .....	21
Figura 15 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Bogotá.....	22
Figura 16 – Rosa-dos-ventos de Bogotá .....	22
Figura 17 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Caracas .....	23
Figura 18 - Rosa-dos-ventos de Caracas .....	23
Figura 19 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Lima.....	24
Figura 20 – Rosa-dos-ventos de Lima.....	24
Figura 21 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos do Porto .....	24
Figura 22 – Rosa-dos-ventos do Porto .....	24
Figura 23 -Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Coimbra .....	25
Figura 24 – Rosa-dos-ventos de Coimbra .....	25
Figura 25 -Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Lisboa .....	25
Figura 26 – Rosa-dos-ventos de Lisboa .....	25
Figura 27 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Bogotá .....	26
Figura 28 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Caracas .....	27
Figura 29 -Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Lima.....	27
Figura 30 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo no Porto .....	28
Figura 31 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Coimbra .....	28
Figura 32 -Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Lisboa .....	28
Figura 33 - Instalação da casa modular.....	31
Figura 34 - Painel de solo.....	32
Figura 35 - Parede em alvenaria dupla de tijolo vazado[36].....	33
Figura 36 - Assentamentos informais na América Latina [39] .....	35
Figura 37 - Sistema de encaixe macho-fêmea dos módulos .....	37
Figura 38 - Construção da habitação através do Google SketchUp.....	39
Figura 39 - Necessidades de aquecimento de cada edifício .....	39
Figura 40 - Necessidades de arrefecimento de cada edifício .....	40
Figura 41 - Perdas energéticas através da envolvente em cada edifício.....	40
Figura 42 - Perdas energéticas através de infiltrações em cada edifício .....	40
Figura 43 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício modular .....	41
Figura 44 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício português.....	41
Figura 45 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício latino-americano.....	41
Figura 46 - Variação da temperatura em cada edifício durante uma semana no Porto .....	43

Figura 47 - Variação da temperatura em cada edifício durante uma semana em Caracas .....	43
Figura 48 - Taxas de ventilação mecânica adotadas no caso II.....	44
Figura 49 - Necessidades de aquecimento de cada edifício .....	44
Figura 50 - Necessidades de arrefecimento de cada edifício .....	44
Figura 51 - Perdas energéticas através da envolvente em cada edifício.....	45
Figura 52 - Perdas energéticas através de infiltrações em cada edifício .....	45
Figura 53 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício modular .....	46
Figura 54 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício português.....	46
Figura 55 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício latino-americano.....	46
Figura 56 - Abertura das janelas necessárias à simulação da ventilação natural .....	47
Figura 57 - Necessidades de aquecimento de cada edifício .....	48
Figura 58- Necessidades de arrefecimento de cada edifício .....	48
Figura 59 - Perdas energéticas através da envolvente em cada edifício.....	48
Figura 60 - Perdas energéticas através de infiltrações em cada edifício .....	49
Figura 61 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício modular .....	49
Figura 62 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício português.....	49
Figura 63 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício latino-americano.....	49
Figura 64 – Necessidades de aquecimento do edifício modular em cada caso .....	51
Figura 65 - Taxas de ventilação média anual nos diferentes casos .....	52
Figura 66 - Ar insuflado por semana no edifício modular em Bogotá.....	52
Figura 67 - Necessidades de arrefecimento do edifício modular em cada caso .....	53
Figura 68 - Perdas através da envolvente.....	53
Figura 69 - Perdas por infiltração.....	54
Figura 70 - Classificação obtida segundo a norma EN15251 no caso II comparativamente ao caso I.	54
Figura 71 - Classificação obtida segundo a norma EN15251 no caso III comparativamente ao caso I	54
Figura 72 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e latino-americano em Bogotá.....	55
Figura 73 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e latino-americano em Bogotá .....	56
Figura 74 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao latino-americano segundo a norma EN15251 para Bogotá.....	56
Figura 75 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e latino-americano em Caracas .....	57
Figura 76 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e latino-americano em Caracas .....	57
Figura 77 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao latino-americano segundo a norma EN15251 para Caracas.....	58
Figura 78 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e latino-americano em Lima .....	58
Figura 79 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e latino-americano em Lima.	59
Figura 80 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao latino-americano segundo a norma EN15251 para Lima .....	59
Figura 81 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português no Porto...	60
Figura 82 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português no Porto...	60
Figura 83 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao português segundo a norma EN15251 para Porto.....	60
Figura 84 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português em Coimbra .....	61

Figura 85 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e português em Coimbra .....	61
Figura 86 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao português segundo a norma EN15251 para Coimbra.....	62
Figura 87 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português em Lisboa	62
Figura 88 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e português em Lisboa.....	63
Figura 89 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao português segundo a norma EN15251 para Lisboa.....	63
Figura 90 - Ventilação natural cruzada no edifício modular .....	66
Figura 91 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Bogotá.....	68
Figura 92 - Comportamento de um coletor solar em Bogotá .....	68
Figura 93 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Caracas.....	71
Figura 94 - Comportamento de um coletor solar em Caracas .....	71
Figura 95 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Lima.....	73
Figura 96 - Comportamento de um coletor solar em Lima .....	74
Figura 97 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal no Porto .....	77
Figura 98 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Coimbra .....	77
Figura 99 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Lisboa .....	78
Figura 100 - Comportamento de um coletor solar no Porto.....	78
Figura 101 - Comportamento de um coletor solar em Coimbra.....	78
Figura 102 -Comportamento de um coletor solar em Lisboa.....	79
Figura 103 - Certificado LEED para o edifício modular.....	84
Figura 104 – Mapa-múndi com a classificação climática de Wladimir Köppen[29].....	105
Figura 105 - Consumo energético de um edifício com três orientações diferentes [46].....	107
Figura 106 - Efeito do tipo de sombreamento na radiação incidente numa janela[16].....	109
Figura 107 - Aumento da temperatura de conforto através do aumento da velocidade do ar [50] .....	110
Figura 108 - Influência das aberturas do edifício na ventilação natural induzida pelo vento [48].....	110
Figura 109 - Efeito do tamanho das aberturas na velocidade do ar [48].....	111
Figura 110 - Modelos da chaminé solar [16] .....	111
Figura 111 - Parede Solar [52].....	112
Figura 112 - Chaminé solar integrada no telhado [53].....	112
Figura 113 - Possíveis configurações da chaminé solar para maximização da ventilação natural [54] .....	112
Figura 114 – Sistema evaporativo direto[56].....	114
Figura 115 – Sistema evaporativo de duas fases[56] .....	114
Figura 116 – Conceito <i>Skytherm</i> na época de arrefecimento[57].....	115
Figura 117- Conceito <i>Skytherm</i> na época de aquecimento[57] .....	115
Figura 118 – Sistema de arrefecimento evaporativo indireto [16].....	115
Figura 119 - Princípio básico de funcionamento de sistemas ar-terra abertos [58] .....	116
Figura 120 - Configurações possíveis de um circuito fechado [58].....	116
Figura 121 - Funcionamento de uma bomba de calor [60] .....	117
Figura 122 - Esquemas das diferentes classificações dos sistemas com bomba de calor [60].....	117
Figura 123 - Diferentes camadas de um <i>Green Roof</i> extensivo [62] .....	118
Figura 124 - Comparação das trocas energéticas em diferentes tipos de coberturas[62].....	118
Figura 125 - Tubos de luz [64].....	120
Figura 126 - Sistemas de termossifão [20].....	122
Figura 127 - Sistemas de circulação direta [20].....	123
Figura 128 - Sistemas de aquecimento indireto [20].....	124
Figura 129 - Sistemas a ar [20] .....	124

Figura 130 - Sistema a água de aquecimento do edifício e AQS [20] .....	125
Figura 131 - Sistema a ar de aquecimento do edifício e AQS[20].....	125
Figura 132 - Funcionamento de um ciclo de arrefecimento termomecânico [23] .....	126
Figura 133 - Esquema de um sistema de sorção[23].....	127
Figura 134 – Sistema de arrefecimento através de um dessecante líquido [23].....	128
Figura 135 – Sistema de arrefecimento através de um dessecante sólido [23] .....	128
Figura 136 - Esquema da instalação [23] .....	131
Figura 137 - Modelo PMV-PPD .....	134
Figura 138 – ASHRAE[50].....	134
Figura 139 - ISO 7730[71] .....	134
Figura 140 - Mecanismo do método adaptativo [70] .....	135
Figura 141 – Modelo adaptativo da norma 55 da ASHRAE[50] .....	135
Figura 142 - EN 15251[32] .....	135
Figura 143 – Temperaturas de conforto térmico em edifícios naturalmente ventilados como previsto pelo modelo PMV-PPD e os resultados obtidos em inquéritos[74].....	137
Figura 144 -Influência da humidade relativa na perceção da temperatura.....	138
Figura 145 - Produção em contínuo dos painéis sanduiche de PUR[76] .....	139
Figura 146 - Módulo PUR com a introdução de PCMs .....	141
Figura 147 - Elementos internos do EnergyPlus [80, 81] .....	144
Figura 148 – Simulation Studio do TRNSYS[82].....	145
Figura 149 – TRNBuild[82].....	145
Figura 150 - Utilização diária da sala/cozinha .....	148
Figura 151 - Utilização diária do quarto .....	149
Figura 152 - Utilização diária do quarto de casal.....	149
Figura 153 - Simulação de um sistema de AQS através do TRNSYS .....	150
Figura 154 - Perfil do consumo diário de AQS.....	150
Figura 155 - Ar insuflado no edifício modular em Bogotá por semana.....	151
Figura 156 - Ar insuflado no edifício modular em Caracas por semana.....	152
Figura 157 - Ar insuflado no edifício modular em Lima por semana .....	153
Figura 158 - Ar insuflado no edifício modular no Porto por semana.....	154
Figura 159 - Ar insuflado no edifício modular em Coimbra por semana .....	154
Figura 160 - Ar insuflado no edifício modular em Lisboa por semana.....	154
Figura 161 - Organização dos critérios da certificação LiderA [86].....	160
Figura 162 - Modelo do Certificado Energético[89].....	163
Figura 163 - Análise do ciclo de energia [91].....	166

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Os aspetos principais no projeto de um ZEB[1] .....	5
Tabela 2 - Vantagens de cada definição ZEB [14].....	11
Tabela 3 - Desvantagens de cada definição ZEB [14] .....	12
Tabela 4 - Hierarquia de fornecimento de energia proveniente de fontes renováveis a um Zero Energy Building[14] .....	14
Tabela 5 - Temperaturas de conforto para cada local .....	29
Tabela 6 - Descrição da categorização de edifícios presente na norma EN 15251[32] .....	29
Tabela 7 - Temperaturas de conforto para cada categoria da norma EN 15251 .....	30
Tabela 8 - Caracterização dos elementos da envolvente do edifício modular .....	32
Tabela 9 - Envolvente opaca de um edifício típico português[33, 36].....	34
Tabela 10 - Envolvente opaca de um edifício típico latino-americano [33] .....	36
Tabela 11 - Análise SWOT ao edifício modular em Bogotá .....	69
Tabela 12 - Análise SWOT ao edifício modular em Caracas .....	72
Tabela 13 - Análise SWOT ao edifício modular em Lima.....	75
Tabela 14 - Análise SWOT ao edifício modular no Porto, Coimbra e Lisboa.....	80
Tabela 15 - Recomendações específicas para obter um <i>Zero Energy Building</i> em diferentes climas ..	82
Tabela 16 - Critérios "Locais Sustentáveis" da certificação LEED .....	85
Tabela 17 - Critérios "Energia e Atmosfera" da certificação LEED.....	87
Tabela 18 - Critérios "Materiais e Recursos" da certificação LEED .....	88
Tabela 19 - Critérios "Qualidade do Ar Interior" da certificação LEED .....	89
Tabela 20 - Critérios "Eficiência na utilização da água" da certificação LEED .....	91
Tabela 21 - Critérios "Inovação e Processos de Design" da certificação LEED.....	92
Tabela 22 - Critérios "Créditos de Prioridade Regional" da certificação LEED.....	92
Tabela 23 – Primeiro e segundo nível de classificação do clima mundial[29] .....	103
Tabela 24 – Terceiro nível de classificação do clima mundial[29].....	104
Tabela 25 - Propriedades do painel sanduiche de PUR [75, 76].....	140
Tabela 26 - Ganhos internos devido à iluminação e às pessoas .....	147
Tabela 27 - Ganhos internos devido aos equipamentos .....	148
Tabela 28 – Categoria LEED: Inovação e processos de design .....	155
Tabela 29 – Categoria LEED: Locais sustentáveis .....	156
Tabela 30 - Categoria LEED: Eficiência na utilização da água .....	156
Tabela 31 - Categoria LEED: Créditos de prioridade regional .....	157
Tabela 32 - Categoria LEED: Energia e Atmosfera.....	157
Tabela 33 - Categoria LEED: Materiais e Recursos .....	157
Tabela 34 - Categoria LEED: Qualidade do Ar Interior .....	158
Tabela 35 - Critérios da certificação LiderA [86] .....	160
Tabela 36 - Classe Energética segundo a legislação portuguesa[88] .....	162
Tabela 37 - Fontes de informação para as diferentes fases do ciclo de vida [91] .....	165

## Nomenclatura

### Acrónimos:

<b>AQS</b>	Águas Quentes Sanitárias
<b>ASHRAE</b>	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
<b>BREEAM</b>	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
<b>COMIS</b>	Conjunction of Multi-zone Infiltration Specialists
<b>COP</b>	Coefficient of Performance
<b>COV</b>	Compostos Orgânicos Voláteis
<b>DOE</b>	Department of Energy
<b>EPW</b>	Energy Plus Weather
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>LEED</b>	Leadership in Energy & Environmental Design
<b>HDPE</b>	High-Density Polyethylene
<b>PMV</b>	Predicted Mean Vote
<b>PPD</b>	Predicted Percentage Dissatisfied
<b>SB TOOL</b>	Sustainable Building Tool
<b>SCE</b>	Sistema de Certificação Energética
<b>SET</b>	Standard Effective Temperature
<b>SWOT</b>	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
<b>TRNSYS</b>	Transient System Simulation Tool
<b>ZEB</b>	Zero Energy Building

### Caracteres gregos:

$\alpha$	Constante de ponderação
$\theta_0$	Temperatura operativa de conforto da EN 15251
$\theta_{rm}$	Temperatura média diária ponderada
$\theta_{rm-1}$	Temperatura média diária ponderada referente ao dia anterior
$\theta_{ed-1}$	Temperatura média diária referente ao dia anterior
$\eta_{sol-arref}^{ideal}$	Rendimento ideal da transformação da energia solar em arrefecimento
$\eta_{sol-trab.}^{ideal}$	Rendimento ideal da transformação da energia solar em trabalho
$\eta_{trab.-arref}^{ideal}$	Rendimento ideal da transformação de trabalho em arrefecimento

**Caracteres romanos:**

$I_{\beta}$	Radiação incidente no coletor
$Q_a$	Calor rejeitado para o ambiente pelo processo de sorção
$Q_c$	Calor rejeitado para o ambiente pelo condensador
$Q_e$	Calor removido da fonte fria pelo evaporador
$Q_g$	Calor proveniente da fonte quente (coletor solar)
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$T_{comf}$	Temperatura de conforto ASHRAE 55-2004
$T_{in}$	Temperatura de entrada na água no coletor solar
$T_H$	Temperatura coletor solar
$T_L$	Temperatura da fonte fria
$T_M$	Temperatura ambiente
$T_{média\ mensal}$	Temperatura média mensal
$U$	Coefficiente de Transmissão Térmica

## 1 Introdução

O presente projeto foi realizado em ambiente empresarial e o seu objetivo último consiste na avaliação das possibilidades de transformação de um edifício modular num *Zero Energy Building* em diferentes climas.

Pode-se afirmar que este estudo conjuga três vertentes bastante distintas entre si. Por um lado, a investigação académica inerente, uma vez que a eficiência energética é uma área em voga no meio académico pela necessidade de busca de alternativas, para reduzir os consumos energéticos a nível mundial. Por outro lado, a perspetiva empresarial, já que é um projeto que assume relevância no posicionamento estratégico da empresa, no que toca ao desenvolvimento e à aposta em novos mercados. Por último, a análise ambiental e o impacto de um edifício modular, ou seja, a aplicação de conceitos que visem diminuir a perturbação no meio ambiente. Os três aspetos referenciados permitiram, assim, a aplicação de diversas competências técnicas adquiridas ao longo do plano de estudos do curso em Engenharia Mecânica, que se revelaram cruciais no desenvolvimento de todo o trabalho.

Sendo assim, começar-se-á por apresentar a empresa e o caso de estudo e, em seguida, será descrito o contexto em que se baseia o projeto e, por último, a organização e os temas abordados.

### 1.1 A empresa: Purever Group

A Purever Group é uma *holding*<sup>1</sup> fundada em 2001, estando as suas empresas presentes em seis países (Reino Unido, França, Itália, Espanha, Portugal e Angola) e com presença comercial em mais de 30 países. As suas empresas, nas quais se insere a ColdKit Ibérica Materiais Isolantes Lda, dividem-se em cinco áreas de negócio distintas: Equipamentos para Hotelaria e Restauração, Comércio Alimentar, Isolamento para Indústria Agroalimentar, Salas limpas e Construção Modular.

A empresa pretende explorar novos mercados, complementando a sua atual rede de distribuição. Embora o grupo esteja presente em diversos países, a ambição é de alargar e cimentar a sua presença internacional. O projeto de crescimento sustenta-se no estabelecimento de parcerias com as principais empresas internacionais, na aposta em projetos *turn-key*<sup>2</sup> e na procura de soluções inovadoras, sendo o departamento de investigação e desenvolvimento a chave para o sucesso.

Um dos sectores em que o grupo tem mais experiência é o da construção. As atividades centram-se no fabrico de habitações e edifícios modulares em que a investigação é direcionada na procura da eficiência energética destes, rapidez de construção e facilidade de adaptação dos módulos a diferentes especificações.

Os componentes básicos destes edifícios são painéis do tipo *sandwich* de poliuretano produzidos em unidades industriais pertencentes ao grupo. Estes painéis foram inicialmente

---

<sup>1</sup>*Holding* é uma sociedade criada com o objetivo de administrar um grupo de empresas.

<sup>2</sup>*Turn-key* refere-se a um produto, bem ou serviço que está preparado para uso imediato.

desenvolvidos como isolantes, mas as suas características, principalmente a resistência e durabilidade, permitiram a sua adaptação à construção modular. A modularidade permite, também, o desmembramento deste projeto em diferentes tipos de edifícios, entre os quais escolas, centros de saúde, edifícios de serviços e habitações.

## 1.2 Caso de estudo: Edifício Modular

O edifício modular em estudo é uma habitação do tipo T2, com 43m<sup>2</sup> de área de pavimento, composta por dois quartos, um WC, uma cozinha e sala comum, em que os dois últimos partilham um espaço mútuo. A planta da habitação está representada na Figura 1.

A empresa pretende exportar para o mercado latino-americano direcionado, principalmente, para um setor socioeconómico inferior. Estes edifícios serão comercializados, tendo em conta a sua facilidade de construção e capacidade de adaptação. Contudo, tal como mencionado, a empresa pretende melhorar a eficiência energética dos seus edifícios. É precisamente de encontro a este objetivo que o projeto se baseia.

## 1.3 Enquadramento e objetivos do projeto

Desde a revolução industrial, o crescimento económico de um país esteve associado ao seu consumo de energia relacionando-se, principalmente, com a atividade industrial e transportes. Nos últimos anos, acompanhando o rápido crescimento do setor de serviços e o aumento das exigências de conforto e melhoria de vida das populações, o consumo energético nos edifícios aumentou de forma exponencial.

A utilização eficiente de energia no contexto atual da sociedade é um paradigma que tem adquirido cada vez mais relevância. Devido à forte dependência de recursos energéticos limitados com impactos negativos para o ambiente e aos consumos energéticos excessivos ao longo do ciclo de vida de um edifício, vários países têm promovido estudos e medidas com o objetivo de inverter esta tendência.

Acompanhando a tendência de aumento da eficiência energética, verifica-se que, cada vez mais, as empresas de construção têm a consciência de que é necessário adaptar e alterar a forma como os edifícios são percecionados. Com a evolução das potencialidades associadas ao setor informático, a avaliação do comportamento térmico dos edifícios pode ser realizada através de simulações dinâmicas recorrendo a ferramentas específicas. A utilização destas permite otimizar o comportamento térmico dos edifício e dos seus sistemas ativos.

Perante este contexto, o presente trabalho consiste num estudo exploratório que visa analisar um edifício modular em diferentes climas e comparar com um típico edifício de cada local. Com esta análise pretende-se determinar os climas a que está mais adaptado e quais as

alterações que se devem realizar para o tornar energeticamente mais eficiente. Assim, podem-se considerar os seguintes objetivos primários:

- a. Avaliação das condições de conforto térmico e desempenho energético no clima mediterrânico e climas tropicais;
- b. Identificação e avaliação dos elementos que influenciam de forma direta e indireta as reduções de consumos energéticos em habitações do tipo modular;
- c. Avaliação da possibilidade de se obter um *Zero Energy Building* em cada local;
- d. Determinar as vantagens competitivas da empresa em relação aos edifícios típicos de cada local;
- e. Avaliar a possibilidade de certificação energética do edifício modular.

#### 1.4 Organização e Temas Abordados

Para alcançar os objetivos definidos foi necessário, em primeira instância, selecionar os locais representativos dos climas a estudar. Assim, optou-se por Bogotá, Caracas, Lima para as cidades sul-americanas e Porto, Coimbra e Lisboa para as cidades portuguesas. No caso dos locais da América do Sul, a escolha destes está relacionada com o facto do clima em cada cidade ser completamente distinto, o que proporciona uma base de estudo mais abrangente. No caso das cidades portuguesas, a opção recaiu nas três maiores cidades do país.

Com a finalidade de uma rápida compreensão dos conceitos, o presente relatório foi dividido em diferentes capítulos. Assim, pode-se resumir a estrutura do documento nas seguintes vertentes:

- a. Investigação da perspetiva histórica dos *Zero Energy Building* e das soluções atualmente existentes para se obter um edifício com essas características;
- b. Estudo do clima e dos critérios do conforto das diferentes cidades escolhidas;
- c. Comparação do edifício modular com os edifícios típicos sul-americanos e portuguesas em diferentes vertentes;
- d. Análise do comportamento térmico dos diferentes edifícios e discussão dos resultados obtidos;
- e. Análise da possibilidade de adaptar o edifício modular em estudo num *Zero Energy Building* nos diferentes climas;
- f. Avaliação dos impactos ambientais do edifício através de um estudo acerca da possibilidade de submeter o edifício a uma classificação energética internacional;
- g. Sumário do conteúdo do projeto, dos resultados obtidos e das principais conclusões atingidas.

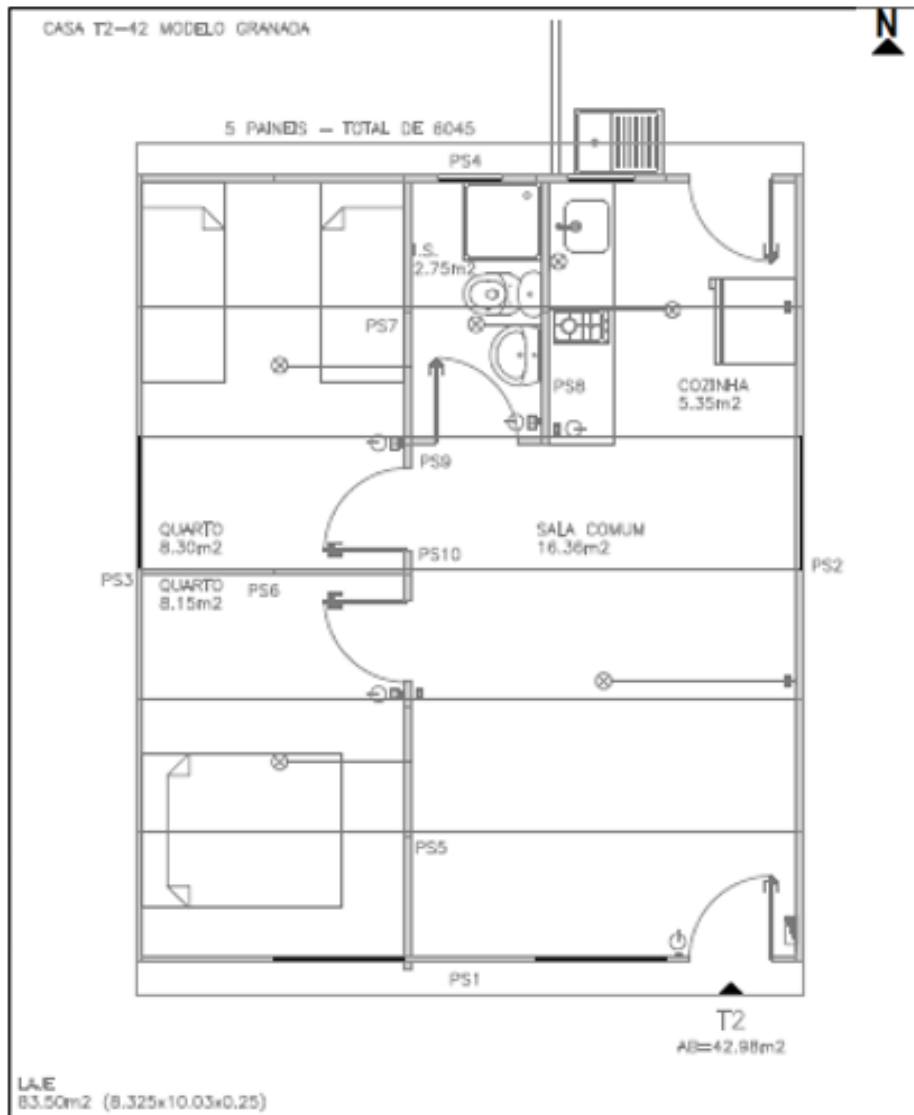


Figura 1 - Planta do edifício modular em estudo

## 2 Rumo à construção sustentável – *Zero Energy Building*

O projeto de obtenção de um *Zero Energy Building* é complexo, exploratório e com bastante incerteza associada. Quanto melhor e mais completa for a procura pelas soluções ideais, melhor o resultado final. A metodologia adotada pretende explorar diferentes soluções durante as fases iniciais do projeto considerando aspetos multidisciplinares distintos. Durante a fase conceptual do edifício deve ter-se em consideração os aspetos patentes na Tabela 1[1]:

Tabela 1 - Os aspetos principais no projeto de um ZEB[1]

<b>1. Definição</b>	Existem diversas definições para um ZEB que são baseados em balanços com diferentes sistemas de ponderação.
<b>2. Tipo de clima e nível de conforto térmico</b>	A definição de um ZEB é bastante sensível ao clima. Consequentemente, o projeto de um ZEB depende do nível de conforto térmico considerado.
<b>3. Estratégias passivas</b>	As estratégias passivas são fundamentais no projeto de um ZEB, incluindo ventilação natural, isolamentos, entre outros.
<b>4. Eficiência energética</b>	Um ZEB deve ser um edifício eficiente, o que implica obedecer a normas e padrões de eficiência energética, considerando o desempenho do edifício, taxas de infiltração baixas, redução da iluminação artificial, entre outros.
<b>5. Sistemas de fontes renováveis de energia</b>	São parte integrante de um ZEB para atingir o seu objetivo, pois permitem a produção de energia.
<b>6. Soluções inovadoras/novas tecnologias</b>	O objetivo final de um ZEB é ambicioso, o que pode requerer a implementação de novas tecnologias e soluções inovadoras.

Ao longo do relatório, todos os aspetos referidos na tabela anterior serão mencionados. Neste capítulo será descrita a história deste conceito e as soluções atualmente mais utilizadas para atingir um ZEB, sendo os outros aspetos abordados ao longo do evoluir do presente estudo.

### 2.1 Perspetiva histórica de um *Zero Energy Building*

Apenas no final dos anos setenta e no início da década de oitenta, quando as consequências da crise do petróleo começaram a ser perceptíveis, começou a ser discutida quer a utilização de fontes de energia não renováveis quer os consumos energéticos a nível global. Neste período começaram a surgir em alguns artigos científicos variados conceitos, tais como ‘a *zero energy house*’, ‘a *neutral energy autonomous house*’ ou ‘a *energy-independent house*’. Ao longo das décadas, diferentes conceitos de ZEBs foram descritos e avaliados, mas estes eram definidos de forma diferente em cada artigo ou nenhuma definição era utilizada[2].

Nos últimos anos, houve um rápido crescimento do consumo de energia e das emissões de CO<sub>2</sub> no setor dos edifícios, começando este a ter progressivamente um impacto maior no ambiente. Atualmente, este setor consome cerca de um terço da energia mundial, sendo que o setor residencial corresponde a 27% dessa energia. Globalmente, edifícios comerciais e residenciais utilizam mais de 40% de energia primária e são responsáveis por 24% das emissões de gases de efeito de estufa[3-5].

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos [6], em 2011, os setores comercial e residencial correspondiam a 41% do consumo total de energia neste país e a cerca de 11% da energia primária, como se pode observar na Figura 2 e Figura 3.

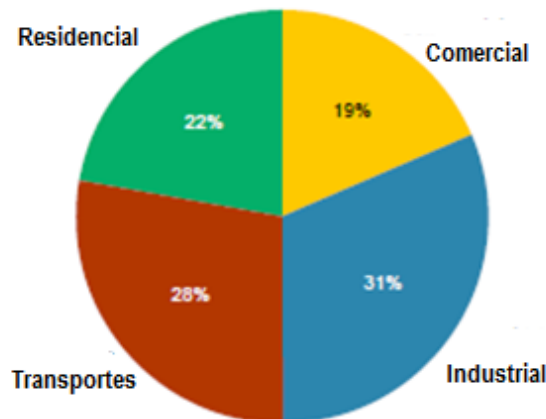


Figura 2 – Distribuição percentual de cada setor no consumo total de energia, 2011 [6]

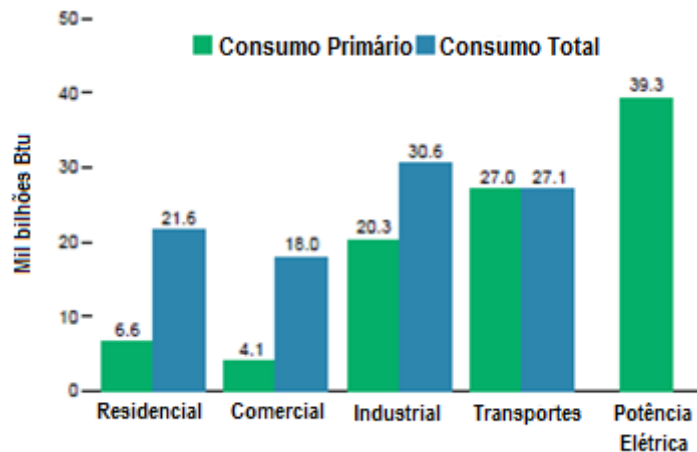


Figura 3 - Consumo de energia primária e consumo total de energia por setor, 2011 [6]

Analogamente ao que acontece nos Estados Unidos, na Europa os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do consumo total de energia, como se pode observar na Figura 4. Os edifícios serviços e residenciais correspondem a 13% e 27% do consumo energético, respetivamente.

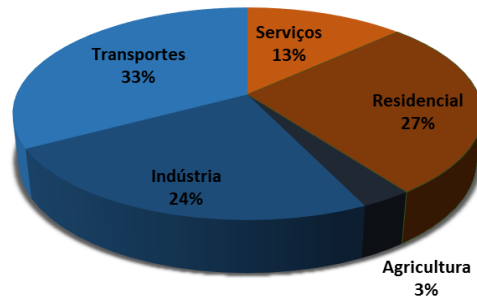


Figura 4 – Distribuição percentual de cada setor no consumo energético na União Europeia, 2009 [7]

Em Portugal, a indústria e os transportes assumem uma maior preponderância comparativamente com a média da União Europeia, com uma quota de 32% e 37% do consumo energético, respetivamente. Os edifícios equivalem a 28% do consumo, como se pode observar na Figura 5.

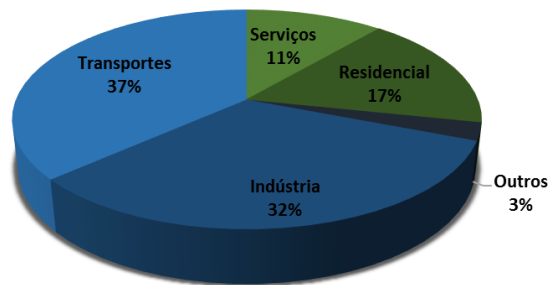


Figura 5 - Distribuição percentual de cada setor no consumo energético em Portugal, 2011 [8]

Como consequência dos números apresentados, o tópico de ‘Zero Energy Building’ tem recebido uma crescente atenção. Até 2010, mais de 200 projetos reivindicaram ter atingido esta designação, como se pode constatar na Figura 8[9]. Cerca de 1/3 destes projetos foram realizados em climas temperados, segundo a classificação climática de Wladimir Köppen. Para mais informações acerca da classificação climática, remete-se a leitura para o “ANEXO A: Classificação do clima”.

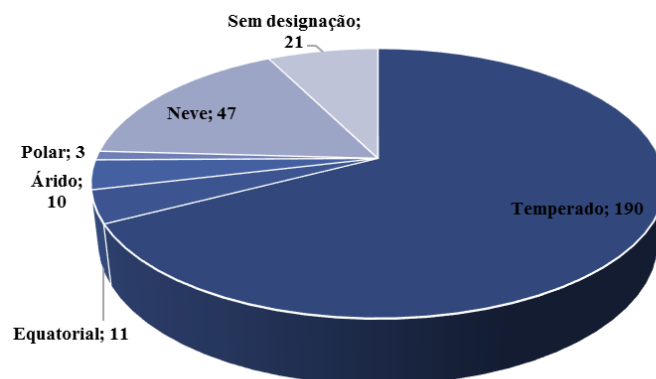


Figura 6 - Frequência de projetos ZEBs por clima [9]

A disponibilidade de recursos económicos, os avanços tecnológicos e o reconhecimento dos consumos energéticos forçaram não só o aparecimento destes projetos em países pertencentes a este clima, como também começaram por alterar os códigos de construção e impuseram políticas de poupança de energia para edifícios [9].

Um dos marcos históricos neste capítulo passou pela aprovação da diretiva da União Europeia, em 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios, na qual os Estados-Membros deviam aplicar uma metodologia, a nível nacional ou regional, para o cálculo do desempenho energético. Cada país deveria assegurar que os requisitos mínimos de desempenho energético eram cumpridos, tendo em conta as condições climáticas externas e as condições locais, bem como as exigências em matéria de clima interior e rentabilidade económica[10].

Em 2010, foi realizada uma reformulação à diretiva, na qual os Estados-Membros têm de assegurar, até ao dia 31 de Dezembro de 2020, que todos os novos edifícios são quase *Zero Energy Buildings*, assim como, a partir de 31 de Dezembro de 2018, todos os novos edifícios públicos terão essa designação. Para cumprir tal objetivo, cada país tem de elaborar planos nacionais para aumentar o número de edifícios ZEB ou quase ZEB<sup>3</sup>. Além disso, seguindo o exemplo de liderança do setor público, os países devem desenvolver as suas próprias políticas e medidas, tais como a definição de metas, a fim de estimular a transformação de edifícios remodelados em ZEBs[11].

No entanto, a falta de uma definição comum e de uma compreensão única do conceito tornou-se perceptível. O termo ZEB tem vindo a ser utilizado sem uma compreensão consolidada do seu conceito e tanto as políticas nacionais/internacionais como as metas a atingir têm vindo a ser construídas baseadas no conceito geral do balanço energético, mas sem uma definição evidente[3, 12, 13]. As definições permanecem genéricas e não são ainda padronizadas, na medida em que os significados divergem. Neste momento, não existe uma opinião clara na comunidade académica sobre qual o significado do zero – energia, exergia, emissões de CO<sub>2</sub> ou mesmo custos relacionados com a energia são opções viáveis [2].

Atualmente, não existe igualmente uma estrutura formal, abrangente e consistente que considere diferentes aspetos relativos à caracterização de um ZEB, que permita a cada nação empregar uma definição sólida deste, de acordo com as suas condições específicas e com as suas metas políticas. No capítulo seguinte, será descrita a estrutura proposta por *Sartori, I. et al*, pois esta considera aspetos bastante relevantes na definição dos ZEBs e não apenas um balanço energético [12].

## 2.2 Definição *Zero Energy Building*

O conceito base dos ZEBs fundamenta-se num balanço energético, no qual as necessidades energéticas do edifício são supridas por energia proveniente de fontes de energias renováveis, ao longo de um período de tempo[14].

Assume-se que, tipicamente, um ZEB utiliza fontes de energia e vetores energéticos convencionais, tais como eletricidade e gás natural, quando a transformação de energia no local não consegue igualar a sua necessidade. No entanto, quando a transformação de energia é maior que a carga do edifício, a eletricidade produzida em excesso pode ser exportada para a rede.

---

<sup>3</sup> Quase ZEB são edifícios, nos quais as necessidades energéticas devem ser supridas em larga percentagem por fontes renováveis de energia, incluindo produção no local ou nas suas imediações.

Desta forma, se se contabilizar as trocas de energia entre o edifício e a rede como um balanço energético, a produção de eletricidade em excesso pode compensar a utilização da energia proveniente da rede e atingir-se, assim, o conceito ZEB[14].

Conseguir implementar um *Zero Energy Building* sem uma ligação à rede tornar-se-ia muito difícil, já que atualmente as tecnologias de armazenamento de energia são limitadas e dispendiosas. Sem a ligação necessária à rede, a transformação de energia a partir de fontes renováveis teria de ser sobredimensionada, o que por sua vez levaria a que, em certos períodos de tempo, houvesse um excesso de produção de eletricidade que seria desperdiçada[14].

O balanço energético pode ser determinado entre a carga do edifício e a transformação de energia do mesmo ou entre a energia importada e exportada entre o edifício e a rede (neste caso, utiliza-se geralmente o termo *Net Zero Energy Building*), como se pode observar na Figura 7[12].

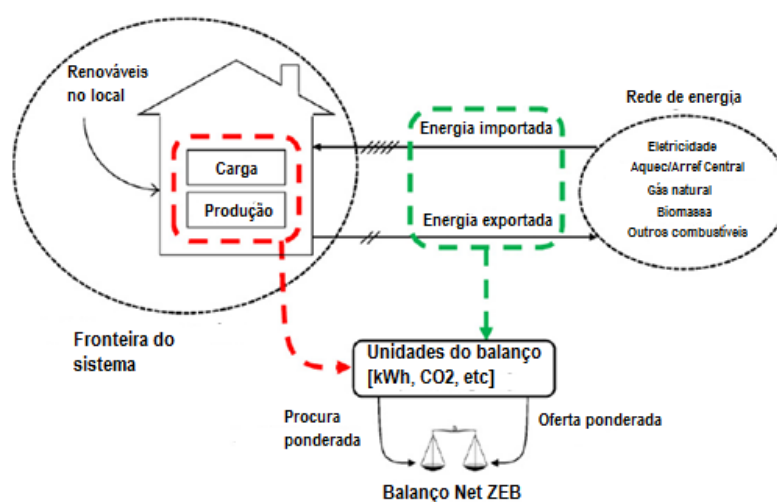


Figura 7 - Balanço energético para um *Zero Energy Building*[12]

No entanto, para colocar em prática este balanço vários aspetos devem ser avaliados. Adicionalmente, outros atributos para além do balanço ao longo de um período de tempo podem ser desejáveis para caracterizar os ZEBs. Estes aspetos serão descritos e analisados numa série de cinco critérios, dispostos na seguinte estrutura base [12]:

### I. Fronteira do sistema - edifício

- a. **Fronteira física** – Define a fronteira do edifício. Útil para identificar se a transformação de energia ocorre dentro dos limites do edifício (*‘on-site’*);
- b. **Fronteira do balanço** – Define quais os gastos energéticos que são considerados no balanço. Geralmente incluem o aquecimento, arrefecimento, ventilação, águas quentes sanitárias, iluminação e equipamentos;
- c. **Condições de fronteira** – Uma definição consistente de ZEB deverá permitir uma comparação entre edifícios similares num clima semelhante. Para tal, é necessário especificar explicitamente um conjunto de condições de fronteira:
  - i. Funcionalidade do edifício – Descreve o tipo de utilização que o edifício terá, como por exemplo, residencial, escritórios, hospital, entre outros;
  - ii. Densidade ocupacional – Geralmente expressa em nº de pessoas/m<sup>2</sup>;
  - iii. Clima;
  - iv. Critérios de conforto.

## II. Sistema de ponderação

- a. **Unidades** – A escolha das unidades podem ser apropriadas dependendo do objetivo do projeto. Dessa forma, quatro definições são comumente utilizadas[14]:
- *Net Zero Site Energy*: A quantidade da energia transformada proveniente de fontes energéticas renováveis é igual à quantidade energia utilizada num ano, contabilizando-se no local (edifício);
  - *Net Zero Source Energy*: A quantidade da energia transformada proveniente de fontes energéticas renováveis é pelo menos igual à energia utilizada num ano, quando contabilizada na fonte. Esta energia refere-se à energia primária utilizada na fonte para gerar e fornecer energia ao local. Para calcular a energia da fonte de um edifício, a energia quer importada quer exportada deve ser multiplicada por fatores de conversão;
  - *Net Zero Energy Costs*: Neste caso, a quantia paga pelo fornecedor de energia ao proprietário do edifício pela exportação da energia para a rede é, no mínimo, igual ao montante pago pelo proprietário ao fornecedor pelos serviços de energia utilizados ao longo de um ano;
  - *Net Zero Energy Emissions*: Neste caso, o edifício transforma, pelo menos, tanta energia proveniente de fontes renováveis quanto a que utiliza de fontes de energia não renováveis.

Cada uma destas possíveis definições acarreta vantagens e desvantagens, as quais devem ser analisadas casuisticamente para a escolha correta das unidades do sistema de ponderação. Na Tabela 2 e Tabela 3 são apresentadas as vantagens e desvantagens, respetivamente.

Além destes ZEBs, pode-se considerar não só a energia em termos quantitativos, como também qualitativos – exergia. Nestes, o balanço exergético do edifício deve ser igual a zero. Este conceito permite a avaliação completa do impacto dos edifícios no ambiente. Como princípio fundamental para atingir tal meta, o edifício deve estar envolto em opções que visam a resolução da incompatibilidade na utilização de recurso de elevada exergia para suprir necessidades de baixas exergia. [15]

- b. **Simetria** – O cálculo de um vetor energético de dois sentidos (por exemplo a eletricidade) pode ser realizado através de uma ponderação simétrica (utilizando fatores de conversão iguais para a quantidade de energia exportada e importada do edifício) ou assimétrica (utilizando fatores de conversão diferentes);
- c. **Dependência temporal** – Os fatores de conversão variam ao longo do tempo e espaço, pelo que estes deverão ser atualizados em intervalos de tempo regulares que acompanhem o desenvolvimento da rede.

Tabela 2 - Vantagens de cada definição ZEB [14]

<b>Definição</b>	<b>Vantagens</b>
<b><i>Net Zero Site Energy</i></b>	<p>Fácil de implementar.</p> <p>Aproximação conservadora para atingir ZEB.</p> <p>Verificável através de medições no local.</p> <p>Incentiva um <i>design</i> que promova a eficiência energética.</p> <p>Não é afetado por fatores externos, daí que seja fácil a sua monitorização ao longo do tempo.</p>
<b><i>Net Zero Source Energy</i></b>	<p>Capaz de equiparar o valor energético entre os diferentes tipos de combustíveis utilizados no local.</p> <p>Melhor modelo para a previsão do impacto sobre o sistema nacional de distribuição de energia elétrica.</p> <p>ZEB mais fácil de alcançar.</p>
<b><i>Net Zero Energy Costs</i></b>	<p>Fácil de implementar e medir.</p> <p>Verificável através das faturas provenientes dos fornecedores de energia.</p> <p>A pressão do mercado permite um bom balanço entre tipos de combustível.</p> <p>Controlo responsável da procura energética.</p>
<b><i>Net Zero Energy Emissions</i></b>	<p>Melhor modelo para a obtenção de energia verde e minimização de impactos ambientais.</p> <p>Considera as diferenças não-energéticas entre combustíveis (poluição, emissão de gases de estufa, entre outros).</p> <p>ZEB fácil de alcançar.</p>

Tabela 3 - Desvantagens de cada definição ZEB [14]

Definição	Desvantagens
<i>Net Zero Site Energy</i>	<p>Não considera todos os custos de serviço (podendo ter um baixo fator de carga).</p> <p>Requer maior área de coletores fotovoltaicos para compensar o uso de gás natural.</p> <p>Não é capaz de equiparar combustíveis.</p> <p>Não considera as diferenças não-energéticas entre combustíveis (poluição, disponibilidade, entre outros).</p>
<i>Net Zero Source Energy</i>	<p>Necessário definir fatores de conversão entre a energia da fonte e a do edifício, o que requer a definição de grande quantidade de informação.</p> <p>Não considera todos os custos de serviço (podendo ter um baixo fator de carga).</p> <p>Não considera as diferenças não-energéticas entre combustíveis (poluição, disponibilidade, entre outros).</p> <p>Os resultados são aproximações grosseiras (já que não consideram variações regionais ou diárias nas taxas de produção de eletricidade).</p> <p>A mudança de combustível na fonte pode ter um maior impacto na obtenção do objetivo do que a utilização de equipamentos e tecnologias mais eficientes.</p>
<i>Net Zero Energy Costs</i>	<p>Pode não refletir o impacto da procura na rede nacional, pois, para reduzir a necessidade energética, a utilização de coletores fotovoltaicos com armazenamento pode ser mais valioso do que a exportação para a rede.</p> <p>Necessários acordos de monitorização, de tal forma que a eletricidade exportada compense a energia importada mais as taxas a que está sujeita.</p> <p>As taxas energéticas são muito variáveis, o que dificulta a monitorização ao longo do tempo.</p>
<i>Net Zero Energy Emissions</i>	<p>Necessários fatores de emissão apropriados.</p>

### III. Balanço ZEB

- a. *Período de tempo* – Geralmente considera-se um balanço anual, já que este cobre todas as estações do ano. A seleção de períodos de tempo menores (sazonais ou mensais) podem ser altamente exigentes do ponto de vista de *design*, de eficiência energética e sistemas de abastecimento, para que se atinja o objetivo em momentos críticos, como por exemplo no Inverno. Por outro lado, um intervalo de tempo mais abrangente, na ordem das décadas, pode ser utilizado para avaliar o equilíbrio ao longo do ciclo de vida do edifício;

- b. **Tipo de balanço** - Através da Figura 8, pode-se verificar que existem três tipos de balanço. Em primeiro lugar, pode-se estabelecer um balanço entre a energia importada (retirada à rede pelo edifício) e exportada (colocada na rede pelo edifício), sendo este aplicado quando as estimativas de autoconsumo estão disponíveis. Pode-se também calcular um balanço entre a carga do edifício e a produção, desconsiderando a sua interação – é aplicável no projeto quando as estimativas de autoconsumo não estão disponíveis. Por último, existe um balanço mensal que pode ser visto como uma combinação dos dois anteriores: produção mensal de energia e a carga mensal em que se assume que estão equilibradas e somente os resíduos mensais são somados para formar o total anual.

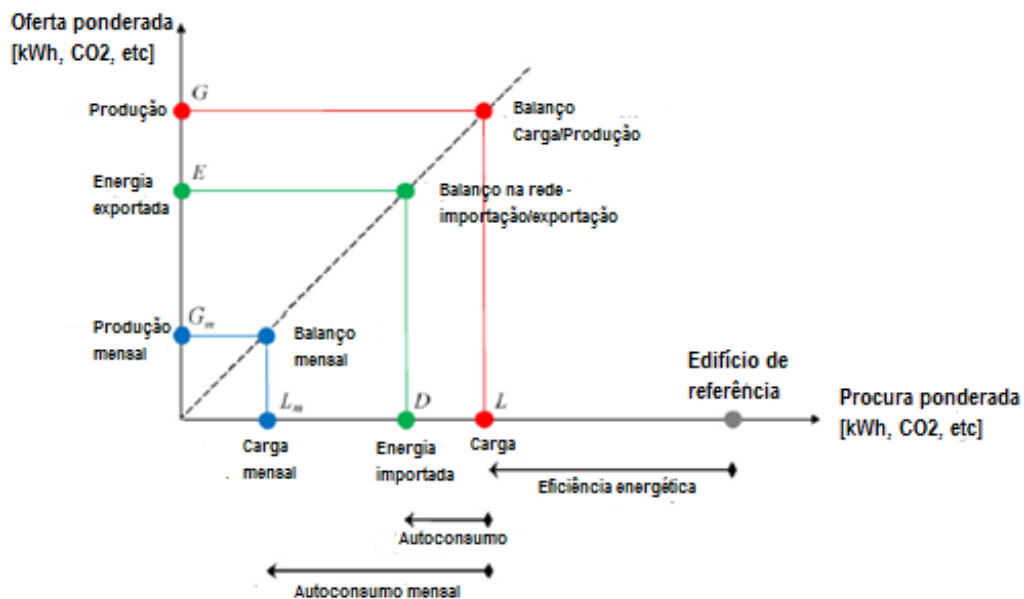


Figura 8 - Representação gráfica dos três tipos de balanço[12]

- c. **Eficiência energética** – Uma definição de ZEB poderá também ter requisitos mínimos de eficiência energética. Estes poderão ser prescritivos ou de desempenho. O primeiro refere-se às propriedades do edifício (valor da resistência das paredes, por exemplo) e do sistema AVAC (como o COP das bombas de calor), ao passo que o segundo se refere às necessidades energéticas (aquecimento, arrefecimento, iluminação, entre outros);
- d. **Fornecimento de energia** – Relativo às possíveis especificações ao nível do fornecimento de energia.

#### IV. Característica da energia ao longo do tempo

- a. **Correspondência entre a carga do edifício e a produção de energia** – A correspondência temporal entre a carga e a produção de energia dá uma primeira visão sobre a capacidade de um edifício trabalhar em sinergia com a rede. Uma baixa correlação entre a carga e a produção de energia (por exemplo, elevada carga no Inverno e elevada produção no Verão) significa que o edifício depende mais da rede. Um dos conceitos mais expeditos é a fração solar - rácio entre a energia obtida através da fonte solar e a necessidade energética.

- b. **Interação com a rede** – Nos casos de uma rede inteligente, pretende-se aumentar a flexibilidade da interação desta com o edifício, isto é, aumentar a capacidade do edifício responder a sinais provenientes da rede. Por exemplo, o ajuste da carga ou da produção de energia consoante os sinais da rede relativamente a preços.

Esta flexibilidade é dependente da conceção do edifício e dos seus sistemas energéticos e pode ser quantificada utilizando indicadores apropriados. Geralmente, recorre-se à exportação de energia máxima (o sistema de produção exporta toda a sua energia para a rede independentemente da carga do edifício ou possibilidades de armazenamento) e ao máximo consumo de energia produzida através de estratégias de controlo. A diferença entre estes dois valores indica o quão flexível é o edifício em termos de interação com a rede.

- V. **Medição e Verificação** – O estabelecimento de metas para a performance de um edifício a um nível político leva necessariamente ao desenvolvimento de sistemas de classificação de energia, ou seja, metodologias para a avaliação do desempenho do edifício. Para tal, deve existir um processo de medição e verificação que será dependente das opções selecionadas para cada critério de definição e das características do edifício.

### 2.3 Propostas para atingir *Zero Energy Building* – Tecnologias e Soluções

Para atingir um *Zero Energy Building*, *Torcellini et al*[14] propuseram uma hierarquia de soluções em que os princípios que as sustentam se baseiam em tecnologias que minimizem o impacto ambiental, incentivando projetos de construção eficientes energeticamente e que reduzam o transporte e conversão de perdas. Estas tecnologias devem estar disponíveis durante a vida útil do edifício e devem ser amplamente disponíveis, tal que o seu potencial de replicação em futuros ZEBs seja grande.

A Tabela 4 resume a hierarquia de fornecimento de energia que deve ser feito a um ZEB.

Tabela 4 - Hierarquia de fornecimento de energia proveniente de fontes renováveis a um *Zero Energy Building*[14]

Opção	Opções intrínsecas a um ZEB	Exemplos
0	Redução da energia necessária através da utilização de técnicas de construção <i>low-energy</i>	Ventilação natural, equipamento AVAC de elevada eficiência, iluminação natural, entre outros
<b>Opções de fornecimento de energia <i>On-Site</i></b>		
1	Utilização de fontes de energia renováveis disponíveis dentro dos limites do edifício	Painéis fotovoltaicos, coletores solares e microturbinas no edifício
2	Utilização de fontes de energia renováveis disponíveis no local do edifício	Painéis fotovoltaicos, coletores solares e turbinas no local, mas não no edifício

Opções de fornecimento de energia <i>Off-Site</i>		
3	Utilização de fontes de energia renováveis disponíveis fora do local do edifício, mas que produzam energia dentro dos limites	Biomassa, etanol, biodiesel ou <i>pellets</i> que podem ser importados <i>off-site</i> . Fluxos de resíduos provenientes de processos <i>on-site</i> que podem ser utilizados para gerar eletricidade ou calor
4	Compra de energia proveniente de fontes renováveis disponíveis <i>off-site</i>	Importação de energia da rede proveniente de fontes de energia renováveis (vento, fotovoltaicos, entre outros). Compra de créditos de emissão de carbono

Pode-se concluir que um *Zero Energy Building* e, conforme representado na Figura 9, deve, em primeiro lugar, incentivar a eficiência energética, tendo em conta a referência atual. Em seguida, deve recorrer a fontes de energias renováveis para atingir o balanço ZEB. Assim, torna-se relevante descrever quais as técnicas que têm vindo a ser utilizadas e desenvolvidas para atingir estes dois objetivos.

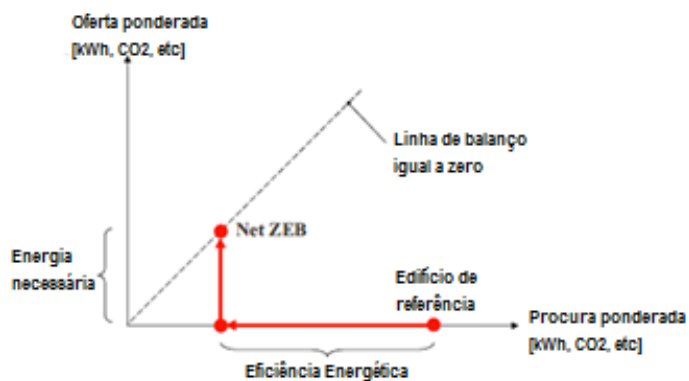


Figura 9 - Representação gráfica do conceito "Zero Energy Building" [12]

### 2.3.1 Redução dos consumos energéticos

A fase de projeto conceptual de um edifício é o melhor momento para integrar estratégias sustentáveis. Quando estes mecanismos são colocados em ação no início da fase de construção ao invés da sua posterior instalação, os custos de implementação decrescem consideravelmente[16].

A introdução destas medidas na arquitetura de um edifício designa-se por *design* passivo (ou *passive design*), no qual o projeto prevê a redução dos consumos energéticos através de diversos parâmetros que serão enumerados de seguida. No anexo B, poderá consultar-se a descrição completa de cada parâmetro.

- a) **Orientação e organização espacial do edifício:** Estes dois parâmetros em conjunto influenciam a quantidade de radiação solar incidente e as perdas para o exterior.
- b) **Envolvente do edifício:** A envolvente e o período de funcionamento dos sistemas de aquecimento/arrefecimento são os fatores que têm maior impacto no consumo total de energia do edifício, pois influenciam as condições climáticas existentes no interior do edifício e, por sua vez, a energia necessária para se atingir as condições de conforto térmico. Os aspetos mais relevantes na caracterização da envolvente são o coeficiente de transmissão térmica (U) e a inércia térmica [16].
- c) **Envidraçados e sombreamento:** A orientação e a área dos envidraçados em conjunto com as suas propriedades (particularmente a transmissão solar do vidro – g) determinam a quantidade de radiação solar transmitida para o interior do edifício, ou seja, os ganhos solares do edifício. Como controlo da radiação solar transmitida, recorre-se comumente a sistemas de sombreamento [16].
- d) **Sistemas passivos de arrefecimento/aquecimento:** Sistemas passivos são uma abordagem no projeto de um edifício que controlam a temperatura interior sem consumo energético, recorrendo geralmente à convecção natural causada pela diferença de densidades entre o ar quente e o ar frio. O aquecimento passivo resulta na utilização de certos elementos para armazenar o calor proveniente da energia solar. O arrefecimento passivo utiliza processos naturais (tais como a convecção, evaporação ou radiação) de forma a diminuir a temperatura no interior do edifício ou a sensação de temperatura dos ocupantes [16].
- e) **Iluminação e equipamentos:** Deve-se promover o uso de lâmpadas e equipamentos o mais eficientes possível, além da sua utilização racional[17].

### 2.3.2 Fontes de energias renováveis disponíveis on-site

Após a incorporação das medidas de eficiência e poupança de energia no edifício que diminuem os consumos energéticos, a restante necessidade de energia deve ser obtida recorrendo a fontes de energia renováveis. As disponíveis *on-site*, usualmente, são de origem solar e eólica.

#### a) Energia solar:

Teoricamente, a energia solar tem o potencial de suprir a necessidade energética mundial, já que, anualmente, toda a radiação solar que atinge a Terra é mais do que 7500 vezes superior ao consumo total de energia primária[18, 19]. Na Figura 10 está representado a quantidade de irradiação global horizontal a nível mundial.

Atualmente o aproveitamento da energia solar tem duas aplicações significativas: térmica e elétrica. Para o aproveitamento térmico da energia solar recorre-se a coletores solares. Estes absorvem a radiação solar incidente, convertendo-a em calor e transferindo essa energia para um fluido (usualmente ar, água ou óleo) que pode ser utilizada diretamente, como água quente sanitária ou em equipamentos, ou pode ser armazenada [20].

Para a conversão da radiação incidente em eletricidade, recorre-se a sistemas fotovoltaicos. Estes sistemas são bastante simples e requerem muito pouca manutenção, geralmente constituídos por células fotovoltaicas, conexões mecânicas e elétricas e um sistema de

regulação e modificação do *output* elétrico. Estes sistemas são classificados consoante o pico de potência que conseguem fornecer quando o sol está diretamente por cima do coletor num dia sem nuvens[21].

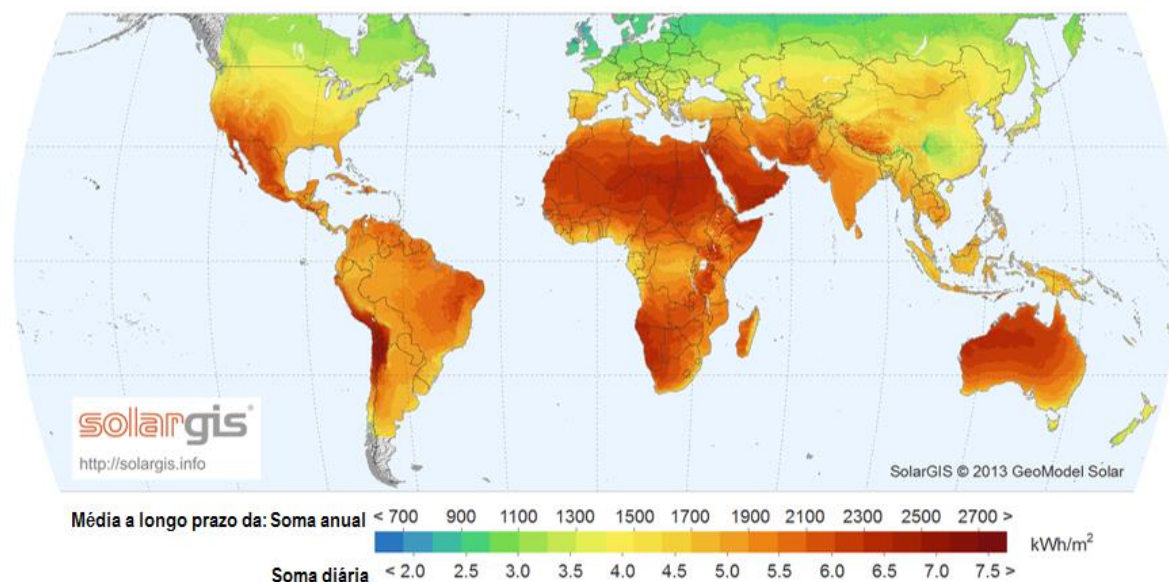


Figura 10 - Mapa-múndi da irradiação global horizontal [22]

Através destas duas tecnologias, a energia solar pode ser responsável pelo aquecimento de águas sanitárias, aquecimento, fornecimento de energia elétrica aos equipamentos e, mais recentemente, pelo arrefecimento do edifício. Em climas quentes e húmidos, com radiação solar bastante intensa, a refrigeração solar tem sido considerada como uma hipótese viável num futuro sustentável. A necessidade de redução do consumo de energia na refrigeração, não pode apenas depender no aumento da eficiência. A redução na utilização de fluidos frigorigéneos e na produção de dióxido de carbono proporcionam um novo leque de oportunidades para a refrigeração solar[23]. No “ANEXO C: Energia solar” estão descritas, em pormenor, as tecnologias que permitem obter estas diferentes aplicações.

Durante a última década, a instalação de tecnologias solares tem crescido exponencialmente, a um nível global. A potência instalada de fotovoltaicos cresceu de 1,4GW em 2000 para aproximadamente 40GW em 2010 com um crescimento anual a rondar os 49%, a capacidade de produção dos coletores solares concentradores mais do que duplicou atingindo 1095MW em 2010. A potência instalada de coletores solares passou dos 40GW<sub>th</sub><sup>4</sup> para os 185GW<sub>th</sub>, o que representa um crescimento a rondar os 360%. [19]

A impulsão deste crescimento é atribuída às políticas de países como a Alemanha, Estados Unidos, Japão e China. Reduções nos impostos, subsídios, redução das taxas de juro, programas de empréstimos são alguns exemplos dos instrumentos utilizados a nível fiscal e regulatório para estimular a utilização de energia solar[19].

Apesar do potencial que esta representa e do recente crescimento exponencial do mercado, a contribuição para suprir a necessidade energética mundial é, neste momento, desprezável.

<sup>4</sup> O prefixo “th” significa que a potência é térmica. Provém do inglês “thermal”.

Existem ainda diversas limitações difíceis de ultrapassar, geralmente barreiras técnicas, económicas e institucionais, que dificultam a sua utilização. Custos iniciais superiores em comparação com as fontes de energia convencionais, necessidade de infraestruturas (no caso da tecnologia solar fotovoltaica) e performance limitada são os principais motivos[19].

#### **b) Energia eólica:**

Em relação à energia eólica, é utilizado um aerogerador para transformar o movimento mecânico, devido à velocidade do vento, em energia elétrica. No entanto, esta solução ainda não tem o potencial para compensar as exigências necessárias ao edifício, como por exemplo em termos de resistência às vibrações. Além disso, as baixas velocidades do vento em áreas urbanas e os problemas relacionados com o ruído tornam esta solução, muitas vezes, proibitiva[9].

### **2.3.3 Fontes de energias renováveis disponíveis off-site**

Em último caso, a supressão da necessidade de energia deve ser feita através da compra de energia proveniente de fontes renováveis, exteriores ao edifício. Uma das possibilidades passa pela compra de energia à rede. O que se pretende é que a energia disponível na rede seja provenientes de fontes de energia renováveis: solar, eólica ou hídrica. Além destas três fontes mais usuais, os consumidores poderão recorrer à biomassa ou mercado de carbono.

#### **a) Biomassa:**

A utilização da biomassa sempre esteve em desvantagem perante os combustíveis fósseis, pois tinha uma densidade energética baixa e elevado índice de humidade. Nos anos recentes, tem havido uma expansão na utilização da biomassa, especialmente sob a forma de *pellets*. Estes são uma massa com uma forma cilíndrica ou esférica feita através da compressão de madeira. No entanto, é necessário referir que esta madeira não provém do abate de árvores, mas sim de serrações e desperdícios gerados pela floresta.

Têm-se tornado uma importante fonte de energia, devido à qualidade consistente, já estandardizada – baixo índice de humidade, elevada densidade de energia e tamanho e forma homogéneos. A qualidade consistente deste combustível permite também um transporte mais fácil e, por conseguinte, mais longo[24, 25].

Uma das maiores vantagens é a sua elevada densidade energética, o que aumenta substancialmente a eficiência no transporte e armazenamento em comparação com outros combustíveis de biomassa. Ainda, a sua homogeneidade e composição química normalizada são parâmetros importantes para garantir a elevada disponibilidade e operações automatizadas em aplicações de pequena escala[25].

Além disso, permite não só a redução de emissões de gases de estufa como a de partículas. Com os recentes desenvolvimentos nas caldeiras de combustão e o facto de a humidade dos *pellets* ser diminuta, a emissão de compostos químicos é muito reduzida e a combustão é mais eficiente, libertando menos fumo[25].

### **b) Mercado de carbono:**

No último caso, para se atingir a condição de *Net Zero Energy Building*, recorre-se ao mercado de carbono. Este mercado foi uma solução económica adotada a nível mundial (para países que ratificaram o acordo de Kyoto em 1997) para regular as emissões de gases de efeito de estufa através de um esquema de *cap-and-trade*. Neste último, um órgão regulador começa por estabelecer um limite para as emissões permitidas (*cap*). Em seguida, este órgão distribui licenças de emissões que totalizam o limite estabelecido anteriormente[26].

Se as empresas não tiverem créditos suficientes para cobrir as suas emissões, estas podem reduzir as suas emissões ou comprar créditos a outras empresas. Empresas que tenham créditos extras, podem vender ou guardá-los para um futuro (*trade*)[26].

Se uma empresa vender os seus créditos, transforma a diminuição da sua pegada ambiental em lucro, tornando-se este um incentivo para a criatividade, conservação de energia e investimento em fontes de energia renováveis. Por outro lado, a compra e venda de créditos dá a empresas, que tenham dificuldade em reduzir as suas emissões, flexibilidade para atingir os objetivos anuais na redução[26].

A maior desvantagem, porém, é que uma estrutura global ainda não foi formulada. Como a maior parte dos negócios ocorre nos mercados internacionais, é difícil para algumas empresas regionais seguir este sistema.

## **2.4 Conclusão**

Pode-se concluir que para atingir o objetivo de um *Zero Energy Building* deve-se recorrer à eficiência do edifício e suprir as necessidades através de fontes de energia renováveis.

Como se pode observar na Figura 11, cada finalidade na utilização de energia é influenciada por diferentes variáveis de projeto. Tipicamente, cada uma destas tem uma ampla gama possível de valores ou escolhas. Assim, cada combinação de variáveis de projeto leva a uma determinada necessidade de energia anual, em condições padrão de utilização, o que exige um dimensionamento diferente dos sistemas de fontes de energias renováveis em cada caso específico. Assim pode-se inferir que o conceito ZEB está bastante dependente das variáveis de projeto [27].

Por conseguinte, é de interesse caracterizar o espectro total das possíveis combinações de variáveis, a fim de identificar quais as que terão um custo inicial menor e quais as que terão o menor custo ao longo da vida do edifício[27]. Modelos de simulação que incorporam todos estes componentes e são capazes de prever com precisão a resposta dinâmica do edifício são essenciais para a identificação das estratégias mais eficazes[28]. Dessa forma, recorrer-se-á à simulação dinâmica de um edifício modelo através de diferentes *softwares* que será abordado nos capítulos seguintes.

Dos edifícios ZEBs construídos até 2010, diferentes combinações das várias medidas supra mencionadas, quer em termos de eficiência energética quer nas tecnologias de fontes de energias renováveis, foram aplicadas. Na Figura 12 e Figura 13 estão representados, em termos percentuais, quais as medidas que foram aplicadas nestes edifícios[9].

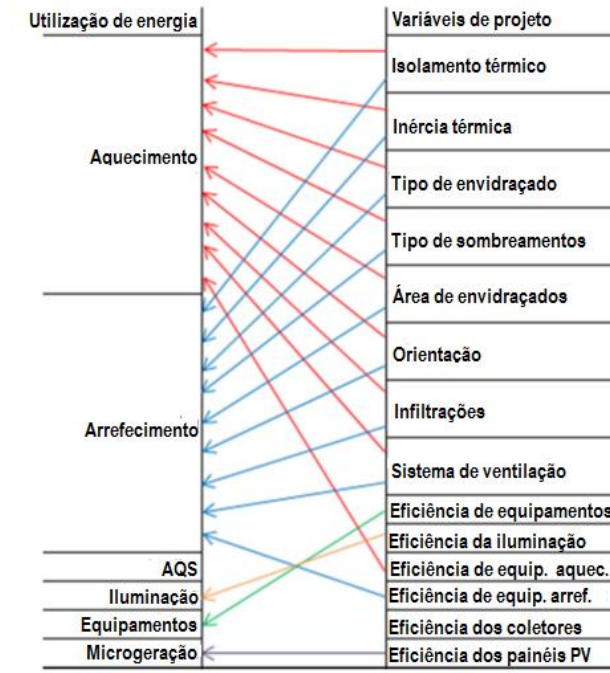


Figura 11 - Resumo das variáveis de projeto e a sua influência a nível energético [27]

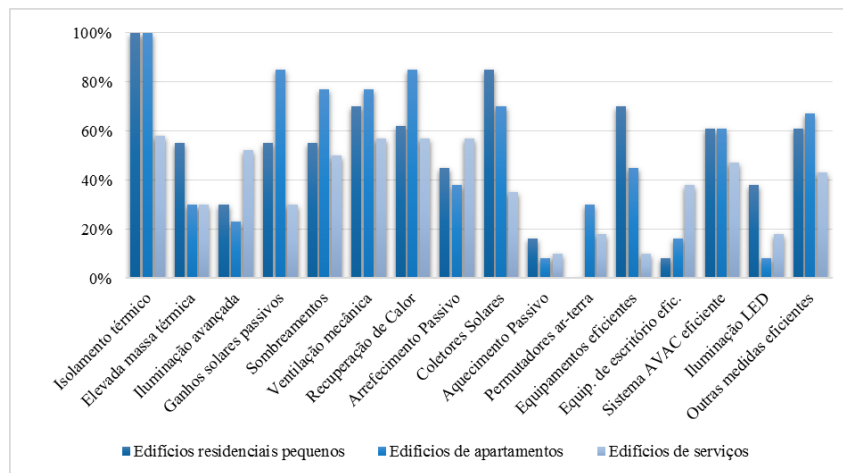


Figura 12 - Diferentes soluções aplicadas em Net ZEBs[9]

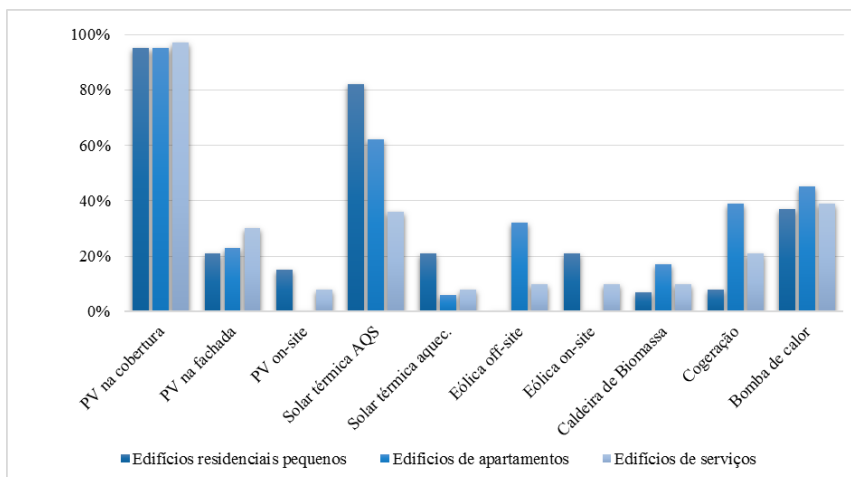


Figura 13 - Tecnologias aplicadas a diferentes tipologias de edifícios [9]

### 3 Clima e conforto térmico

O conforto térmico no interior de um edifício é uma exigência para o bem-estar, saúde e produtividade dos seus ocupantes. Assim, o projeto de um edifício deve ser orientado para proporcionar aos seus ocupantes um ambiente adequado onde estes se sintam confortáveis e possam ser produtivos.

O conceito de conforto térmico está inerentemente associado ao clima, daí que ao longo deste capítulo serão estudados os climas alvo para a localização potencial do edifício modular em estudo, bem como as temperaturas de conforto dos ocupantes segundo as principais normas internacionais para cada um desses mesmos locais.

#### 3.1 Clima

As soluções adotadas num *Zero Energy Building* estão intrinsecamente relacionadas com a noção de clima e, conseqüentemente, com o conforto térmico. Isto significa que, em primeira instância, se devem contextualizar as localizações em estudo e quais os padrões de conforto que os ocupantes terão.

Em relação ao clima, a empresa pretende exportar o seu edifício para o mercado latino-americano. Dessa forma, para o presente caso, serão estudados os climas em Caracas (Venezuela), Bogotá (Colômbia) e Lima (Peru) devido à sua diversidade climática. No entanto, para permitir o estudo da diferença do produto da empresa com os códigos de construção em Portugal, também se estudará o clima mediterrânico em três cidades: Porto, Coimbra e Lisboa. No “ANEXO A: Classificação do clima mundial” apresentam-se detalhadamente os aspetos relacionados com as classificações climáticas como informação complementar a esta questão.

Na Figura 14, tendo em conta a classificação climática de Wladimir Köppen, pode-se observar que as três cidades latino-americanas estão sujeitas a climas distintos. Bogotá tem um clima húmido durante todo o ano com temperatura moderada e um Verão com temperaturas moderadas (Cfb). Por sua vez, Caracas tem um clima classificado como savana equatorial com um Inverno seco (Aw) e Lima tem a classificação de um clima quente, árido e deserto (BWh).

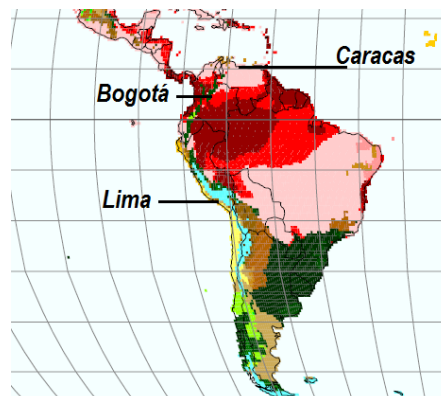


Figura 14 - Localização das três cidades tropicais [29]

Para uma análise mais exaustiva, os dados meteorológicos foram analisados recorrendo ao *software Climate Consultant 5* [30]. Existem diversas fontes de dados meteorológicos, geralmente através de publicações, serviços nacionais de meteorologia, aeroportos,

universidades ou organizações de pesquisa. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE – *Department of Energy*) fornece conjuntos de dados meteorológicos de um ano típico para mais de 2100 localidades espalhadas por mais de 100 países. Por outro lado, o *software Meteororm* gera dados a partir dos registos meteorológicos médios mensais registados entre 1961-1990 em cerca de 7400 estações mundiais. Este programa fornece ainda informação sobre a precipitação, algo que não acontece nas restantes fontes de dados.[1]

No entanto, para regiões tropicais, como as que serão estudadas, os dados provenientes do DOE são considerados mais precisos a representar as condições climáticas típicas de um local do que os gerados pelo *Meteororm*. Isto acontece porque o DOE forma um conjunto de dados de um ano típico através de medições de hora em hora dos meses mais próximos da média dos últimos 30 anos, ao passo que o *Meteororm* interpola as médias mensais das estações mais próximas e gera medições de hora em hora baseadas nessas médias. Além disso, a utilização dos dados meteorológicos do DOE com uma extensão *epw* permite a utilização de dois *softwares* de simulação distintos (EnergyPlus e TRNSYS) [1]. Por estas razões, neste estudo serão utilizados os dados meteorológicos retirados do DOE.

Em cada cidade, através dos dados meteorológicos, será apresentada uma representação gráfica das temperaturas horárias num diagrama psicrométrico e uma rosa-dos-ventos. Este último está dividido em 36 sentidos e exibe ainda uma série de círculos concêntricos que incluem, do mais interno para o externo: as medições da velocidade, humidade relativa, temperatura e frequência da ocorrência dos ventos, acompanhados por um código de cores. Um estudo acerca da radiação solar incidente numa superfície horizontal em cada cidade será posteriormente abordado no capítulo 6: “Do edifício modular a um *Zero Energy Building*”.

### Bogotá (coordenadas geográficas: 4°35'53''N, 74°4'33''O; altitude: 2640m):

Bogotá é a capital da Colômbia e localiza-se a cerca de 2600m acima do nível médio da água do mar, muito próximo da linha de Equador. O ano típico de Bogotá, representado na Figura 15, é caracterizado por uma faixa relativamente estreita de temperaturas, em que praticamente estas se situam entre os 5°C e os 20°C. A temperatura média mensal ronda os 12°C e 13°C, o que significa que as temperaturas se mantêm constantes ao longo do ano.

Por outro lado, a humidade relativa é bastante elevada, situando-se praticamente acima dos 50% ao longo do ano. Na Figura 16, pode-se observar a rosa-de-ventos e concluir que os ventos são predominantemente de Nordeste a Sudeste, com uma velocidade média de 4m/s.

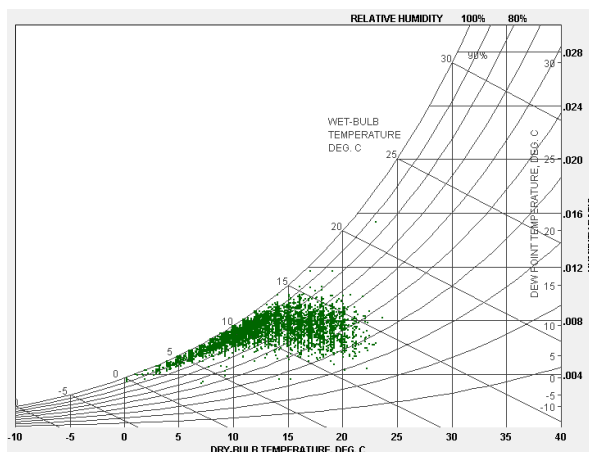


Figura 15 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Bogotá

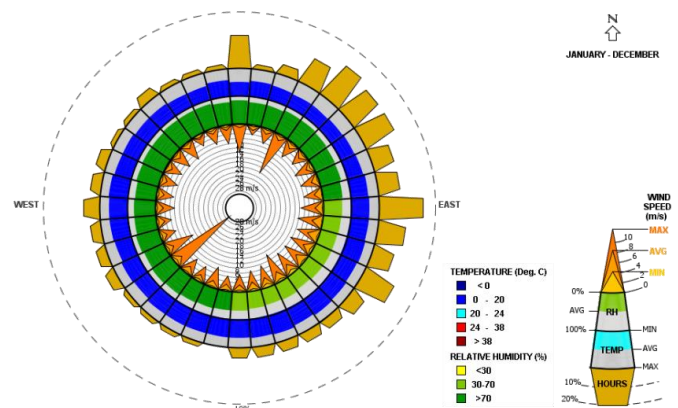


Figura 16 – Rosa-dos-ventos de Bogotá

**Caracas (coordenadas geográficas: 10°29'16''N, 66°52'45''O; altitude: 900m):**

As temperaturas em Caracas mantêm-se praticamente constantes ao longo do ano, variando entre os 22°C e os 32°C, com humidades relativas superiores a 60%, como se pode observar na Figura 17. A temperatura média mensal restringe-se a uma gama entre 25°C e 27°C. Apesar da sua localização tropical, as temperaturas não atingem valores tão elevados como noutras localizações semelhantes devido à sua altitude, já que Caracas situa-se 900m acima do nível médio do mar.

Relativamente aos ventos predominantes, a direção de Lés-Nordeste é claramente a mais influente já que 30% do vento nesta cidade provém desta direção, sendo que as outras direções não são relevantes. A velocidade média do vento é de 2m/s.

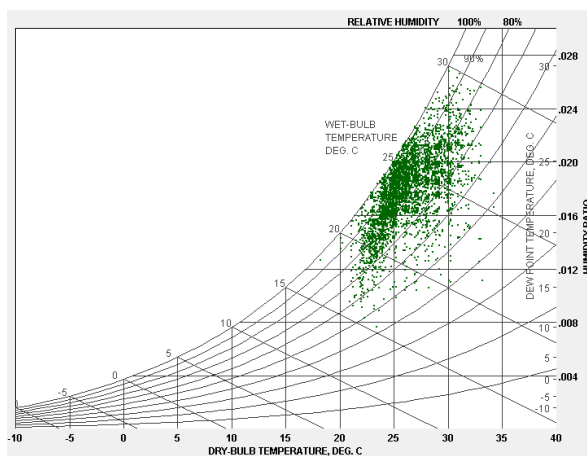


Figura 17 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Caracas

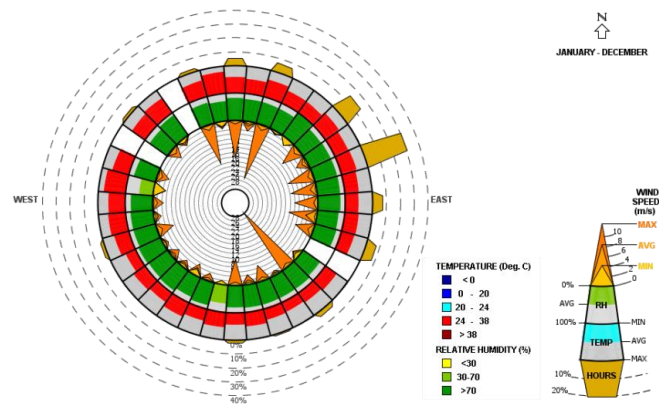


Figura 18 - Rosa-dos-ventos de Caracas

**Lima (coordenadas geográficas: 12°2'36''S, 77°1'42''O; Altitude: 154m):**

O clima de Lima, devido à sua proximidade com o Oceano Pacífico, é temperado, apesar de estar localizado nos trópicos e junto a um deserto. As temperaturas de um ano típico situam-se praticamente entre 15°C e 27°C, menores do que seria esperado para um deserto subtropical (Figura 19).

Ao contrário dos casos anteriores, Lima apresenta uma época de aquecimento e outra de arrefecimento. O mês mais quente tem uma temperatura média de 23°C (Fevereiro e Março), ao passo que o mais frio tem uma temperatura média de 16°C (Agosto). Em relação à humidade relativa, esta tem valores elevados, quase sempre superior a 60%.

Relativamente à rosa-dos-ventos, representada na Figura 20, pode-se concluir que os ventos predominantes têm a direção de sul e su-sudeste com uma velocidade média de 4m/s.

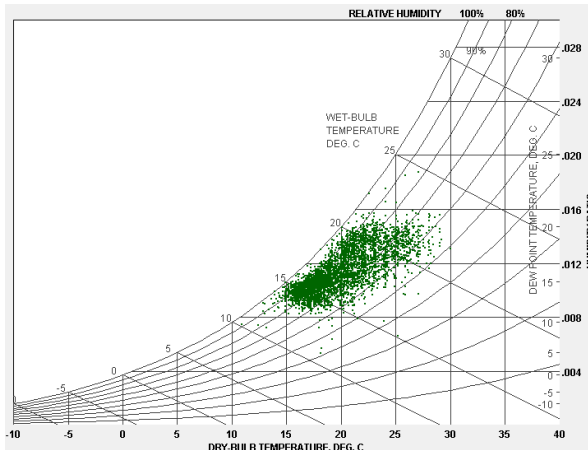


Figura 19 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Lima

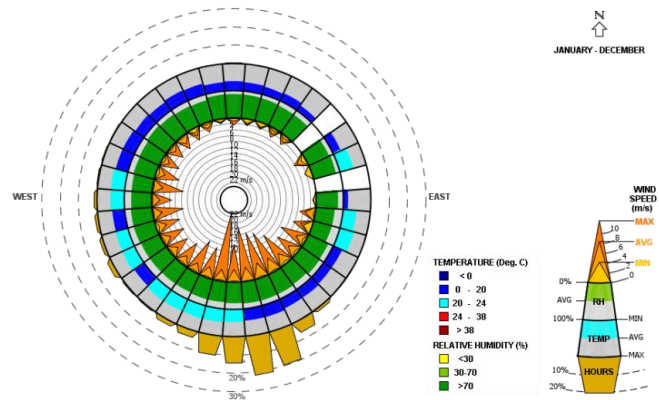


Figura 20 – Rosa-dos-ventos de Lima

Porto (coordenadas geográficas: 41°9'44"N, 8°37'19"O; Altitude: 104m), Coimbra (coordenadas geográficas: 40°12'20"N, 8°25'10"O; Altitude: 43m) e Lisboa (coordenadas geográficas: 38°42'50"N, 9°8'22"O; Altitude: 2m):

Relativamente às cidades portuguesas, todas têm a classificação de clima temperado com período de seca no Verão (Cs). No entanto Lisboa e Coimbra são consideradas como tendo um Verão quente (Csa) ao passo que o Porto é caracterizado como um Verão moderado (Csb).

Iniciando a análise pela cidade mais a Norte e examinando a Figura 21, denota-se que o Porto tem uma gama de temperaturas entre os 0°C e os 25°C e humidades relativas praticamente superiores a 50% durante todo o ano. Os ventos têm três direções principais: Noroeste, Este e Sul, com velocidades médias de 6m/s.

Este clima, similar a Lima, tem uma estação de aquecimento e arrefecimento. Janeiro é o mês mais frio com uma temperatura média de 9°C e Agosto, no lado oposto, é o mês mais quente com uma temperatura média de 21°C.

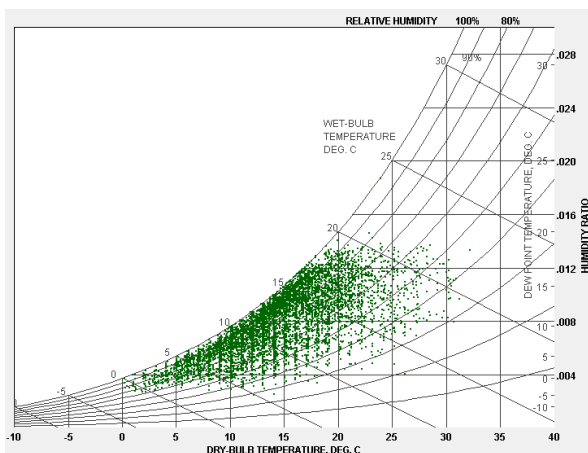


Figura 21 - Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos do Porto

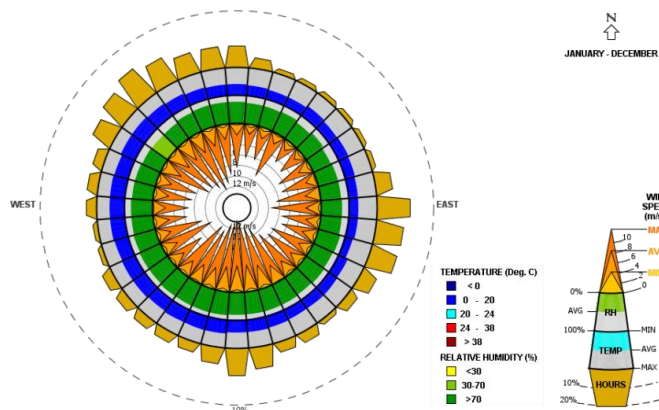


Figura 22 – Rosa-dos-ventos do Porto

Observando a Figura 23 pode-se constatar que Coimbra tem uma gama de temperaturas superiores ao Porto, entre os 5°C e os 30°C, com humidades relativas entre 40% e 100%. Janeiro é o mês mais frio com uma temperatura média de 9°C. Em oposição, Agosto tem temperaturas médias de 21°C, sendo o mês mais quente. Pela Figura 24, conclui-se que a direção predominante dos ventos é Nordeste e Sudeste com velocidades médias de 4m/s.

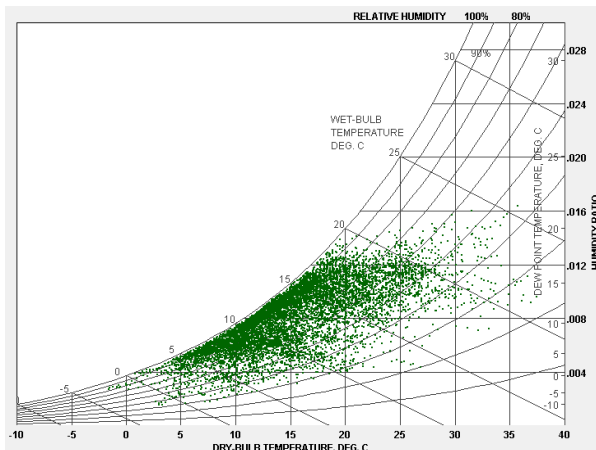


Figura 23 -Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Coimbra

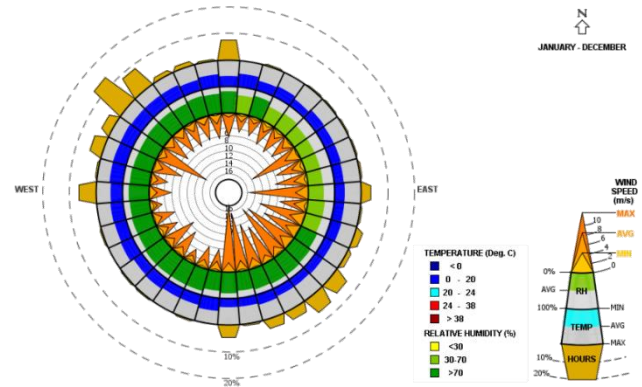


Figura 24 – Rosa-dos-ventos de Coimbra

Por último, na Figura 25 e Figura 26 estão patentes os dados meteorológicos e rosa-dos-ventos de Lisboa, respetivamente. É possível observar que as temperaturas são bastante similares a Coimbra. Quanto aos ventos predominantes, estes têm uma direção Norte. Contudo, na rosa-dos-ventos deste local verifica-se que entre Oeste e Este as velocidades médias do vento são de 6m/s.

Julho e Agosto são os meses mais quentes, com uma temperatura média mensal de 22°C, ao passo que Janeiro é o mês mais frio com uma temperatura média de 10°C

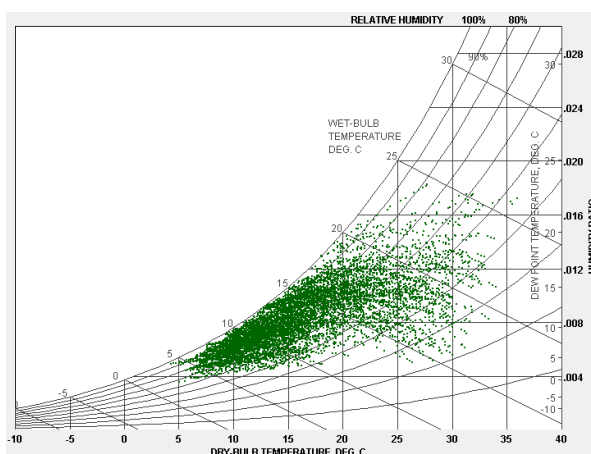


Figura 25 -Representação no diagrama psicrométrico dos dados climáticos de Lisboa

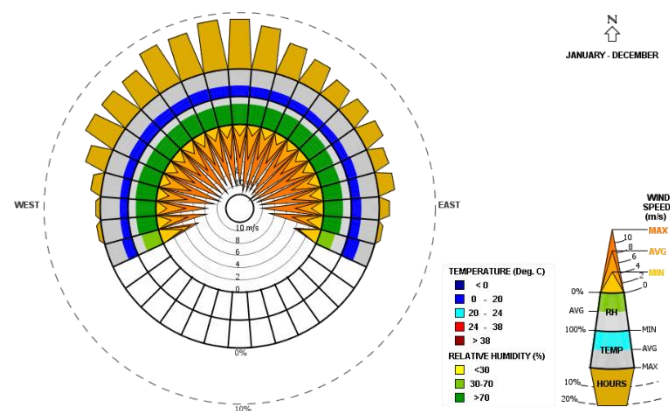


Figura 26 – Rosa-dos-ventos de Lisboa

### 3.2 Conforto térmico

Em termos de conforto existem atualmente duas teorias que coexistem em diferentes normas: a abordagem por balanço térmico e a adaptativa. No “ANEXO D: Conforto Térmico” pode-se encontrar uma descrição detalhada de cada uma, assim como uma comparação entre elas. Neste trabalho apenas será considerada a abordagem adaptativa. Por um lado, esta permite um alargamento das temperaturas de conforto, o que torna possível a redução do consumo energético. Por outro lado, edifícios que se baseiam no modelo do balanço térmico dependem muito de sistemas mecânicos o que não vai de encontro às preocupações ambientais e conservação de energia, além de desprezarem o contexto social, climático e cultural no que toca ao conforto[31].

Para colocar os modelos de conforto térmico adaptativo em perspetiva, as figuras seguintes pretendem demonstrar a aplicação do modelo da ASHRAE 55-2004 (para 90% de satisfação dos ocupantes) e da EN 15251 (para edifícios de categoria I). A gama de temperaturas confortáveis para cada ocupante, em cada caso, foram calculadas pelas equações presentes no “ANEXO D: Conforto”, no subcapítulo “Abordagem adaptativa”, em que os dados meteorológicos necessários foram obtidos através da base de dados do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

Antes da análise separada de cada local, deve-se alertar para o facto de que todas têm em comum uma elevada humidade relativa durante o ano inteiro e que este parâmetro tem uma influência enorme no conforto dos ocupantes (remete-se a leitura para o subcapítulo presente no “ANEXO D: Conforto Térmico -A importância da humidade relativa no conforto térmico”).

Analisando a Figura 27, Figura 28 e Figura 29, conclui-se que as três localizações tropicais têm necessidades de conforto completamente distintas.

Bogotá é caracterizada por um regime de temperaturas semelhante ao longo de todo o ano com uma média mensal constante a rondar os 13°C, o que, conseqüentemente gera temperaturas de conforto praticamente constantes. Para atingir o conforto térmico neste tipo de clima deve-se principalmente recorrer ao aquecimento.

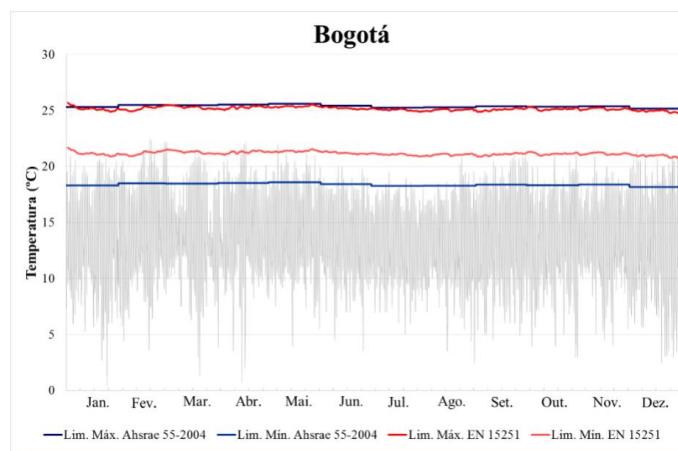


Figura 27 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Bogotá

Em Caracas, similar a Bogotá, a temperatura exterior mantém-se constante praticamente o ano inteiro. No entanto, a temperatura média ronda os 25°C. As temperaturas relativamente altas, aliadas à elevada humidade relativa dificulta bastante o conforto térmico dos indivíduos. Por essa razão, neste tipo de clima deve-se promover o arrefecimento e desumidificação.

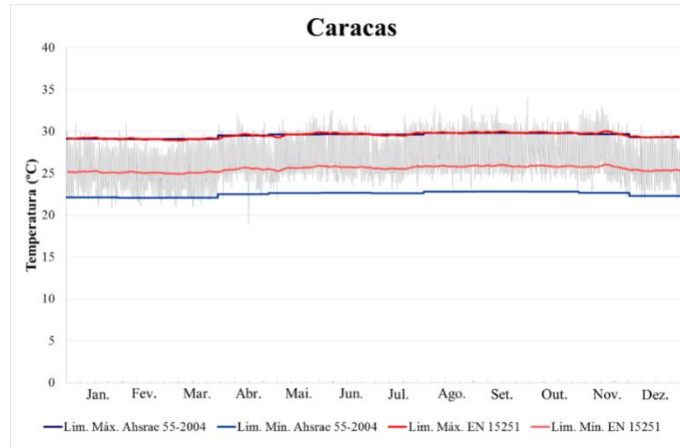


Figura 28 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Caracas

Por último, Lima, ao contrário dos casos anteriores, tem claramente uma estação de aquecimento e arrefecimento. De Abril a Outubro, as temperaturas são moderadas podendo recorrer-se ao aquecimento quando necessário. De Novembro a Março, temperaturas relativamente altas aliadas a humidade relativa elevada, criam as mesmas dificuldades em atingir o conforto térmico que em Caracas. Assim, nesta época deve-se arrefecer e desumidificar o edifício.

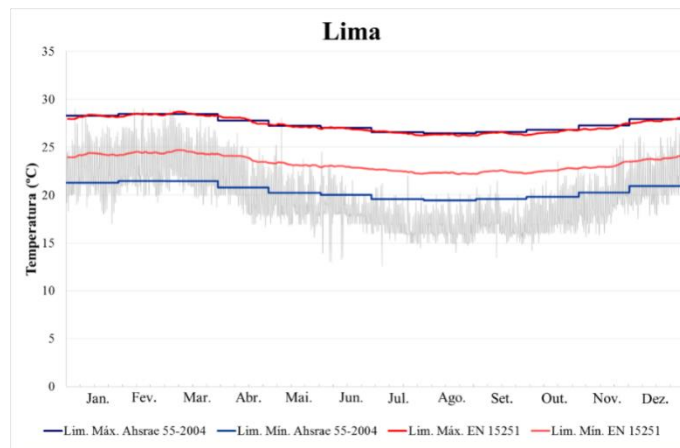


Figura 29 -Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Lima

O clima entre as três localizações portuguesas não difere muito, sendo este facto notório pela avaliação da Figura 30, Figura 31 e Figura 32, nos quais existe uma estação de aquecimento (de Outubro a Abril) e uma estação de arrefecimento (de Maio a Setembro). No entanto, as soluções adotadas para este clima devem ser distintas do caso anterior (em especial Lima), pois a humidade relativa não é tão elevada. Assim, deve-se promover o aquecimento e humedificação entre Outubro e Abril e arrefecimento entre Maio e Setembro.

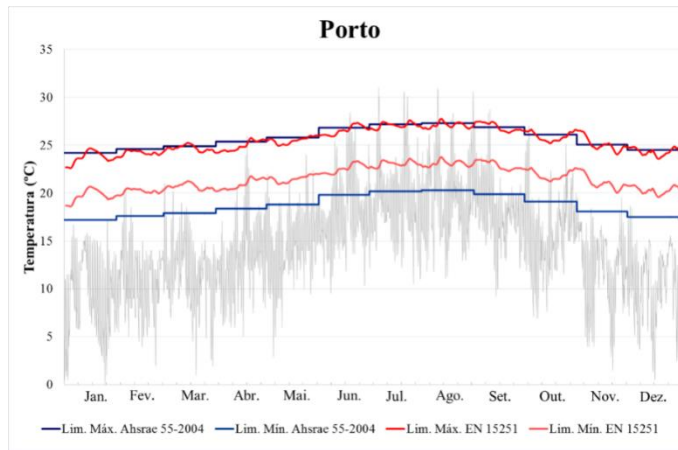


Figura 30 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo no Porto

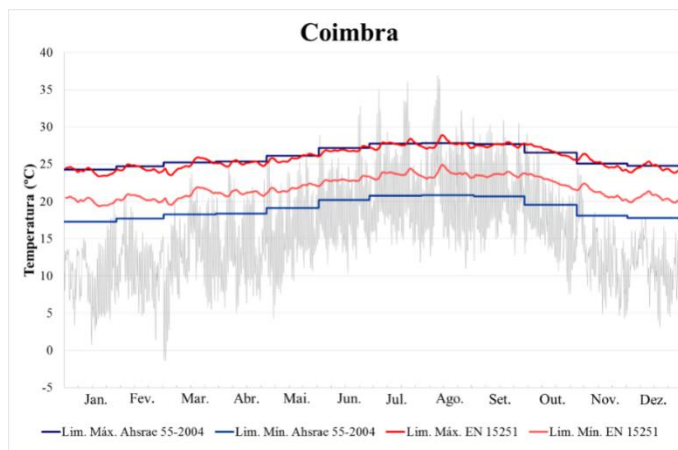


Figura 31 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Coimbra

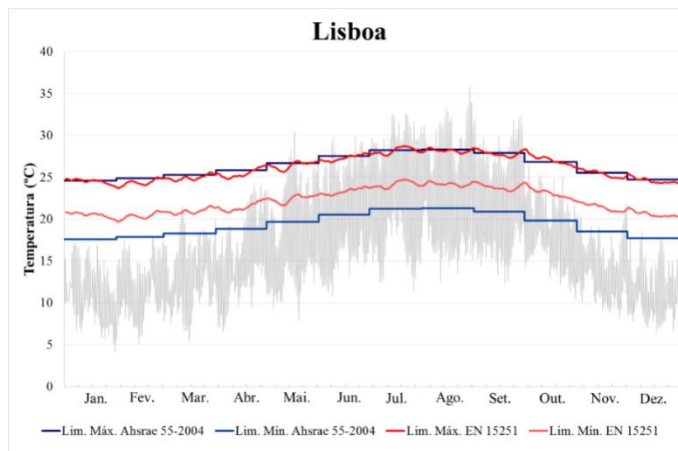


Figura 32 - Aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo em Lisboa

### 3.3 Conclusão

Na Tabela 5, estão resumidos as diferentes temperaturas de conforto para cada local pela observação das figuras anteriores.

Tabela 5 - Temperaturas de conforto para cada local

Local	ASHRAE 55-2004		EN 15251	
	T <sup>a</sup> mínima [°C]	T <sup>a</sup> máxima [°C]	T <sup>a</sup> mínima [°C]	T <sup>a</sup> máxima [°C]
<b>Bogotá</b>	18	25	21	26
<b>Caracas</b>	22	30	25	30
<b>Lima</b>	20	27	23	27
<b>Porto</b>	18	26	20	26
<b>Coimbra</b>	18	26	20	26
<b>Lisboa</b>	18	26	20	26

Optou-se pelas temperaturas de conforto da norma EN 15251, já que esta calcula, de forma ponderada, a temperatura de conforto tendo em conta os valores médios diários da temperatura exterior dos dias anteriores, ao passo que a norma ASHRAE 55-2004 utiliza a temperatura média de cada mês. Considera-se que o cálculo da temperatura de conforto é mais coerente pela norma europeia, tendo em conta os mecanismos de adaptação do corpo ao clima e, ainda, pela sua “memória térmica”.

Deve-se salientar que as temperaturas presentes na Tabela 5 estão calculadas para a categoria I, no entanto a norma europeia classifica os edifícios em quatro categorias distintas, como apresentado na Tabela 6. A diferença entre elas reside na percentagem consentida de ocupantes desconfortáveis, que aumenta com o grau de classificação de forma direta.

Tabela 6 - Descrição da categorização de edifícios presente na norma EN 15251[32]

Categoria	Descrição	%Ocupantes desconfortáveis
<b>I</b>	Grande nível de exigência ao nível do conforto térmico e é recomendado para espaços ocupados por pessoas muito frágeis ou com requisitos especiais.	<6
<b>II</b>	Um nível normal de expectativa de conforto e deve ser usado para novos edifícios ou renovações.	<10
<b>III</b>	Exigência moderada e uma expectativa aceitável de conforto térmico e pode ser usado para edifícios existentes.	<15
<b>IV</b>	Valores excessivos tendo em conta os critérios das categorias supra mencionadas. Esta categoria só deve ser aceite durante um período limitado de tempo durante o ano.	>15

Posto isto, foram calculadas as temperaturas de conforto para cada categoria, presentes na Tabela 7, através das fórmulas expressas na norma EN 15251. [32]

**Tabela 7 - Temperaturas de conforto para cada categoria da norma EN 15251**

Local	Categoria I		Categoria II		Categoria III		Categoria IV	
	T <sup>a</sup> mínima [°C]	T <sup>a</sup> máxima [°C]	T <sup>a</sup> mínima [°C]	T <sup>a</sup> máxima [°C]	T <sup>a</sup> mínima [°C]	T <sup>a</sup> máxima [°C]	T <sup>a</sup> mínima [°C]	T <sup>a</sup> máxima [°C]
	<b>Bogotá</b>	21	25	20	26	19	27	<19
<b>Caracas</b>	25	30	24	31	23	32	<23	>32
<b>Lima</b>	23	27	22	28	21	29	<21	>29
<b>Porto</b>	21	26	20	27	19	28	<19	>28
<b>Coimbra</b>	21	26	20	27	19	28	<19	>28
<b>Lisboa</b>	21	26	20	27	19	28	<19	>28

A dificuldade do alcance do conforto térmico baseada nas referências ou normas leva muitos edifícios a dependerem unicamente de sistemas mecânicos. No entanto, existe uma gama de técnicas de *design* passivo de edifícios que podem ser empregues para evitar esta dependência, assim como o recurso a fontes de energia renováveis que foram abordadas no capítulo anterior e serão adaptadas ao caso de estudo do presente relatório nos capítulos seguintes.

## 4 Caso de estudo: Edifício modular

Neste capítulo pretende-se introduzir o caso de estudo e compará-lo em diferentes perspetivas com os edifícios tradicionais construídos quer em Portugal quer na América Latina.

Uma vez que existe um mercado potencial na utilização de edifícios modulares em países latino-americanos, estes serão comparados com os edifícios típicos dos escalões socioeconómicos mais baixos desta região. Comparar-se-á também o edifício típico português como título representativo de uma construção tradicional do clima mediterrânico.

A comparação basear-se-á nos diferentes materiais utilizados, no modo de construção e no comportamento térmico dos vários tipos de edifícios considerados.

### 4.1 Materiais

A vasta quantidade de materiais de construção existente atualmente e as infinitas possibilidades de combinação destes torna o domínio deste tópico essencial no setor da construção.

A seleção de materiais da envolvente está intrinsecamente relacionada com o comportamento térmico do edifício, disponibilidade no local, assim como com dois fatores económicos, o custo e durabilidade. Por último, a seleção dos materiais determina o impacto ambiental do edifício em todos os aspetos do seu ciclo de vida, desde a construção até à demolição.

#### 4.1.1 Edifício Modular

Cada módulo do edifício é composto por painéis do tipo sanduíche com o interior em poliuretano (PUR) ou poli-isocianurato (PIR) injetado entre duas chapas de aço. Em anexo (“ANEXO E: Módulo Sandwich de Poliuretano”) apresentam-se as propriedades destes materiais e o processo de fabrico utilizado.

A espessura do isolante utilizado também pode variar, geralmente, os painéis de teto produzidos têm 30mm ou 40mm de espessura e os de fachada 40mm ou 60mm. No presente estudo são utilizadas as maiores espessuras. Na cobertura utiliza-se uma chapa de aço.

A instalação da casa modular requer, por indicação da empresa, uma estrutura tal como indicada na Figura 33. Geralmente deve-se recorrer a uma fundação, seguido de uma barreira de vapor e de um isolamento e impermeabilizante. Por último deve-se ser colocado betão armado.

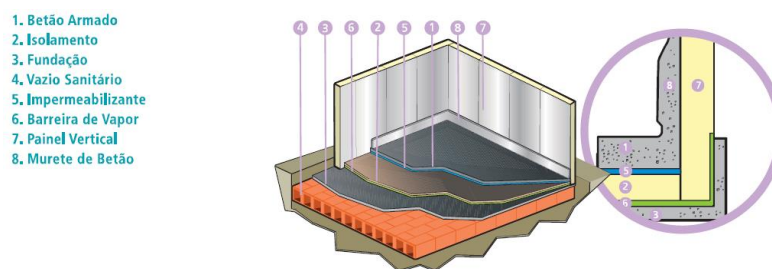


Figura 33 - Instalação da casa modular

Sobre esta estrutura, a empresa desenvolveu um painel industrial de solo que permite um acabamento liso e um encaixe dos módulos. Estes têm uma espessura de 100mm e são compostos por um contraplacado de madeira de bétula finlandesa de 10mm revestido com uma resina fenólica anti deslizante de cor castanha sobre uma placa de poliuretano rígido de 90mm, tal como se pode observar na Figura 34.

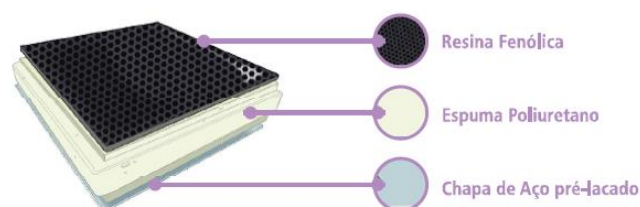


Figura 34 - Painel de solo

As características dos elementos da envolvente, assim como os materiais constituintes e respetivas propriedades térmicas (retirados do LNEC 50 [33]) apresentam-se na tabela seguinte.

Tabela 8 - Caracterização dos elementos da envolvente do edifício modular [33]

Elemento da envolvente	Material	Espessura [m]	Resistência térmica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/Kg.K]
<b>Parede Fachada</b>	Espuma rígida de PUR ou PIR entre paramentos metálicos.	0,060	2,307	35-50	1400-1500
<b>Pavimento em contacto com o solo</b>	Contraplacado de bétula	0,010	0,060	640	1215
	Espuma rígida de PUR	0,090	3,461	35-50	1400-1500
	Betão Armado	0,040	0,024	2150	900
	Espuma rígida de PUR	0,020	0,769	35-50	1400-1500
<b>Teto</b>	Espuma rígida de PUR ou PIR entre paramentos metálicos.	0,040	1,538	35-50	1400-1500
<b>Cobertura</b>	Chapa de metal trapezoidal	0,0005	≈ 0	7860	490

#### 4.1.2 Edifício Português

Tradicionalmente, em Portugal foram adotadas soluções arquitetónicas diferentes consoante a região do país [34]. No entanto, a construção atual no país é praticamente igual, independente das diferenças climáticas, localização geográfica ou estilo de vida dos seus ocupantes[35].

Devido à grande parte da população urbana morar em zonas suburbanas, o sistema construtivo atual é composto maioritariamente por edifícios ou blocos de apartamentos que recorrem a paredes exteriores de alvenaria dupla de tijolo, similares à representada na Figura 35, e a paredes interiores de tijolo simples. As lajes são constituídas por vigotas pré-esforçadas com blocos de cofragem perdida. Cada apartamento tem, usualmente, dois quartos, uma sala e cozinha e tipicamente um ou dois WCs[35]. De salientar que este tipo de construção é recorrente na classe socioeconómica média.

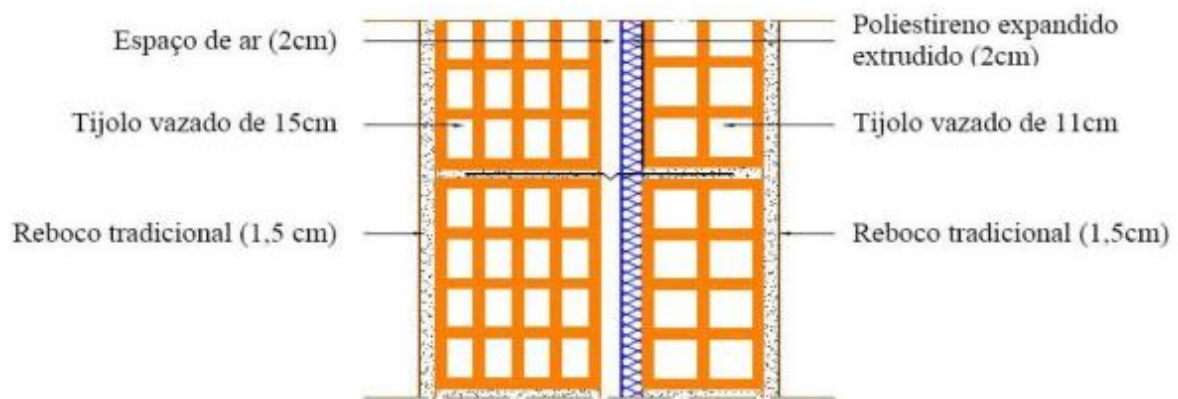


Figura 35 - Parede em alvenaria dupla de tijolo vazado[36]

Na Tabela 9 são descritas as características dos elementos da envolvente. Os materiais constituintes e respetivas propriedades térmicas são apresentados do interior para o exterior[33, 36].

Esta solução tem sido dominante nos últimos 50 anos devido a fatores económicos, pois baseiam-se em materiais, cujas fontes de matérias-primas são abundantes. Além disso, a elevada concorrência no setor, leva a que haja grande número de produtores deste tipo de materiais, pelo que o custo de construção é menor. Pode-se ainda apontar a falta de formação dos técnicos de construção, em que os seus estudos são formatados para as soluções convencionais e a baixa qualificação dos operários de construção, o que coloca um entrave à aplicação de soluções tecnologicamente mais avançadas [35].

Tabela 9 - Envolvente opaca de um edifício típico português[33, 36]

Elemento da envolvente	Material	Espessura [m]	Resistência térmica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/Kg.K]
<b>Parede Exterior</b>	Reboco tradicional	0,02	0,015	1900	900
	Tijolo cerâmico furado de 11cm	0,110	0,270	1100	828
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,02	0,541	32,5	1500
	Espaço de ar não ventilado	0,02	0,175	1,23	1006
	Tijolo Cerâmico furado de 15cm	0,150	0,390	1200	828
	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
<b>Cobertura</b>	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
	Espaço de ar ventilado	0,020	0,175	1,23	1006
	Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,050	1,351	32,5	1500
	Laje aligeirada de cerâmica	0,130	0,113	1800	920
	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
<b>Parede interior</b>	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
	Tijolo cerâmico furado de 11mm	0,110	0,270	1100	828
	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
<b>Laje de pavimento interior</b>	Soalho em madeira (carvalho)	0,020	0,111	650	2000
	Betão armado	0,040	0,024	2150	900
	Laje aligeirada de cerâmica	0,120	0,104	1800	920
	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
<b>Laje de pavimento em contacto com o solo</b>	Soalho em madeira (carvalho)	0,020	0,111	650	2000
	Betão armado	0,040	0,024	2150	900
	Laje aligeirada de cerâmica	0,120	0,104	1800	920
	XPS	0,020	0,541	32,5	1500

#### 4.1.3 Edifício Latino-Americano

Tradicionalmente, os edifícios são construídos baseados na experiência e utilizando materiais como madeira, barro, blocos de cimento, tijolos de adobino, pedra ou tijolo. Os pavimentos são constituídos por lajes aligeiradas e blocos de betão normal. Este tipo de construção é preponderante em áreas rurais e na periferia de grandes centros urbanos e são pertencentes a classes sociais mais baixas[37].

Este tipo de edifícios, nos grandes centros urbanos, estão localizados nos designados bairros de lata, isto é, assentamentos urbanos informais e densamente povoados que surgiram como resposta da população sem capacidade económica para adquirir uma habitação[38, 39].

Os países em desenvolvimento, designadamente os da América Latina, tiveram uma elevada taxa de urbanização durante a última metade do século XX resultado do êxodo rural, o que levou à procura enorme por habitações. No entanto, o mercado imobiliário não conseguiu acompanhar o rápido crescimento populacional e, aliado à pobreza, à sobre população e à má conceção e orientação das políticas governamentais e de planeamento urbano, surgiu este tipo de assentamento urbano. Atualmente, esta construção totaliza um quarto de todas as habitações urbanas na América Latina[38, 39].

Os edifícios começam por ser construídos com materiais temporários, em que as paredes são de bambu, geralmente cobertas com plástico e com uma cobertura de telhas ou chapas de aço. O objetivo dos ocupantes destas estruturas é consolidar a sua habitação gradualmente, pretendendo-se atingir um edifício de tijolo ou em blocos de cimento com uma cobertura com uma chapa de metal, de fibrocimento ou telhas[37].

Devido ao elevado número e diversidade de materiais passíveis de serem utilizados, assumiu-se que o edifício é constituído pelos materiais presentes na Tabela 10. Além disso, como é visível pela Figura 36, a maior parte destes edifícios não possui um telhado, apenas a cobertura horizontal.

Analogamente, o edifício considerado tem uma cobertura horizontal ao contrário dos dois edifícios anteriores que possuem um telhado de duas águas.

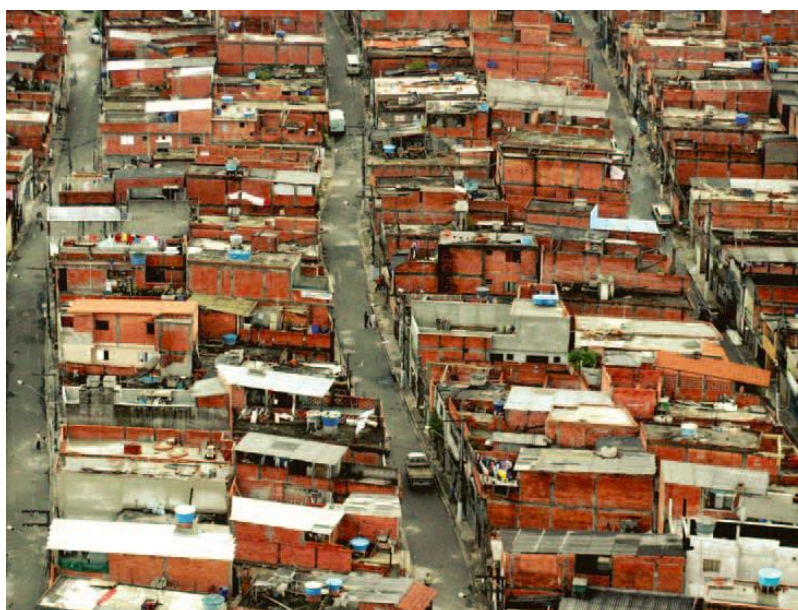


Figura 36 - Assentamentos informais na América Latina [39]

Tabela 10 - Envolvente opaca de um edifício típico latino-americano [33]

Elemento da envolvente	Material	Espessura [m]	Resistência térmica [m <sup>2</sup> K/W]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/Kg.K]
<b>Parede Exterior</b>	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
	Tijolo Cerâmico furado de 15cm	0,150	0,390	1200	828
	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
<b>Cobertura</b>	Placas de fibrocimento com fibras de amianto	0,008	0,65	1600	1600
<b>Parede interior</b>	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
	Tijolo cerâmico furado de 11cm	0,110	0,270	1100	828
	Reboco tradicional	0,020	0,015	1900	900
<b>Laje de pavimento em contacto com o solo</b>	Betão (Betonilha de assentamento ou de regularização)	0,040	0,024	2150	900
	Laje aligeirada de cerâmica	0,120	0,104	1800	920

## 4.2 Modo de construção

O estudo do modo de construção é significativo em dois aspetos distintos. Por um lado, está relacionado com fatores económicos, dos quais se destacam, o custo total do edifício, a produtividade e o tempo de construção. Por outro lado, deve-se ter em conta o impacto ambiental, como o transporte dos diferentes materiais, a utilização de recursos disponíveis no local de edificação e os resíduos resultantes da atividade de construção.

### 4.2.1 Edifício Modular

A habitação é construída através de módulos que se encaixam no sentido longitudinal mediante um sistema de encaixe macho-fêmea, como se pode observar na Figura 37. Não só a produção dos módulos é assegurada pela própria empresa que possui unidades industriais próprias e certificadas, como também a montagem dos mesmos.



Figura 37 - Sistema de encaixe macho-fêmea dos módulos

Para a montagem da casa é necessário assegurar um terreno com uma superfície lisa e a ligação à rede elétrica, de abastecimento de água e drenagem de esgotos, sendo que a construção se conclui em três dias. O aspeto mais importante é que não gera qualquer desperdício, no entanto os materiais utilizados não estão disponíveis no local.

#### **4.2.2 Edifício Português**

O processo de construção de um edifício envolve geralmente várias fases. Começa-se por estabelecer as bases, na qual são realizadas escavações até à profundidade necessária, sendo a superfície do terreno alisada para a tornar viável para a construção (geralmente sobrepõe-se camadas de cascalho ou terra). Em seguida, a estrutura do edifício é definida através da construção das fundações, em betão, que formam o perímetro do edifício e são utilizadas para distribuir o peso de forma uniforme. A espessura das fundações é dimensionada tendo em conta a carga a suportar. Além disso, são definidos os pisos em cada andar e é colocada a cobertura no telhado ou terraço.

Após a fase da estrutura, dá-se a construção da envolvente e a divisão do espaço através da edificação das paredes exteriores e interiores. Em seguida, a construção é orientada para o interior do edifício, dá-se a ligação à rede através da instalação elétrica e de tubagens e colocação do isolamento e janelas. Por último, são realizados todos os acabamentos necessários.

#### **4.2.3 Edifício Latino-Americano**

O processo de construção deste edifício é lento e progressivo, sendo continuamente consolidados, à medida que mais divisões são adicionadas e as instalações melhoradas, consoante o rendimento económico dos ocupantes. [37-39]

Paralelamente, a construção de um assentamento deste tipo de edifícios é dividida em três fases distintas: ocupação, transição e, por fim, a consolidação. A ocupação começa pela construção rudimentar de um edifício por parte de uma pessoa. Esta ocupação pode ser ilegal ou o terreno é comprado sem, no entanto, cumprir normas ou pertencer a uma zona para uso residencial. Quando a ocupação não tem oposição pelas autoridades ou proprietários dos terrenos, dá-se início à fase de transição. Durante este período, mais edifícios são construídos à medida que uma sociedade se forma. O assentamento urbano aumenta e, conseqüentemente, as necessidades de serviços básicos começam a ser exigidas ao estado e governos locais. A consolidação ocorre quando toda a infraestrutura necessária para assegurar os serviços básicos são construídos. [38, 39]

Este tipo de habitação evita a regulação e padrões excessivos e permite que o edifício seja melhorado ao longo do tempo e ajustado à situação económica dos ocupantes.

### 4.3 Comportamento térmico

O estudo do comportamento térmico de cada edifício será obtido através de simulações dinâmicas, assumindo-se que todos têm as mesmas dimensões do que a habitação modular. A simulação não será só realizada nas três cidades latino-americanas, como também nas principais cidades portuguesas, tal como já foi referido.

Para uma comparação pormenorizada entre os diferentes edifícios, estes serão submetidos a três casos diferentes:

- **Caso 1 - Sem controlo de ventilação:** Pretende-se verificar qual a variação da temperatura em cada edifício apenas através dos ganhos internos e solares, existindo apenas infiltrações com um constante de 0,6 renovações por hora<sup>5</sup>.
- **Caso 2 - Ventilação mecânica:** Estudar-se-á o comportamento do edifício quando sujeito a uma ventilação mecânica associada a um sistema que liga assim que a temperatura do edifício se aproxima do limite máximo de conforto térmico, mantendo os critérios do caso I.
- **Caso 3 - Ventilação natural:** Pretende-se investigar o comportamento do edifício quando sujeito à ventilação natural através das aberturas existentes. Considera-se a abertura das janelas quando a temperatura do edifício se aproxima do limite máximo de conforto térmico, mantendo os critérios do caso I.

Em cada caso, a diferença baseia-se no controlo ou não de ventilação segundo os critérios acima. Estes três casos avaliarão o comportamento térmico do edifício quando sujeito a métodos de arrefecimento passivo (caso II e III) comparativamente ao caso de referência (caso I). Para tal, serão realizadas diferentes simulações de comportamento térmico numa base anual. Por um lado, pretende-se caracterizar quantitativamente o edifício através do cálculo das necessidades de aquecimento, de arrefecimento, das perdas por infiltrações e da envolvente. Para realizar esta caracterização devem ser aplicados os critérios de conforto térmico, como referenciado no capítulo “3 Clima e conforto térmico”, nomeadamente na Tabela 5. Por outro lado, realizar-se-á também uma caracterização qualitativa, seguindo a classificação presente na norma EN 15251, na qual os edifícios são categorizados consoante o número de horas anuais em que os ocupantes se sentem confortáveis, de acordo com os critérios pré-definidos por esta norma.

Após a definição dos diferentes casos, é necessário optar por um *software* que permita realizar simulações dinâmicas. Atualmente, existem dois programas de referência na simulação de edifícios: EnergyPlus e TRNSYS. A escolha para o presente estudo recaiu no último software, com a versão 16 (TRNSYS 16), já que apesar do primeiro trabalhar em conjunto com o Google SketchUp, possuindo a vantagem de se obter a construção rápida da habitação em 3D, tal como representado na Figura 38, o TRNSYS 16 tem uma gama de opções mais alargada. A informação referente a estes programas e o seu modo básico de funcionamento está presente no “ANEXO F: Comparação entre software”.

Após a escolha do programa, a sua aplicação só é possível através da definição de diferentes parâmetros, mas em alguns casos essa informação não se encontrou possível. Como resultado, foi necessário assumir determinados valores compatíveis com os critérios muitas das vezes semi-empíricos. No “ANEXO G: Parâmetros da simulação” estão relatados todos os critérios assumidos e os diferentes casos que perfazem esta análise.

---

<sup>5</sup> Taxa de referência da renovação do ar para garantia da qualidade do ar interior.

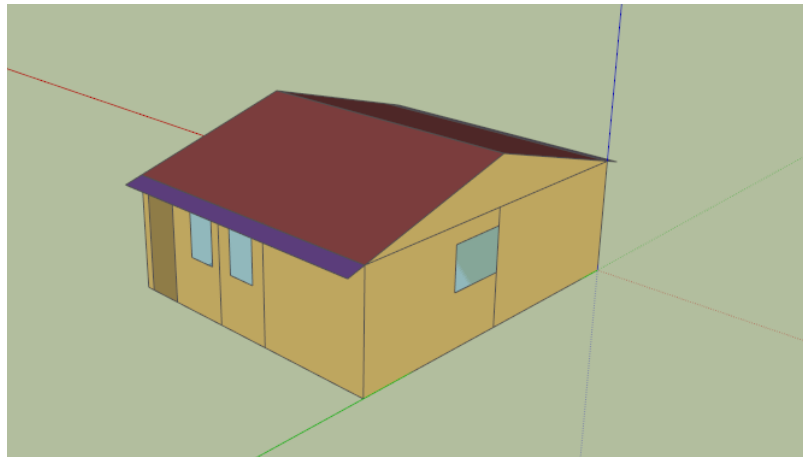


Figura 38 - Construção da habitação através do Google SketchUp

#### 4.3.1 Caso I – Simulação do edifício sem ventilação

No primeiro caso pretendeu-se fazer uma análise simples de cada edifício. Ao considerar-se o controlo da ventilação inexistente, apenas os ganhos internos, solares e as perdas por infiltração e através da envolvente são considerados. Na Figura 39 e na Figura 40 encontram-se as necessidades de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, que foram obtidas por simulação para os diferentes edifícios.

Em relação às necessidades de aquecimento, pode-se observar que, em todos os locais de estudo, a casa portuguesa apresenta os melhores resultados comparativamente aos restantes casos. Pelo contrário, o edifício latino-americano ostenta as necessidades de aquecimento mais elevadas. De salientar que na capital venezuelana, num clima quente, o edifício português é o único que não tem qualquer necessidade de aquecimento.

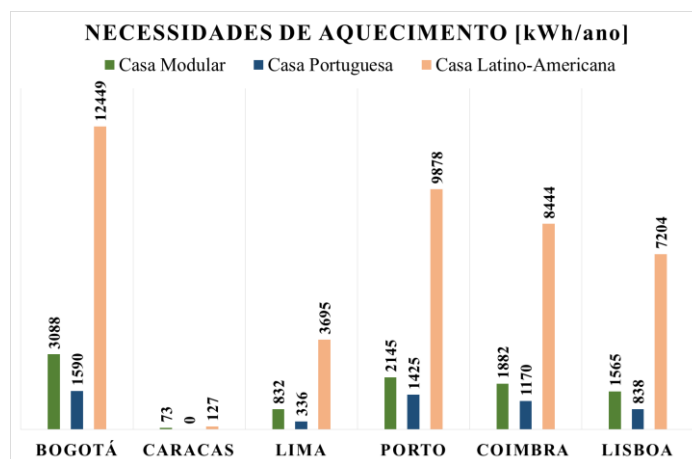


Figura 39 - Necessidades de aquecimento de cada edifício

Relativamente às necessidades de arrefecimento, a casa portuguesa, novamente, exhibe os menores valores em todos os locais. No entanto, neste ponto, é o edifício modular que claramente tem as maiores necessidades energéticas comparativamente aos outros edifícios. Neste caso, é na capital colombiana, num clima frio, que a habitação portuguesa é a única que não tem qualquer necessidade de arrefecimento.

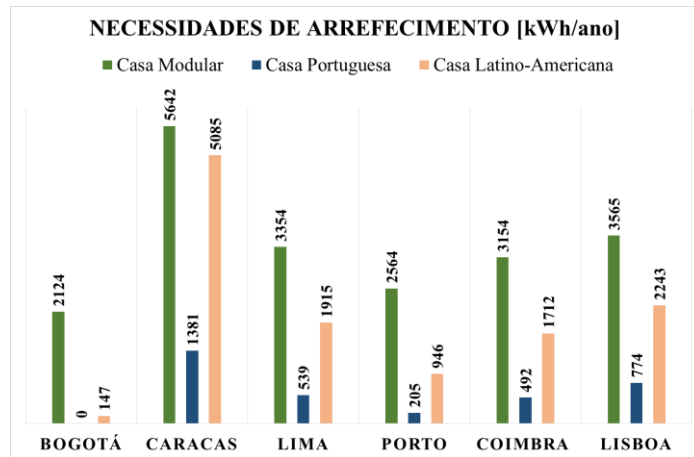


Figura 40 - Necessidades de arrefecimento de cada edifício

A análise das perdas por condução através da envolvente e através de infiltrações apresenta-se bastante interessante (Figura 41 e Figura 42, respetivamente). No primeiro caso (Figura 41) verifica-se que, em todas as cidades, a casa modular apresenta as menores perdas, contrariamente à casa latino-americana que apresenta as maiores perdas. No segundo caso (Figura 42), os valores em todos os edifícios são muito similares, realçando-se apenas que a casa modular apresenta maiores perdas em todos os locais, exceto em Caracas.

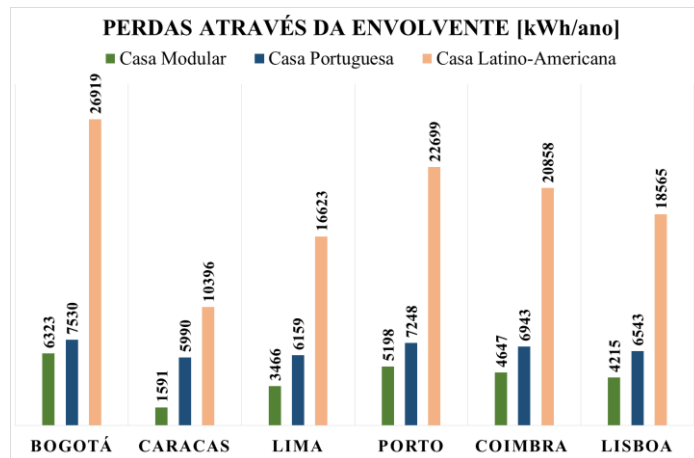


Figura 41 - Perdas energéticas através da envolvente em cada edifício

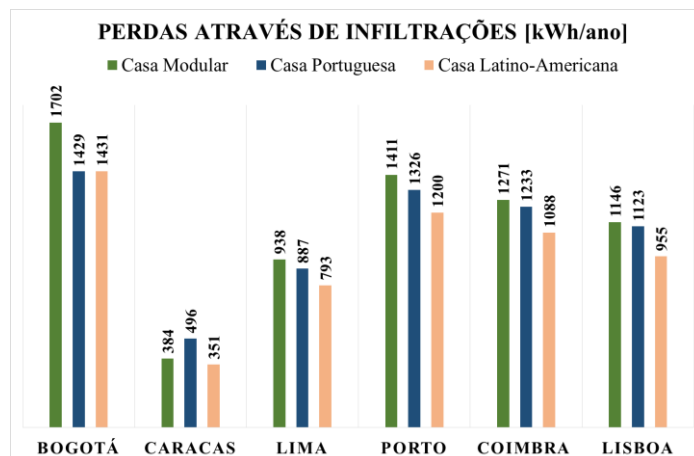


Figura 42 - Perdas energéticas através de infiltrações em cada edifício

Para além da caracterização quantitativa das necessidades energéticas do edifício, realizou-se também uma caracterização qualitativa. Esta foi conseguida através da classificação presente na norma EN 15251. Assim, simulou-se novamente os diferentes edifícios, obtendo-se os resultados representados nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45. Numa perspetiva geral, observando os resultados expostos, pode-se concluir que o edifício português se apresenta como a melhor solução para todos os locais selecionados.

Numa análise individual, o edifício modular (Figura 43) tem um comportamento mais adaptado ao clima de Caracas e Lima, sendo que tem o pior resultado em Bogotá. Nesta cidade, o edifício cumpre os requisitos de temperatura interior da categoria III apenas 30% das horas anuais.

O edifício português (Figura 44), similarmente ao modular, tem os melhores resultados para Lima e Caracas, sendo que na capital peruana atinge a categoria III. Nas cidades portuguesas obteve-se o resultado esperado com a categoria III em 75% das horas anuais. Um resultado assinalável é a amplitude de categorias em Bogotá, pois atinge os parâmetros de conforto da categoria II em apenas 30% das horas anuais, mas a categoria III corresponde a cerca de 80% das horas anuais. Esta amplitude entre as categorias é a maior entre todos os casos considerados.

Por último, o edifício típico latino-americano (Figura 45) obteve claramente o melhor resultado em Caracas e o pior em Bogotá. Nas restantes cidades obteve resultados intermédios, com a categoria III a atingir 40% das horas anuais em Portugal e 60% em Lima. Pode-se inferir que este edifício, ao nível de conforto, está adaptado a climas mais quentes, como o de Caracas

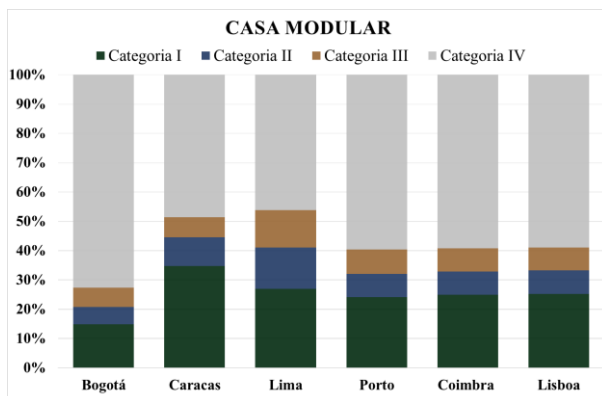


Figura 43 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício modular

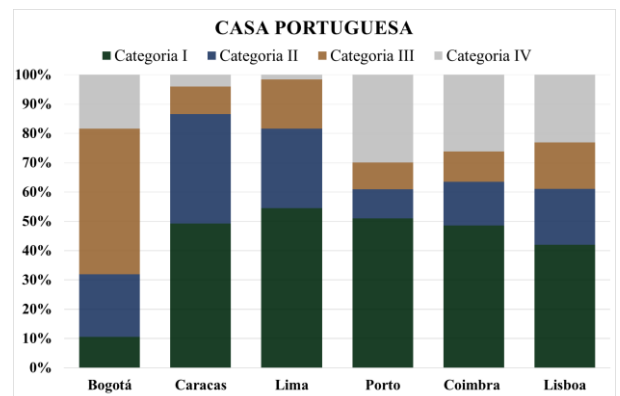


Figura 44 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício português

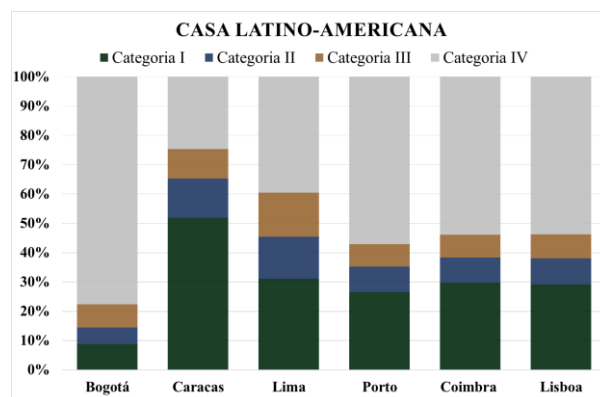


Figura 45 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício latino-americano

Os resultados obtidos estão estritamente ligados a duas variáveis que influenciam os ganhos e perdas energéticas. Examinando o edifício, este tem envidraçados em todas as suas paredes, dos quais apenas os que estão virados a Sul e a Norte têm sombreamento devido ao beiral da cobertura, o que gera elevados ganhos solares. Em relação aos parâmetros da simulação, as infiltrações correspondem a 0,6rph e não existe outro tipo de ventilação, o que afeta negativamente eventuais arrefecimento gratuitos. Por outro lado, os materiais utilizados e o tipo de construção definem o comportamento em termos de inércia e resistência térmica à transferência de calor.

No caso do edifício típico português, a sua construção cuidada com materiais mais pesados e a introdução de isolamento na sua envolvente permite manter a temperatura praticamente constante no interior, daí as suas reduzidas necessidades energéticas em todos os locais de estudo e a obtenção da categoria III em *free floating* em Caracas e Lima.

Pelo contrário, o edifício modular praticamente não tem inércia térmica, ou seja, não tem a capacidade para contrariar as variações de temperatura exterior, já que os elementos da sua envolvente não possuem características que lhe permitam acumular energia. Assim, diariamente, a temperatura interior aumenta devido aos elevados ganhos solares e durante a noite, apesar das propriedades de isolamento dos módulos PUR, decresce acompanhando sempre a variação da temperatura exterior, possuindo um comportamento semelhante a uma estufa. Por esta razão, as suas necessidades de arrefecimento são da mesma ordem de grandeza do que as de aquecimento, mesmo em climas frios como o de Bogotá.

Por último, pode-se considerar o edifício típico latino-americano como um caso intermédio, já que possui inércia térmica menor que o edifício típico português e não possui qualquer isolamento. Este facto leva que as perdas através da envolvente sejam muito elevadas e, conseqüentemente as necessidades de aquecimento o sejam também. As suas necessidades de arrefecimento são o intermédio entre o edifício modular e o edifício português, devido à inércia térmica presente. O edifício latino-americano, devido à inexistência de isolamento, apresenta maus resultados em Bogotá, já que os ganhos internos e solares não compensam as perdas para o exterior. No entanto, o facto de este edifício ter inércia térmica permite que este obtenha resultados satisfatórios nos restantes locais estudados.

Como sustentação destes argumentos, a Figura 46 e Figura 47 representam a variação da temperatura na sala/cozinha em cada edifício durante a primeira semana de Fevereiro em *free floating* no Porto e Caracas, respetivamente. O mês de diferença em relação ao início do ano deve-se à convergência necessária do programa, pois foi necessário arbitrar uma temperatura inicial. A escolha destas cidades deve-se ao facto de serem climas completamente distintos. Porém, é notório que o comportamento dos edifícios é semelhante nas duas cidades.

No edifício modular, existe uma grande variação da temperatura devido à inexistência de inércia térmica. No período diurno, devido aos elevados ganhos solares, a temperatura tem um crescimento acentuado, ao passo que no período noturno decresce rapidamente. Verifica-se que a sua temperatura interior acompanha a temperatura no exterior.

Do lado oposto, o comportamento térmico da habitação portuguesa, que devido à sua inércia térmica e presença de isolamento, consegue manter a temperatura interior praticamente constante ao longo da semana de estudo, principalmente em Caracas. Como seria de esperar, o edifício latino-americano tem um comportamento intermédio entre o modular e o português.

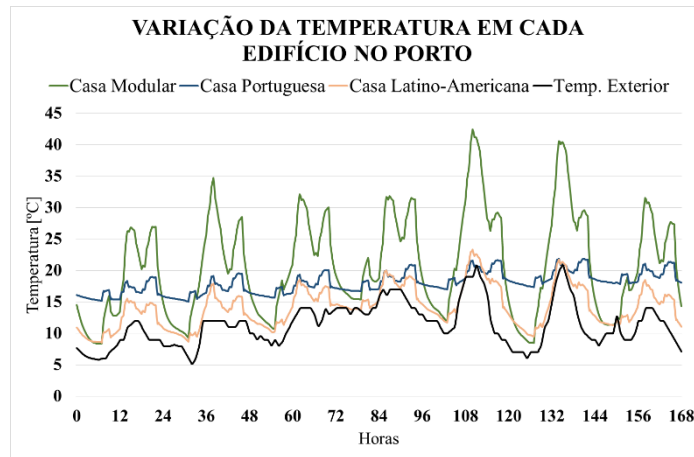


Figura 46 - Variação da temperatura em cada edifício durante uma semana no Porto

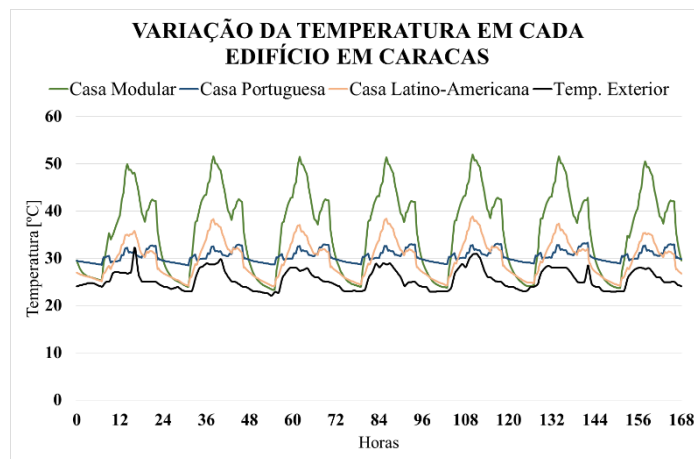


Figura 47 - Variação da temperatura em cada edifício durante uma semana em Caracas

Devido às elevadas necessidades de arrefecimento verificadas neste caso, é interessante estudar como o edifício se comporta se se utilizar um método de arrefecimento passivo – tal como, a ventilação. Assim, no caso II o edifício será simulado com a presença de ventilação mecânica, ao passo que no caso III existirá a possibilidade de utilizar a ventilação natural.

#### 4.3.2 Caso II – Simulação do edifício com ventilação mecânica

No segundo caso pretendeu-se determinar qual seria a influência da introdução de ventilação mecânica no comportamento térmico do edifício. Os valores considerados, presentes na Figura 48, resultam de uma avaliação semi-empírica. Quando a diferença entre a temperatura interior e exterior é pequena (entre 0°C e 2°C), assumiu-se que os gastos energéticos devido à utilização de um ventilador não compensariam recorrer à ventilação.

O limite associado à sensação de conforto térmico dos ocupantes é, aproximadamente, 8 renovações por hora (rph). Assim, salvaguardou-se uma diferença de 2rph entre o máximo adotado e o limite. Considerou-se, dessa forma, um valor máximo de 6rph, entre 2°C e 4°C de diferença de temperaturas entre interior e exterior.

Visto que, quanto maior a diferença entre temperaturas, menor o volume de ar que é necessário insuflar, adotou-se, a partir deste valor limite, uma razão de proporcionalidade inversa entre as taxas de ventilação e a diferença de temperaturas. Assim, entre 4° e 6°C de diferença, assumiu-se uma taxa de ventilação de 4rph e para diferenças superiores a 6°C, a ventilação reduzia-se para 2rph, sendo este o valor mínimo considerado para haver arrefecimento.

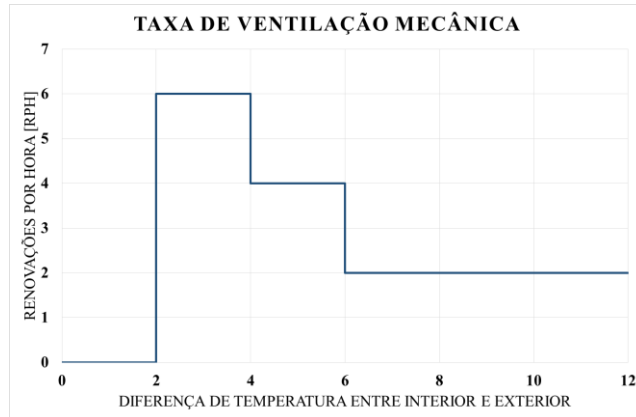


Figura 48 - Taxas de ventilação mecânica adotadas no caso II

Analogamente ao caso anterior, foram calculadas as necessidades de aquecimento e arrefecimento para cada cidade, representadas na Figura 49 e na Figura 50, respetivamente.

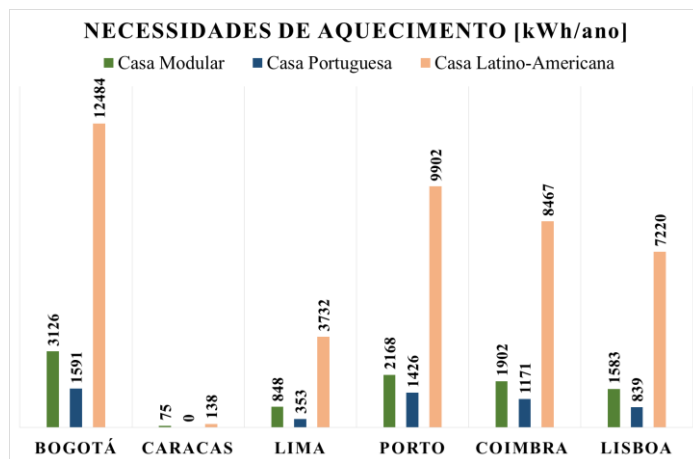


Figura 49 - Necessidades de aquecimento de cada edifício

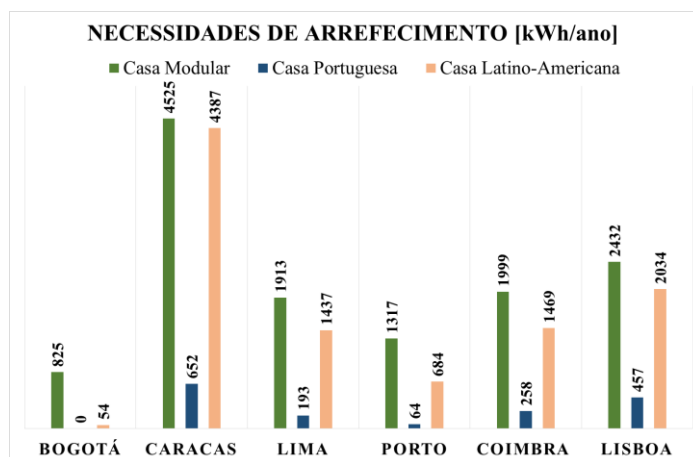


Figura 50 - Necessidades de arrefecimento de cada edifício

Numa perspetiva geral, a distribuição das necessidades energéticas em cada edifício mantém-se igual ao caso anterior, já que, em todos os locais, é o edifício latino-americano que tem as maiores necessidades de aquecimento e o edifício modular que tem as maiores necessidades de arrefecimento.

A introdução da ventilação é um modo de arrefecimento passivo e, que observando os resultados obtidos e comparando-os com a Figura 40, conclui-se que é um método efetivo de diminuir as necessidades energéticas do edifício, sendo que tem maior influência na habitação modular do que nas restantes.

Em relação às perdas por condução através da envolvente e através de infiltrações, representadas nas Figura 51 e Figura 52. Em ambos os casos, os valores mantêm-se praticamente iguais ao caso anterior, não havendo uma diferença significativa que se possa assinalar.

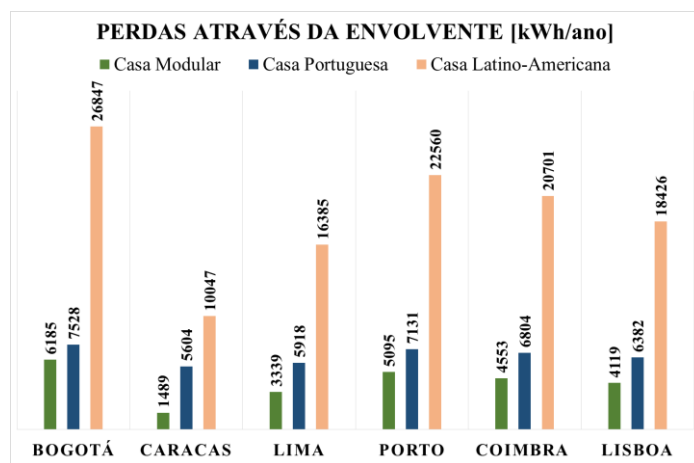


Figura 51 - Perdas energéticas através da envolvente em cada edifício

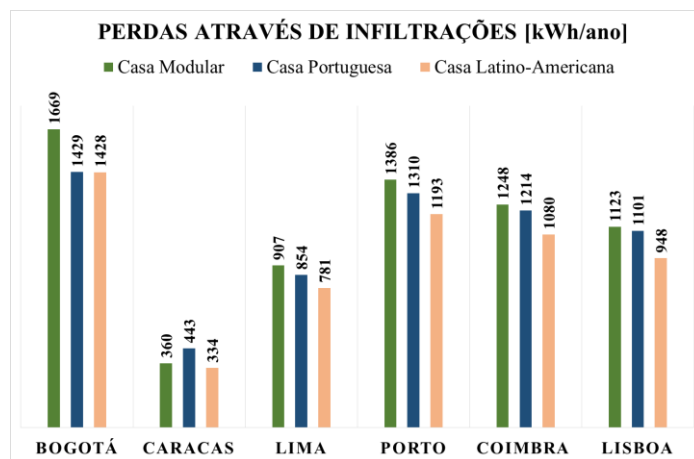


Figura 52 - Perdas energéticas através de infiltrações em cada edifício

Por último, a classificação segundo a norma EN15251, exibida nas Figura 53, Figura 54 e Figura 55, revelou, como seria de esperar, uma melhoria significativa na obtenção do conforto térmico para os edifícios em todas as cidades em estudo. Esta ilação complementa o facto de ser possível reduzir as necessidades energéticas do edifício através da ventilação, o que significa

que a introdução deste método de arrefecimento passivo permite melhorar o comportamento do edifício quer em termos quantitativos quer qualitativos.

Analisando cada edifício particularmente, o edifício modular melhorou significativamente o número de horas confortável em cada local, sendo que a localização em Caracas e em Lima continuam a ser as mais favoráveis.

Em relação ao edifício português, este tem resultados muito bons em Caracas e Lima, sendo que atinge a categoria III nos dois locais, especialmente na capital venezuelana atinge praticamente a categoria II. Além disso, nas restantes cidades, o edifício atinge a classificação da categoria III, em média, 80% das horas anuais. Por último, o edifício latino-americano tem melhores resultados claramente para Caracas, atingindo 80% de horas anuais de conforto e os piores para Bogotá, na qual atinge cerca de 20% de conforto num ano. Nas restantes cidades apresenta valores razoáveis, a rondar os 50%.

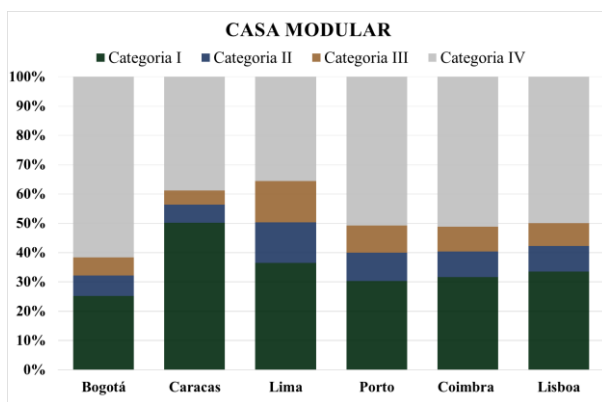


Figura 53 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício modular

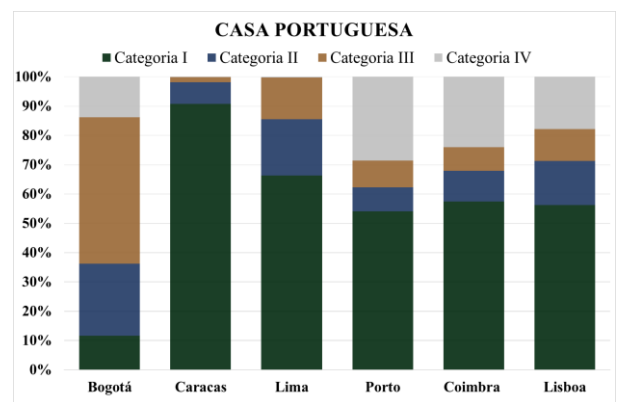


Figura 54 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício português

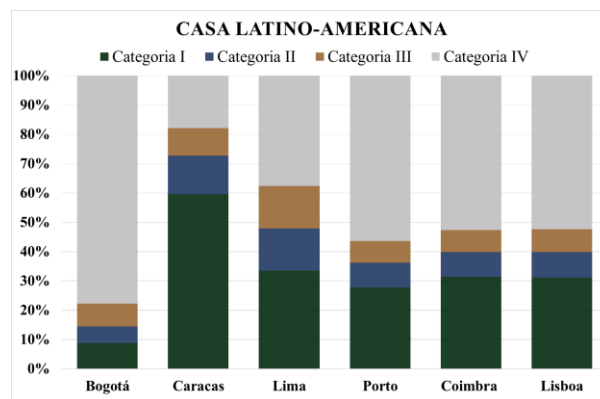


Figura 55 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício latino-americano

#### 4.3.3 Caso III - Simulação do edifício com ventilação natural

No último caso analisou-se a influência da ventilação natural no comportamento térmico do edifício. Para tal, recorreu-se a um *software* denominado COMIS (*Conjunction of Multizone Infiltration Specialists*) que trabalha em conjunto com o TRNSYS 16. O modelo desenvolvido no COMIS permite calcular o fluxo de ar e as distribuições de contaminantes nos edifícios e

simula diferentes componentes que influenciam estes parâmetros, tais como fendas, aberturas (janelas e/ou portas), condutas, ventiladores, entre outros. O *software* permite ao utilizador definir horários de funcionamento dos ventiladores, abertura de janelas e portas, dados meteorológicos, concentração de poluentes e distribuição da temperatura interior.

Assim, foram arbitrados valores para constituir o perfil de abertura de janelas em função da diferença entre temperatura interior e exterior, representado na Figura 56. A ventilação natural ocorre devido a uma diferença de pressão entre o local de entrada e de saída do ar, que por sua vez se deve a uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior e/ou devido ao vento. Assim, de forma a garantir um maior efeito de arrefecimento, considerou-se a abertura das janelas a partir de uma diferença de 2°C.

Além deste pressuposto, considerou-se que entre 2° e 4°C, a janela estaria aberta em 50%. Dos vários tipos de janelas existentes, a janela de correr é a mais crítica, já que o seu valor máximo de abertura corresponde a 50%. Assim, optou-se por considerar este valor com o conhecimento de que se se utilizassem outros tipos de janelas seria possível abrir mais a janela e, consequentemente, obter maiores taxas de ventilação. Esta questão deverá ser analisada num trabalho futuro.

Para diferenças de temperatura entre 4° e 6°C e superiores a 6°C, adotou-se uma abertura de janela de 20% e 10%, respetivamente. Estes valores foram considerados, tendo em conta que quanto maior a diferença de temperatura, menor o volume de ar que se deve introduzir no edifício para o arrefecer. A redução das taxas de ventilação é obtida através de uma menor abertura da janela.

Pode-se, assim, concluir que o perfil de aberturas das janelas foi obtido através de uma avaliação semi-empírica. Contudo, este pode ser um tema a explorar em outros trabalhos futuros no sentido de otimizar tempos e áreas de abertura.

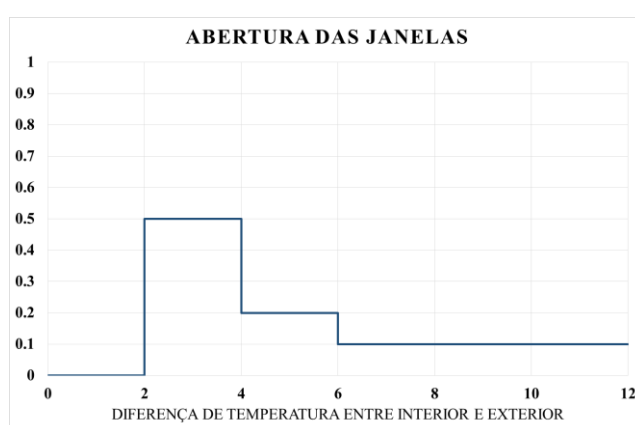


Figura 56 - Abertura das janelas necessárias à simulação da ventilação natural

Iniciando a análise através das necessidades de aquecimento e arrefecimento, representados na Figura 57 e Figura 58, o edifício português continua a ter resultados assinaláveis quando comparados quer com o edifício modular quer com o latino-americano.

Na comparação destes dois últimos, a habitação latino-americana tem, analogamente aos casos anteriores, as maiores necessidades de aquecimento. No entanto, no que toca ao arrefecimento, a introdução de ventilação natural permite que as necessidades energéticas do edifício modular

sejam inferiores às do edifício latino-americano em Caracas e Lisboa, ao contrário do que sucedeu nos estudos anteriores.

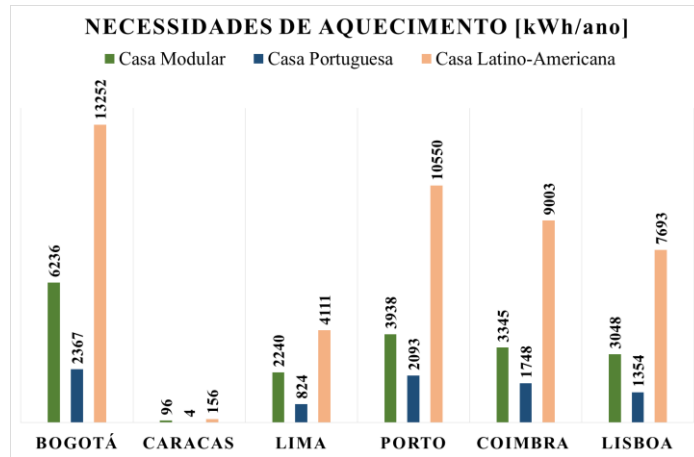


Figura 57 - Necessidades de aquecimento de cada edifício

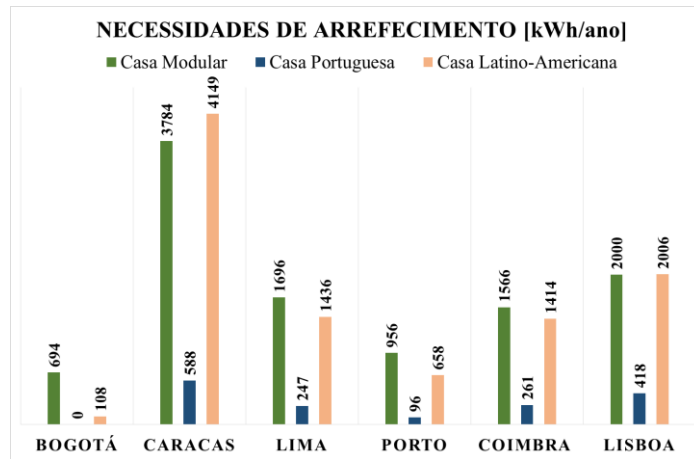


Figura 58- Necessidades de arrefecimento de cada edifício

Tendo em conta o estudo das perdas por condução através da envolvente e através de infiltrações, presente nas Figura 59 e Figura 60. Em todas as cidades, existe menores perdas quer por infiltrações quer através da envolvente, mas esta diferença não é significativa.

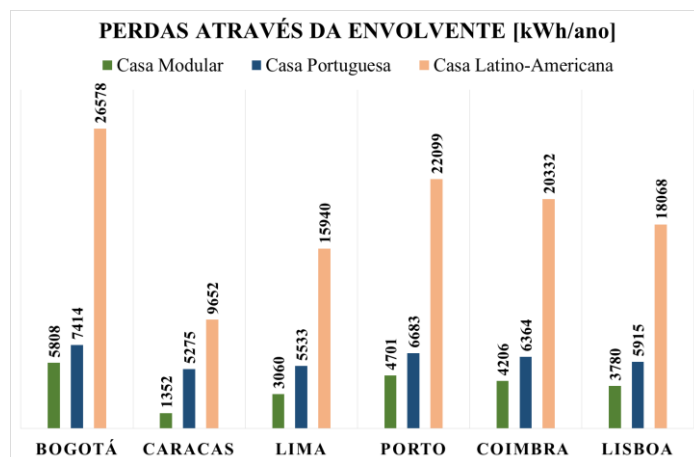


Figura 59 - Perdas energéticas através da envolvente em cada edifício

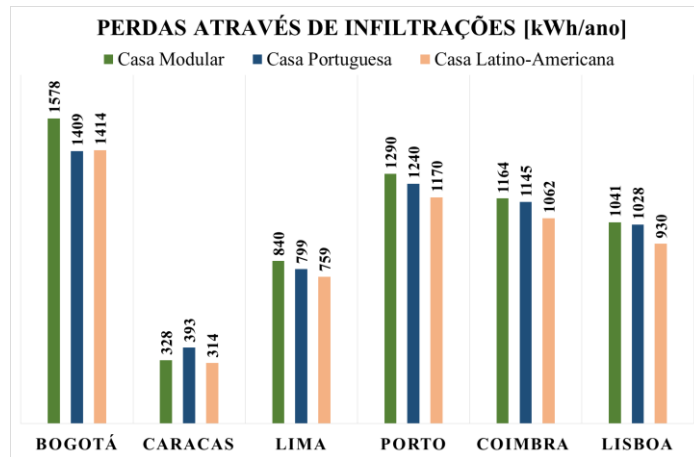


Figura 60 - Perdas energéticas através de infiltrações em cada edifício

Observando a Figura 61, Figura 62 e Figura 63, respeitantes à classificação dos edifícios em *free floating*, pode-se concluir que a ventilação natural é prejudicial no edifício português, já que reduz o número de horas confortáveis em todos locais, exceto em Caracas. Neste local, atinge-se, com o recurso à ventilação natural, a categoria II de conforto térmico.

Quanto ao edifício modular, a resposta deste é bastante aceitável, já que existe uma melhoria comparativamente ao caso II em todas as cidades. Esta melhoria é principalmente visível em Caracas, já que passa dos 60% de conforto na categoria III para 75%. Por último, o edifício latino-americano não apresenta diferenças significativas em relação ao caso anterior.

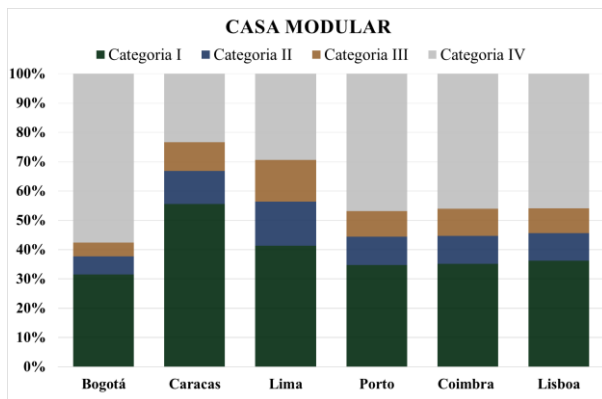


Figura 61 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício modular

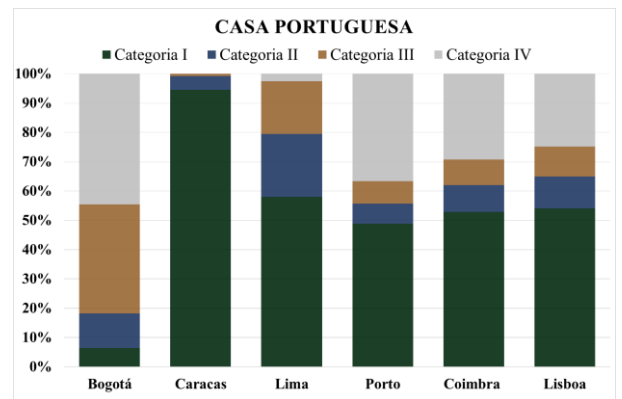


Figura 62 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício português

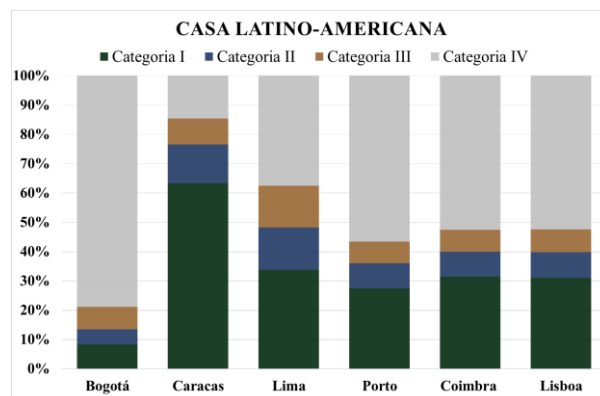


Figura 63 – Classificação, segundo a EN 15251, do edifício latino-americano

#### 4.4 Conclusão

Ao longo deste capítulo procedeu-se à comparação entre o caso de estudo e os edifícios típicos de Portugal e da América Latina, correspondente a escalões socioeconómicos mais baixos.

Em primeiro lugar, foram comparados os materiais e modo de construção de cada edifício. Em relação aos materiais utilizados o edifício modular recorre a painéis do tipo sanduíche com o interior em poliuretano injetado entre duas faces de chapa de aço. Caracteriza-se por uma envolvente com isolamento, mas sem inércia térmica. O edifício português tem uma envolvente composta por uma parede dupla de tijolo, com caixa-de-ar e isolamento (geralmente XPS), o que garante um compromisso entre inércia térmica e isolamento. O edifício latino-americano é caracterizado por uma infraestrutura fraca em que os seus ocupantes utilizam uma miríade de materiais, melhorando a sua habitação gradualmente. Geralmente, não possuem isolamento.

Analogamente, o modo de construção é completamente díspar entre os edifícios. O edifício modular tem uma construção rápida através de um sistema de macho-fêmea, em que a construção demora apenas 3 dias, ao passo que o edifício latino-americano tem uma construção lenta e progressiva que dura anos. No intermédio, surge o edifício português com uma construção que segue as características da chamada tradicional.

O último parâmetro de comparação foi o comportamento térmico. Este manifesta-se como o mais interessante a nível empresarial, já que se pode traduzir numa vantagem competitiva para a empresa. Concluiu-se que o edifício português tem o melhor comportamento para todos os locais, no entanto este não é uma referência na América Latina.

O edifício modular não consegue contrariar as variações da temperatura exterior devido à inexistência de inércia térmica, o que eleva bastante as necessidades de arrefecimento comparativamente aos restantes edifícios. A introdução de ventilação é uma medida eficaz na redução das mesmas, mas não suficiente.

Após esta comparação entre edifícios e a obtenção dos dados procedentes das simulações, deve-se agora realizar o tratamento destes e retirar informação que seja relevante em termos empresariais. Assim, no capítulo seguinte será realizada a discussão dos resultados obtidos.

## 5 Discussão dos resultados obtidos

Através do conhecimento técnico, pretende-se neste ponto analisar os resultados obtidos nas simulações e, a partir destas, retirar orientações úteis a um nível empresarial e que auxiliam a tomada de decisão no que toca a investimentos.

Assim, este capítulo será dividido em duas secções distintas. Na primeira será realizada uma comparação dos resultados obtidos nos diferentes casos para o edifício modular, o que permite obter uma perspetiva de como o comportamento da habitação modular varia consoante o clima. Na segunda, será comparado o edifício modular com o edifício típico de cada cidade, através dos dados obtidos no capítulo anterior.

### 5.1 Análise do comportamento do edifício modular nos diferentes climas

A introdução de ventilação quer no caso II (ventilação mecânica) e no caso III (ventilação natural) é uma solução de arrefecimento passivo com o objetivo de diminuir as necessidades energéticas do edifício modular.

Observando a Figura 64, relativa às necessidades de aquecimento do edifício modular, é perceptível que no caso III existe um grande aumento das necessidades de aquecimento em todos os locais, comparativamente aos outros casos.

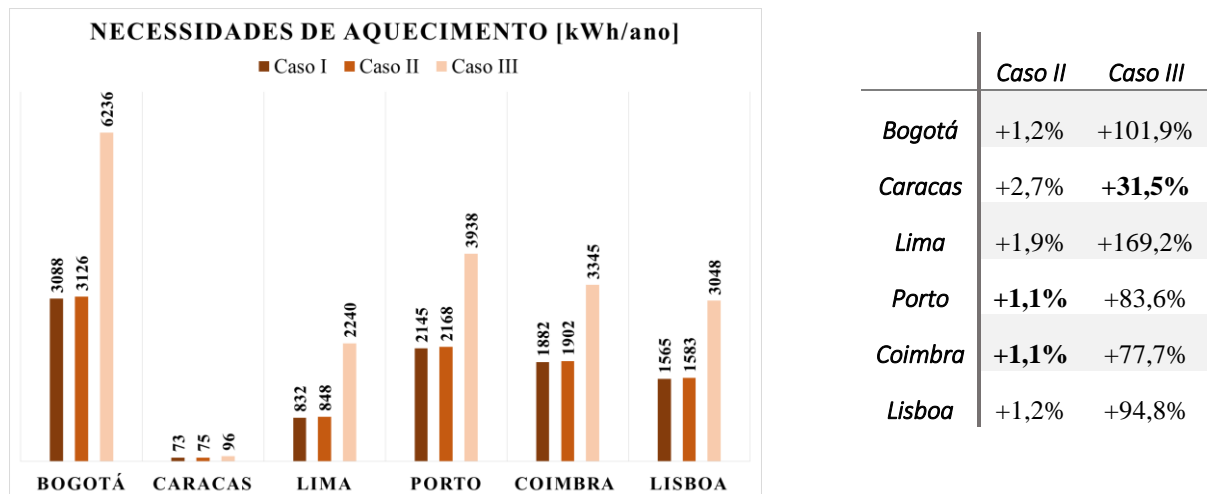


Figura 64 – Necessidades de aquecimento do edifício modular em cada caso

Na procura da justificação destes valores, foi calculado a média diária da quantidade de ar insuflado no edifício em cada semana do ano e que se apresentam no “ANEXO H: Cálculo da quantidade de ar insuflado no edifício modular no caso II e III”. A conclusão que se retira deste é que a ventilação natural introduz uma maior quantidade de ar no edifício do que a ventilação mecânica em todas as cidades. Por conseguinte, a taxa de ventilação média anual é maior no

caso III comparativamente ao caso II e bastante superior ao valor de referência para assegurar a qualidade do ar interior (QAI), como se pode observar na Figura 65.

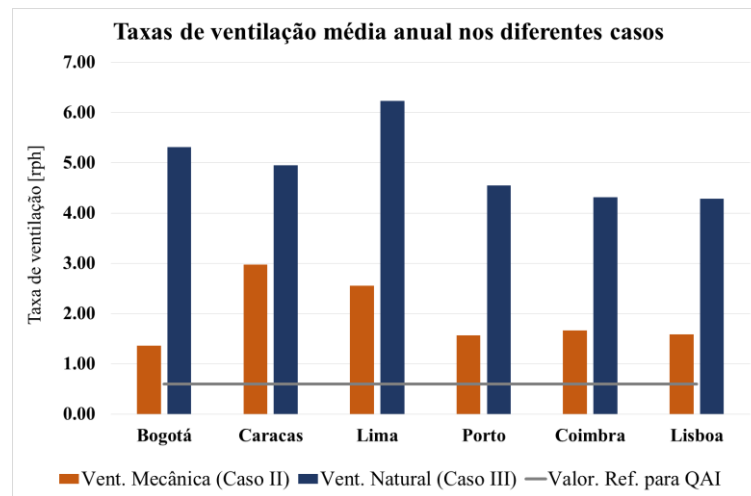


Figura 65 - Taxas de ventilação média anual nos diferentes casos

A título de exemplo, apresenta-se em seguida a quantidade de ar insuflado em média por semana em Bogotá (Figura 66). Nesta figura é visível a discrepância entre os dois tipos de ventilação.

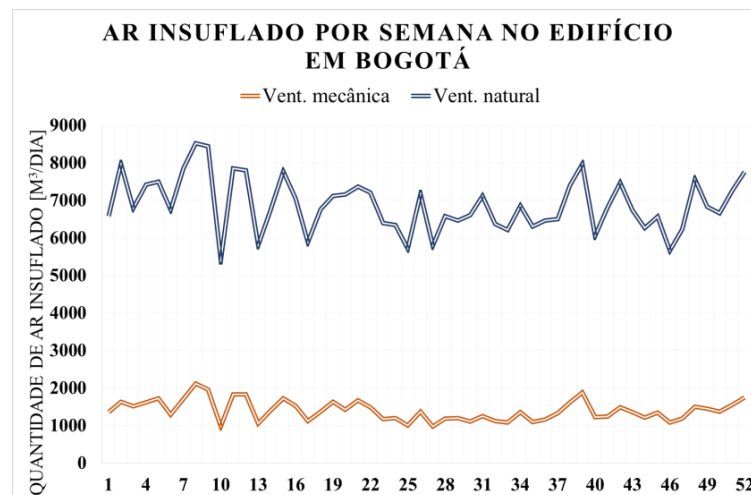
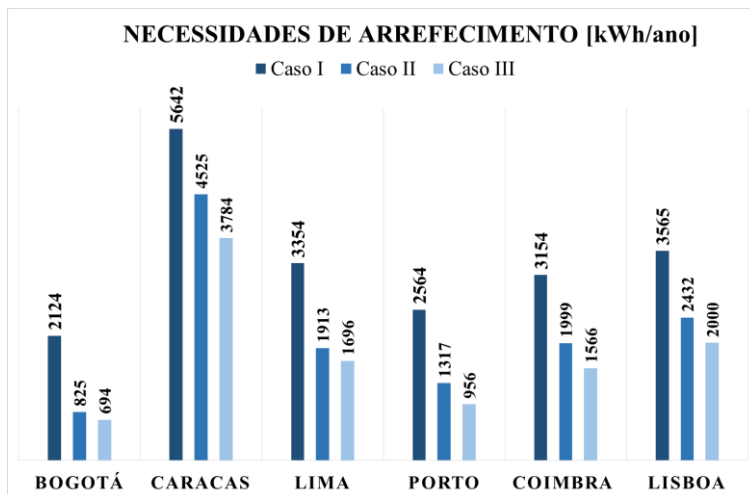


Figura 66 - Ar insuflado por semana no edifício modular em Bogotá

Conclui-se que em locais tipicamente com temperaturas inferiores à de conforto no interior do edifício, o facto de se introduzir mais ar, leva a que a temperatura interior diminua rapidamente o que resulta num aumento das necessidades de aquecimento. Por essa razão, os maiores aumentos das necessidades de aquecimento são verificados em Bogotá e Lima e os menores são em Caracas, caracterizada por temperaturas exteriores elevadas.

Em relação ao arrefecimento do edifício modular, a ventilação teve o efeito esperado, reduzindo as necessidades energéticas de arrefecimento quer no caso II e no caso III. Em todos os casos, obteve-se melhor resultados com a ventilação natural do que com a ventilação mecânica, (Figura 67) devido também às maiores taxas de renovação.

A ventilação tem uma redução das necessidades mais notória em Bogotá e é menos eficaz em Caracas. Este comportamento distinto está associado ao clima de cada cidade. Bogotá tem um clima com temperaturas geralmente inferiores à de conforto, pelo que a introdução do ar exterior para arrefecimento é bastante eficaz. Já em Caracas, a temperatura é geralmente superior à temperatura de conforto, o que reduz a eficácia da ventilação.

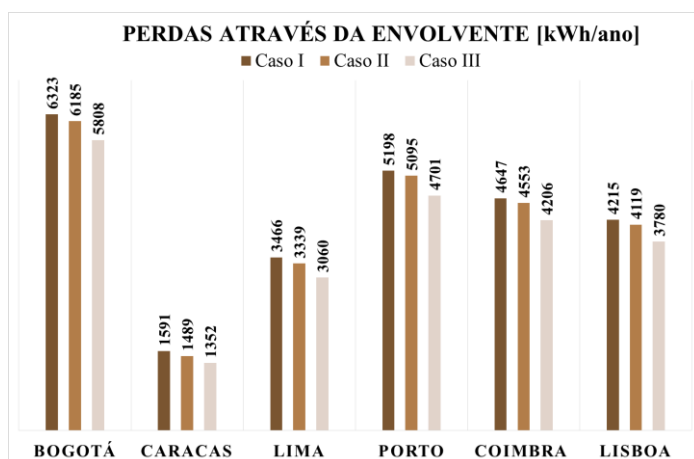


	Caso II	Caso III
<i>Bogotá</i>	-61,2%	-67,3%
<i>Caracas</i>	-19,8%	-32,9%
<i>Lima</i>	-43,0%	-49,4%
<i>Porto</i>	-48,6%	-62,7%
<i>Coimbra</i>	-36,6%	-50,3%
<i>Lisboa</i>	-31,8%	-43,9%

Figura 67 - Necessidades de arrefecimento do edifício modular em cada caso

Existem diferenças entre a ventilação mecânica e natural que não devem ser ignoradas. Por um lado, a mecanização possibilita o controlo da insuflação do ar e uma fácil adaptação a qualquer tipo de edifício, no entanto aumenta o consumo de energia, é um sistema ruidoso e que necessita de manutenção. Por outro lado, a ventilação natural exige um projeto mais exigente e é dependente das condições climáticas do exterior, no entanto não tem consumo energético adicional e não é necessário qualquer tipo de manutenção.

Analisaram-se também as perdas através da envolvente e por infiltrações nos três casos, representados respetivamente na Figura 68 e Figura 69. Os resultados obtidos são bastante similares. A introdução de ventilação leva a que haja menores perdas (quer por infiltrações quer através da envolvente). A ventilação natural tem efeitos mais significativos, na ordem da redução de 10%, atingindo os 15% em Caracas.



	Caso II	Caso III
<i>Bogotá</i>	-2,2%	-8,1%
<i>Caracas</i>	-6,4%	-15,0%
<i>Lima</i>	-3,7%	-11,7%
<i>Porto</i>	-2,0%	-9,6%
<i>Coimbra</i>	-2,0%	-9,5%
<i>Lisboa</i>	-2,3%	-10,3%

Figura 68 - Perdas através da envolvente

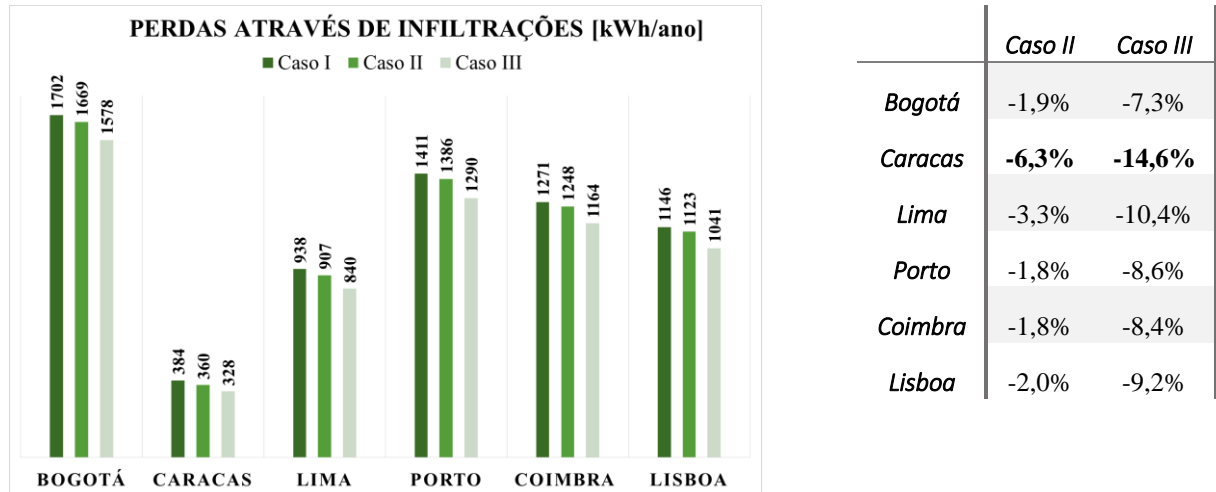


Figura 69 - Perdas por infiltração

	Caso II	Caso III
Bogotá	-1,9%	-7,3%
Caracas	-6,3%	-14,6%
Lima	-3,3%	-10,4%
Porto	-1,8%	-8,6%
Coimbra	-1,8%	-8,4%
Lisboa	-2,0%	-9,2%

Através dos gráficos anteriores apenas se tem uma perceção quantitativa do edifício modular em cada cidade. Resta agora, comparar a classificação obtida segundo a norma europeia EN15251 num regime de *free floating*. Assim, na Figura 70 e Figura 71 pode-se observar a classificação de conforto no caso II e no caso III, respetivamente, comparativamente ao caso I.

Em relação ao caso II, conclui-se que existe uma melhoria de cerca de 10% em todas as categorias, sendo Caracas e Lima, as cidades com os resultados mais positivos.

Em relação ao caso III, os resultados são melhores para todos os casos sem exceção. Caracas é, neste caso, a cidade com os melhores resultados com uma melhoria de 25%, seguindo-se Lima com 20%. As restantes cidades apresentam melhorias a rondar os 15% em todas as categorias.

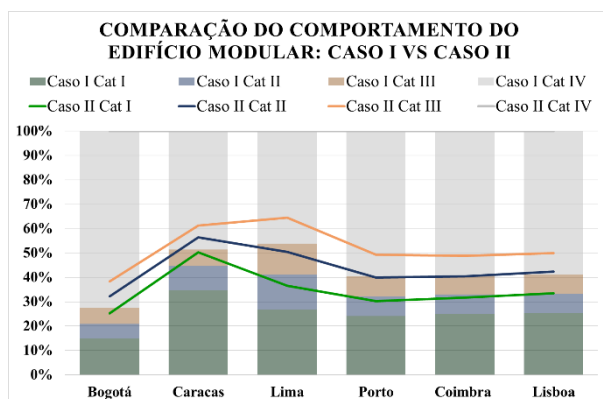


Figura 70 - Classificação obtida segundo a norma EN15251 no caso II comparativamente ao caso I

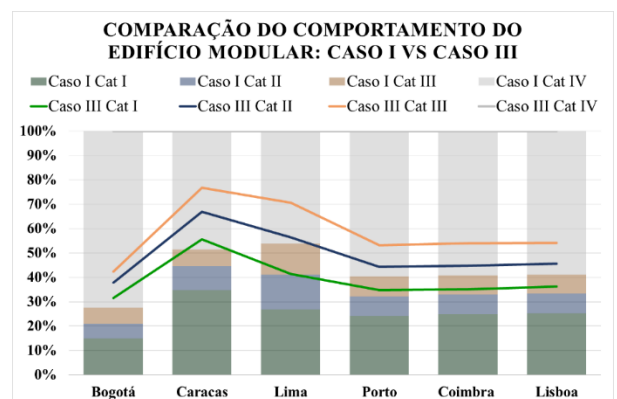


Figura 71 - Classificação obtida segundo a norma EN15251 no caso III comparativamente ao caso I

Pode-se retirar duas ilações bastante importantes dos dados apresentados. Em primeiro lugar, a introdução de ventilação é benéfica, reduzindo significativamente as cargas de arrefecimento e melhorando o comportamento térmico do edifício. Contudo, a ventilação natural é apenas indicada para Caracas, sendo que nos restantes locais se deve recorrer a uma ventilação mecânica ou mista devido à possibilidade de maior controlo.

Em segundo lugar, Caracas é o local mais adaptado à utilização do edifício modular, já que a inexistência de inércia térmica é bastante favorável neste tipo de climas. Nesta cidade, com recurso a ventilação natural, atinge-se 80% de horas anuais de conforto. Em seguida, Lima é a cidade a que o edifício está mais adaptado, em que 60% do ano atinge-se o conforto no interior do edifício.

## 5.2 Análise do edifício modular comparativamente ao edifício típico local

Neste capítulo pretende-se comparar os resultados obtidos para o edifício modular com a referência de cada local nos diferentes casos. A comparação permitirá determinar se o comportamento do edifício é aceitável ou não tendo em conta o típico existente em cada cidade e se constitui uma vantagem para a empresa

### 5.2.1 Bogotá

Examinando as necessidades energéticas dos edifícios modular e latino-americano em Bogotá, pode-se concluir que têm comportamentos distintos. Em todos os casos estudados, a habitação latino-americana tem necessidades de aquecimento muito elevadas em relação à modular e as de arrefecimento muito inferiores, como se pode observar na Figura 72.

No edifício modular, a introdução de ventilação mecânica e natural, respetivamente no caso II e III, originou uma diminuição substancial das necessidades de arrefecimento, mas não o suficiente para que estas sejam menores do que as do edifício latino-americano.

A introdução de ventilação natural no caso III gerou um aumento de cerca de 100% nas necessidades de aquecimento do edifício modular, mas mesmo assim muito inferior à necessidade por parte do edifício latino-americano. A razão para esta diferença, mesmo no caso III, baseia-se no facto de o edifício latino-americano não possuir qualquer isolamento, o que leva a enormes perdas por condução através da envolvente, visível na Figura 73. Pela mesma figura, é notório que as perdas por infiltração são muito similares nos dois edifícios em todos os casos.

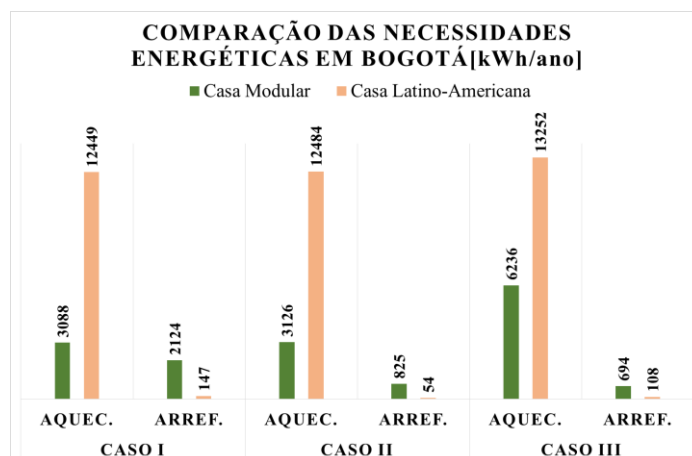


Figura 72 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e latino-americano em Bogotá

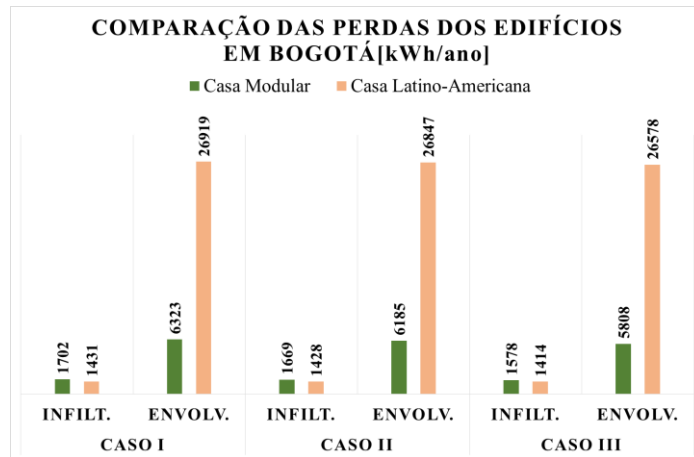


Figura 73 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e latino-americano em Bogotá

No geral, não só as necessidades energéticas do edifício modular são inferiores às do edifício latino-americano, como também as horas de conforto de cada categoria do edifício são bastante melhores, como se pode observar na Figura 74.

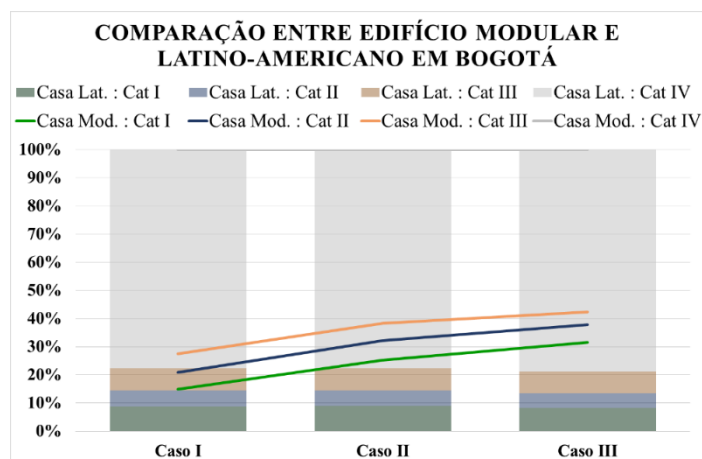


Figura 74 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao latino-americano segundo a norma EN15251 para Bogotá

Em suma, os resultados obtidos para uma construção modular em Bogotá não são os ideais, mas este tipo de construção é uma alternativa viável e interessante à existente atualmente quer pelo melhor comportamento quer pela redução das necessidades energéticas. No entanto, são necessárias alterações no edifício que visem o aperfeiçoamento do seu comportamento térmico, já que a obtenção de 40% de conforto nos parâmetros da categoria III (no caso III – ventilação natural) não é positiva, apesar de ser melhor do que a referência.

### 5.2.2 Caracas

Numa perspetiva geral, observando a Figura 75 referente às necessidades do edifício modular e latino-americano em Caracas, pode-se concluir que ambos têm um comportamento semelhante. No caso I, sem controlo de ventilação, o edifício modular tem necessidades de

aquecimento inferiores ao edifício latino-americano, mas o oposto acontece quando se trata do arrefecimento.

A introdução da ventilação no caso II e III permite uma diminuição das necessidades de arrefecimento em ambos os edifícios, no entanto a redução é superior no edifício modular. Assim, no caso III, com ventilação natural, o edifício modular obteve menores necessidades energéticas quer de aquecimento quer de arrefecimento. Porém, analisando as perdas energéticas dos edifícios, estes têm comportamentos significativamente distintos, como é observável na Figura 76.

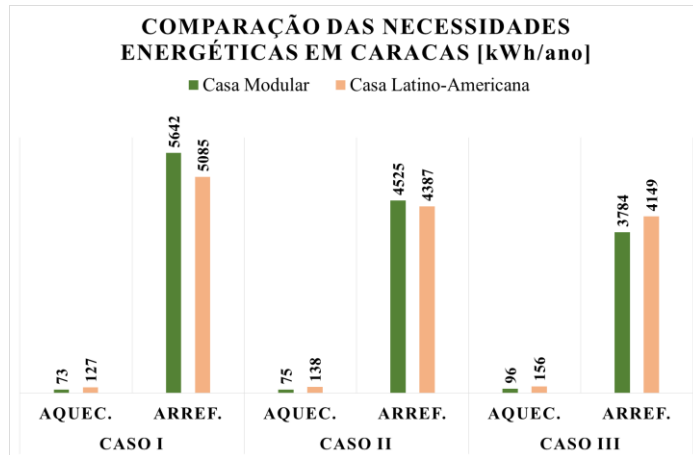


Figura 75 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e latino-americano em Caracas

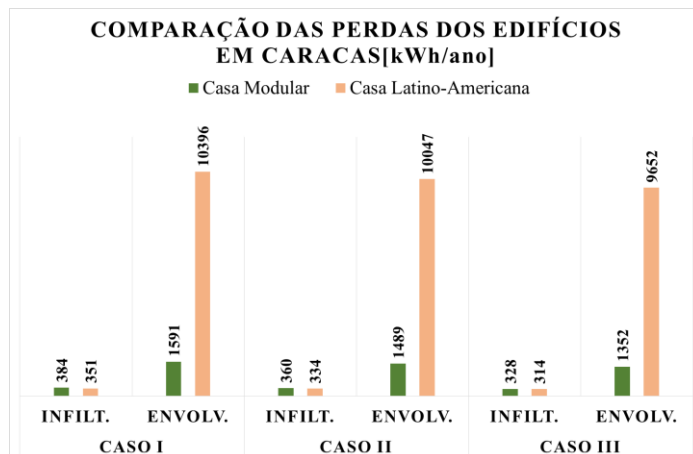


Figura 76 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e latino-americano em Caracas

Relativamente ao conforto dos ocupantes, em ambos os edifícios obteve-se valores aceitáveis, tendo em conta que o regime é *free floating* (Figura 77). No caso I e II, o edifício latino-americano tem um comportamento muito melhor, no entanto a introdução da ventilação natural melhorou bastante o comportamento do edifício modular, atingindo praticamente os valores do edifício latino-americano. Neste, a introdução da ventilação teve um efeito positivo mas não tão acentuado como no modular.

Pode-se concluir que o edifício modular é uma alternativa viável ao edifício latino-americano em Caracas devido à redução energética que permite e devido ao facto de estar bastante ajustado a este tipo de clima.

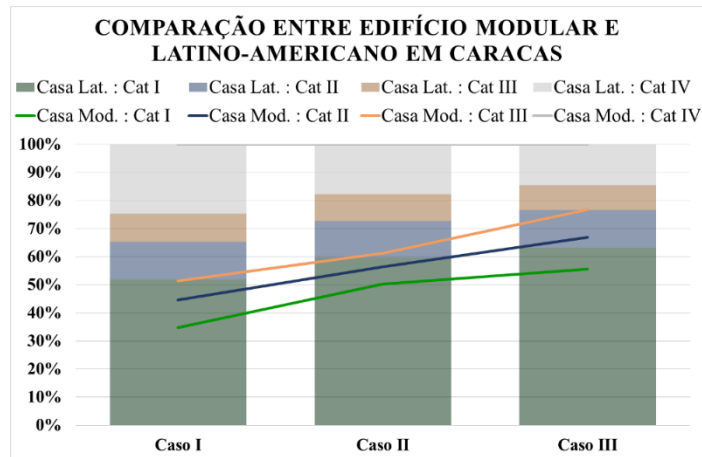


Figura 77 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao latino-americano segundo a norma EN15251 para Caracas

### 5.2.3 Lima

No que toca ao clima presente em Lima, o comportamento da habitação modular e latino-americano são completamente distintos (Figura 78).

Pelo facto do primeiro não ter praticamente inércia térmica, a temperatura interior aumenta ao longo do dia, acompanhando a exterior, daí as elevadas necessidades de arrefecimento em todos os casos. Por outro lado, o segundo não possui isolamento o que leva a enormes perdas por condução através da envolvente, como representado na Figura 79 e consecutivamente a elevadas necessidades de aquecimento.

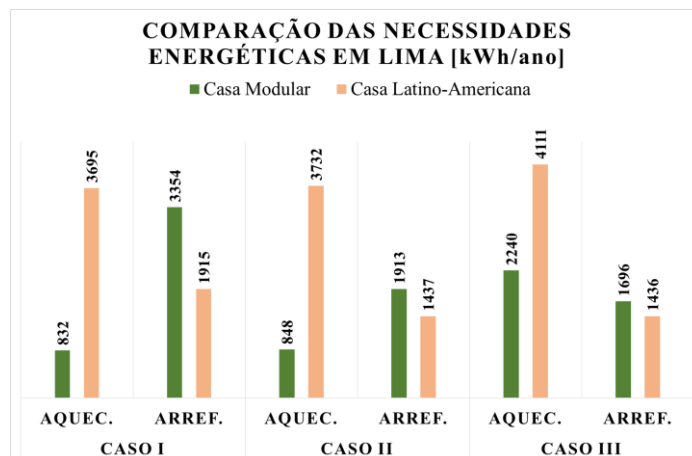


Figura 78 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e latino-americano em Lima

Porém, quando os edifícios foram simulados em *free floating*, os resultados em perspetiva geral são similares obtendo-se conforto em 60% do ano. No entanto, a melhoria dos resultados provenientes da introdução de ventilação (no caso II e III) é muito mais acentuada no edifício modular do que no latino-americano, tal que no caso I é o edifício latino-americano que tem melhor comportamento e no caso III os resultados obtidos invertem-se.

Pode-se concluir que o edifício modular é uma alternativa ao edifício típico latino-americano, pela redução das necessidades energéticas que permite obter ao longo de um ano.

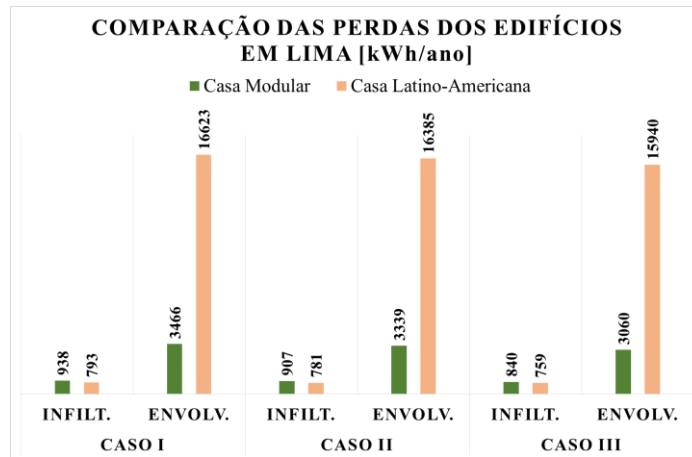


Figura 79 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e latino-americano em Lima

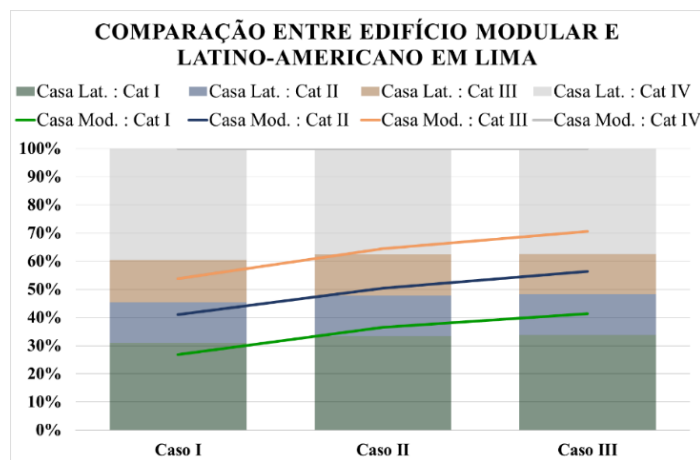


Figura 80 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao latino-americano segundo a norma EN15251 para Lima

#### 5.2.4 Porto

Iniciando a análise do edifício modular pelo Porto e comparando-o a um edifício tipicamente português, pode-se observar que as necessidades energéticas quer de arrefecimento quer de aquecimento do edifício modular são muito superiores (Figura 81).

No entanto, observando a Figura 82, identifica-se que as perdas da habitação modular são inferiores às da habitação portuguesa, principalmente através da envolvente. Este facto deve-se às melhores propriedades isolantes da envolvente do edifício modular. Pode-se concluir então que no clima mediterrânico, a praticamente inexistência de inércia térmica do edifício modular é responsável pelas suas necessidades energéticas elevadas. Este facto permite concluir que se melhorar a inércia de forma artificial, provavelmente a construção modular terá melhor desempenho.

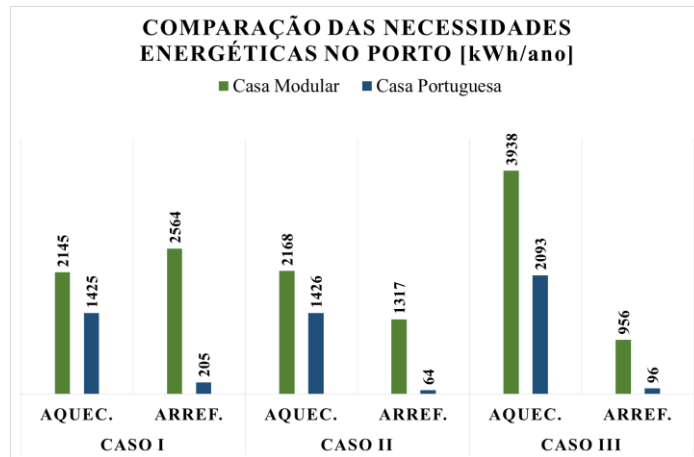


Figura 81 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português no Porto

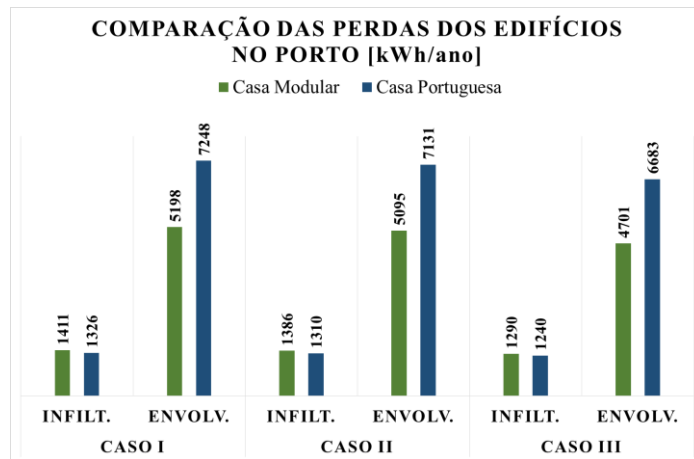


Figura 82 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português no Porto

Tendo em conta os resultados anteriores e analisando a Figura 83, o edifício modular, em todos os casos, tem um pior comportamento do que o típico português não atingindo o número de horas confortáveis em nenhum caso, havendo uma diferença de praticamente 20%. De salientar que a introdução da ventilação no caso III foi prejudicial ao comportamento do edifício típico português.

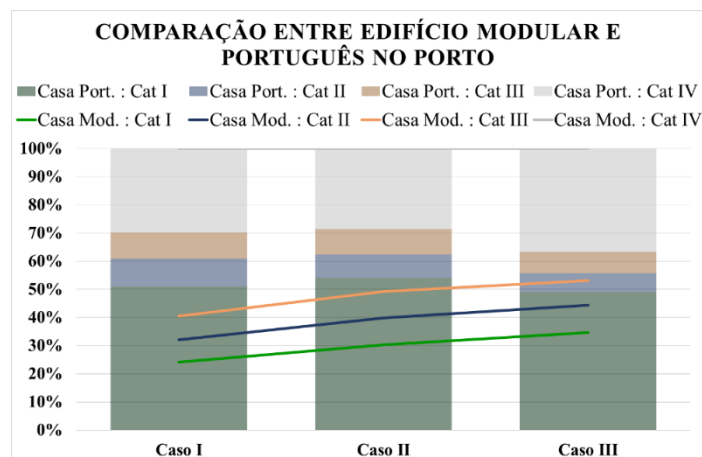


Figura 83 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao português segundo a norma EN15251 para Porto

Pode-se concluir que o edifício modular não está adaptado ao clima do Porto, tal como está o edifício português e serão necessárias modificações na construção dos módulos para que se possa tornar uma alternativa viável neste clima.

### 5.2.5 Coimbra

Devido à similitude entre o clima do Porto e Coimbra, os resultados obtidos para as necessidades térmicas e perdas são também muito semelhantes e as conclusões retiradas para o Porto são passíveis de ser utilizadas neste caso, tal como se pode observar na Figura 84 e Figura 85.

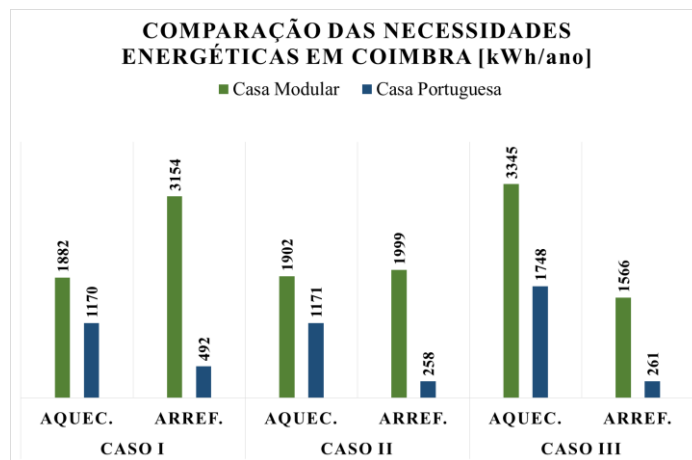


Figura 84 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português em Coimbra

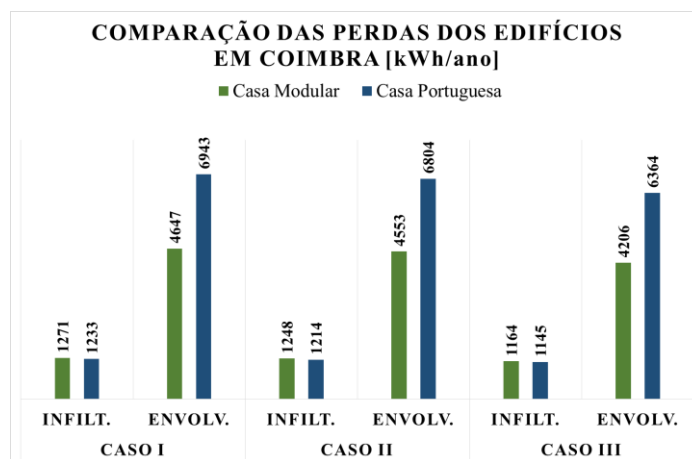


Figura 85 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e português em Coimbra

Analogamente, ao realizar-se o estudo do conforto térmico, obteve-se resultados muito similares ao Porto, podendo-se concluir que o edifício modular tem um comportamento inferior ao típico português. De salientar que em todos os casos, houve uma melhoria de cerca de 5% do comportamento do edifício português, relativamente ao Porto. Pode-se concluir que o edifício modular não está adaptado ao clima de Coimbra, tal como está o edifício português.

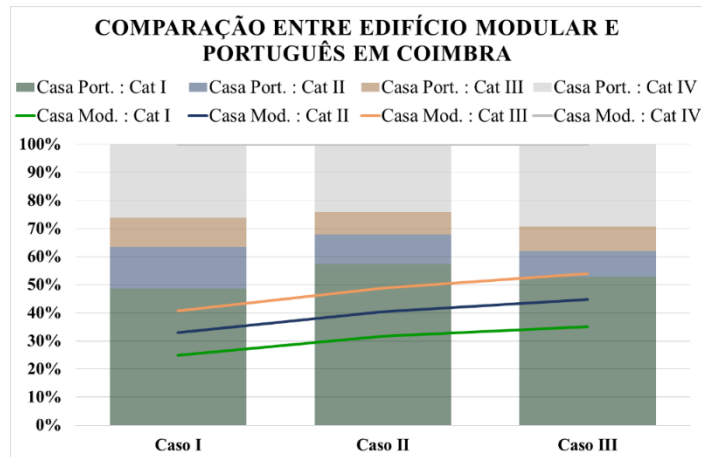


Figura 86 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao português segundo a norma EN15251 para Coimbra

### 5.2.6 Lisboa

Tal como as duas cidades anteriores, Lisboa tem um clima mediterrânico, daí que as conclusões retiradas para o Porto podem ser extrapoladas para Lisboa. As necessidades energéticas quer de arrefecimento quer de aquecimento do edifício modular são muito superiores às de um edifício português devido à inexistência de inércia térmica, conforme se pode ver na Figura 87 e Figura 88.

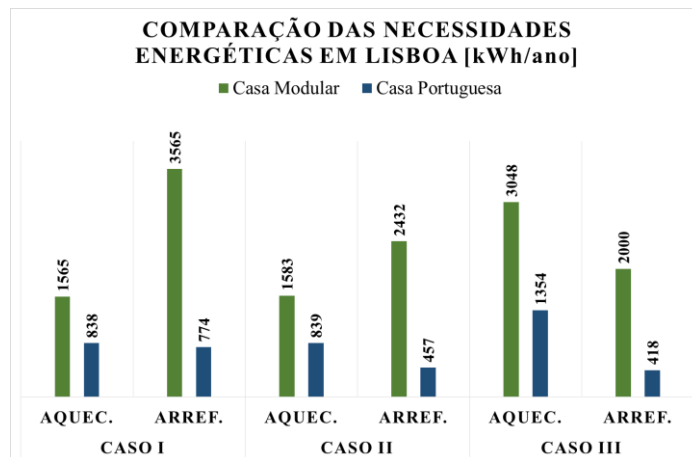


Figura 87 - Comparação das necessidades energéticas entre edifício modular e português em Lisboa

Por último, observando a Figura 89, os mesmos resultados no estudo de conforto térmico são notórios. O edifício modular, em todos os casos, tem um pior comportamento do que o típico português não atingindo o mesmo número de horas confortáveis em nenhum caso, havendo uma diferença de praticamente 20%. De salientar que em todos os casos, o edifício português apresentou os melhores resultados em Lisboa, seguida de Coimbra e, por fim, do Porto. Pode-se concluir que o edifício modular não está adaptado ao clima de Lisboa quando comparado ao edifício típico da capital portuguesa.

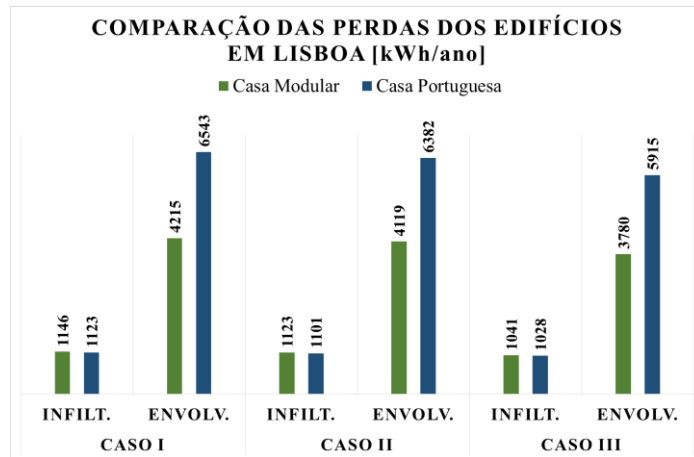


Figura 88 - Comparação das perdas energéticas entre edifício modular e português em Lisboa

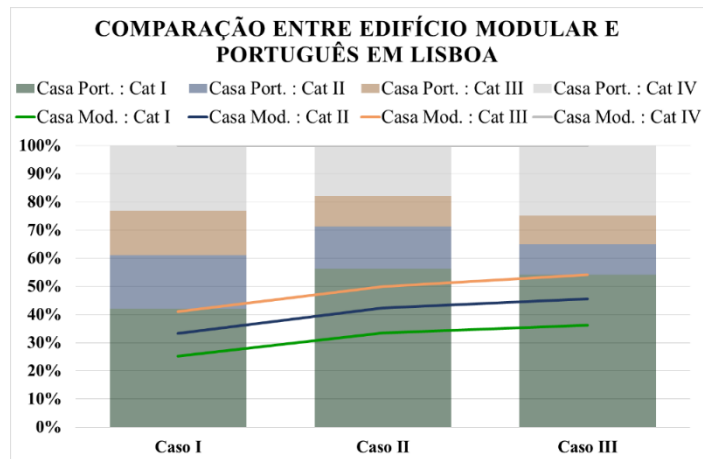


Figura 89 - Classificação obtida do edifício modular comparativamente ao português segundo a norma EN15251 para Lisboa

### 5.3 Conclusão

Numa perspetiva global, ao comparar o comportamento térmico da construção modular em diferentes climas, concluiu-se que este está mais adaptado ao clima de Caracas, apresentando resultados satisfatórios também em Lima. Pelo contrário, tendo em conta o clima de Bogotá, o edifício modular apresenta os piores resultados entre todas as cidades em estudo.

Contudo, ao comparar o comportamento do edifício modular com a referência em cada local, concluiu-se que, nas cidades latino-americanas, a habitação modular tinha menores necessidades energéticas do que o edifício típico do local. Além disso, em Bogotá e Lima atingia mais horas de conforto, caso fosse utilizada a ventilação como método de arrefecimento passivo (caso II e caso III), ao passo que, em Caracas, os valores eram similares.

Quanto ao clima mediterrânico, representado pelo Porto, Coimbra e Lisboa, o edifício modular não está adaptado e tem piores resultados quando comparado ao edifício tipicamente português. Este, pela sua inércia térmica e isolamento, tem um comportamento superior não só nas cidades portuguesas como também nas capitais sul-americanas. Porém, este tipo de construção não tem expressão ou quota de mercado em escalões socioeconómicos mais baixos da América Latina.

A um nível empresarial, não só o conhecimento técnico é necessário, como também a perceção das possíveis oportunidades de entrada em diferentes mercados é valiosa. Deve-se assim, a partir das conclusões retiradas, determinar que alterações devem ser realizadas no edifício para o tornar mais eficiente e concluir em que climas/cidades o investimento pode ser direcionado e quais as oportunidades que de se obter parte da quota de mercado.

Assim, no capítulo seguinte, será realizada uma análise detalhada do edifício, aliando os conhecimentos técnicos a uma análise económica, evidenciando os aspetos que se podem melhorar em cada local específico.

## 6 Do edifício modular a um *Zero Energy Building*

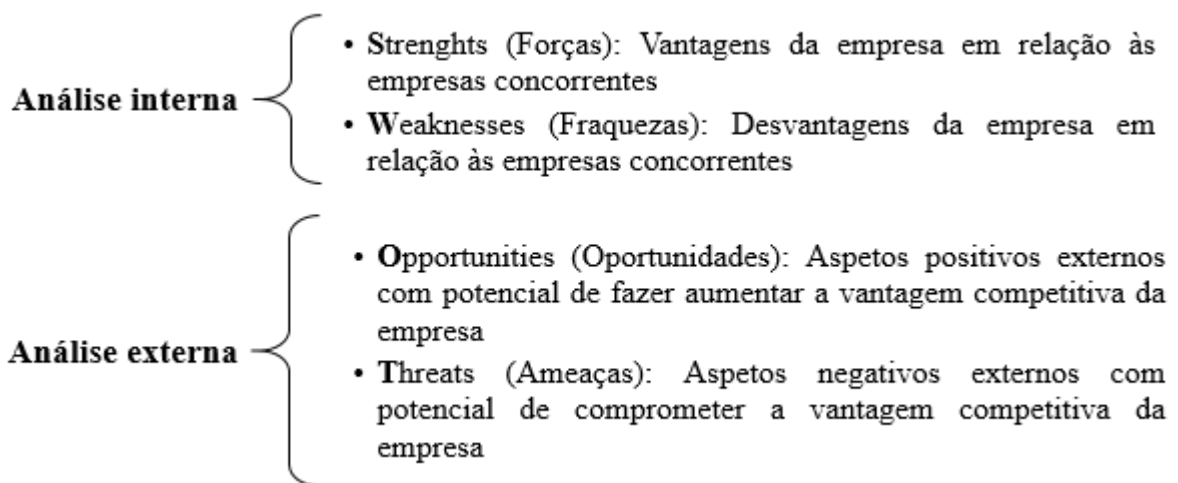
Neste capítulo pretende-se avaliar a viabilidade de a empresa apostar nos diferentes climas propostos, tendo em conta os resultados obtidos no capítulo anterior. Contudo, não só se examinará a capacidade da empresa ocupar parte da quota de mercado, como também atingir um objetivo mais ambicioso, um *Zero Energy Building*.

Como referido anteriormente, para atingir um ZEB deve-se, em primeiro lugar, incentivar a eficiência energética, ou seja, o *design* do edifício tem de ser adaptado ao clima. Assim, para cada cidade específica, será realizada uma análise às diferentes alterações necessárias para obter um *passive design*, tendo em conta as soluções abordadas ao longo do capítulo “2.3 Propostas para atingir *Zero Energy Building* – Tecnologias e Soluções”. Deve-se salientar que a introdução de medidas para um edifício passivo não só melhora a performance energética deste, como também a nível empresarial acarreta vantagens, tal como aumentar a capacidade da empresa em entrar no mercado dos edifícios sustentáveis.

Em seguida, realizar-se-á um estudo do potencial solar através da simulação de um sistema solar de aquecimento de águas sanitárias, tendo em conta os parâmetros descritos no “ANEXO G: Parâmetros da simulação”.

Por último, será realizada uma análise SWOT de forma a concluir acerca da posição estratégica atual da empresa para cada local. É uma ferramenta de gestão muito utilizada pelas empresas devido à sua simplicidade e que permite elaborar um diagnóstico estratégico. Os principais objetivos deste são identificar elementos chave para a gestão e planeamento da empresa, estabelecer prioridades de atuação e preparar opções estratégicas.

Este método subdivide-se em duas análises complementares: externa e interna. A primeira corresponde às principais perspetivas de evolução do mercado e são circunstâncias independentes do controlo da empresa. A segunda corresponde aos principais aspetos que diferenciam a empresa dos seus concorrentes.



## 6.1 Análise do edifício modular

Antes de promover alterações consoante o clima, deve-se analisar o edifício atual, tendo em conta as indicações da *passivhaus institut* [40]– instituto independente responsável pela construção de edifícios passivos. Examinando a planta do edifício, presente na Figura 1, pode-se retirar algumas ilações importantes:

1. Possui envidraçados em todas as direções, o que favorece ganhos solares do nascer ao pôr-do-sol. Os vidros utilizados têm um ganho solar de 0,855. Este valor, num edifício passivo (*passivhaus*) deve rondar 0,50.
2. Vidros simples, como aqueles utilizados no caso de estudo, têm o coeficiente de transmissão térmica elevado, com um valor  $U=5,68\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . Num edifício passivo, os envidraçados têm geralmente um coeficiente de transmissão térmica entre  $0,70\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  e  $0,85\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  (incluindo caixilharia). Estes geralmente utilizam um vidro triplo ou duplo (com um bom coeficiente de ganho solar) e revestimentos de baixo emissividade (Low-E). A caixilharia tem corte térmico.
3. A utilização de um módulo de 60mm de poliuretano corresponde a uma resistência térmica de cerca de  $2,30\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ . No projeto de um *passivhaus* utilizam-se, geralmente, envoltentes com resistências térmicas entre  $7\text{m}^2\text{K}/\text{W}$  e  $10\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ . Para atingir estes valores deve-se recorrer a elevadas espessuras de isolamento, de cerca de 180mm e 385mm, respetivamente.
4. Apenas existem sombreamentos em duas direções devido ao beiral do telhado (Norte e Sul), sendo que os envidraçados a Este e Oeste não possuem qualquer tipo de sombreamento.
5. Segundo as recomendações para obter um edifício passivo, as pontes térmicas devem ser evitadas.
6. Um dos métodos mais eficazes de arrefecimento passivo está relacionado com a ventilação natural denominando-se ventilação cruzada. Este conceito envolve a entrada do fluxo de ar através de uma abertura (janela ou porta) e que flui diretamente através da casa, existindo uma saída no outro lado da habitação. Num *design* passivo deve-se colocar aberturas, tendo em conta a direção prevalente do vento e possibilitar este tipo de ventilação. Se se tomar como exemplo uma direção prevalente de Sul na habitação existente, como é perceptível na Figura 90, pode-se observar que existe efetivamente ventilação cruzada.

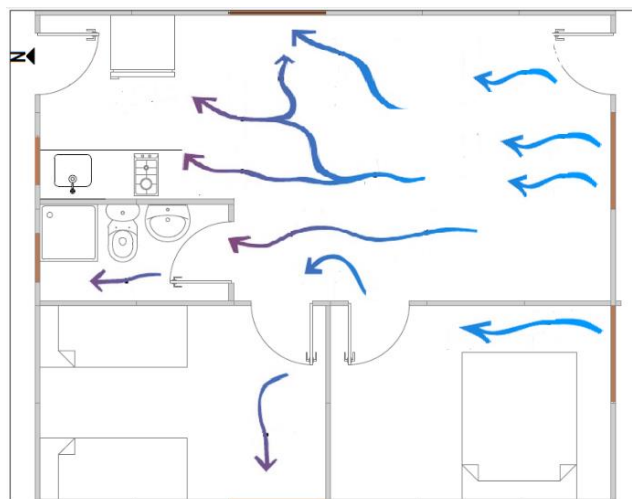


Figura 90 - Ventilação natural cruzada no edifício modular

## 6.2 Bogotá

Observando os dados meteorológicos de Bogotá, ao longo de um ano, a temperatura exterior é praticamente inferior à temperatura mínima de conforto. Assim, deve-se promover os ganhos solares e internos e diminuir as perdas para o exterior.

### 6.2.1 *Passive Design*

De forma a diminuir as perdas para o exterior deve-se reduzir as infiltrações ao máximo e isolar de forma bastante eficiente o edifício. Uma das opções mais viáveis será o aumento da espessura de isolamento através do alargamento do módulo de poliuretano, o que eleva a resistência térmica da envolvente e mantém a temperatura interior mais uniforme. Tendo em conta as recomendações do *passivhaus*, a espessura de isolamento deve rondar os 250mm.

Em relação aos envidraçados, a sua orientação deve ser preferencialmente Sul, já que maximiza a exposição ao Sol. A orientação a Norte deve ser excluída do projeto do edifício. Além disso, todos os envidraçados devem ser duplos ou triplos, assim como se deve introduzir caixilharia com corte térmico. Pretende-se ter um coeficiente de transmissão térmico o mais baixo possível.

Deve-se estudar a possibilidade de introduzir cortinas isolantes ou persianas operáveis, pois permitem reduzir as perdas de calor durante o período noturno. A utilização de sombreamentos não é crítica, já que o risco de sobreaquecimento é baixo. No entanto, devido à baixa inércia térmica do edifício e à grande variação da temperatura interior, deve ser possível recorrer à ventilação natural. Conforme verificado, a introdução desta medida reduz as necessidades de arrefecimento – na simulação obteve-se uma redução de 66% no caso III comparativamente ao caso I.

Observando a rosa-dos-ventos de Bogotá (Capítulo “3.1 Clima”), o vento predominante tem a direção Este, daí que uma abertura nesta direção permite o aumento das taxas de ventilação natural. O facto do edifício modular não ter praticamente inércia térmica é também vantajoso, uma vez que permite um rápido aquecimento do edifício durante o período matinal, principalmente se se optar por um envidraçado a Este.

Em suma, deve-se alterar principalmente na espessura dos módulos (através do seu aumento) e nos envidraçados (quer no tipo de vidro utilizado quer na sua orientação).

### 6.2.2 *Sistemas solares*

Ao observar a Figura 91, numa perspetiva geral, pode-se concluir que existe potencial para a instalação de sistemas solares e que os valores médios da radiação solar diária em cada mês são praticamente constantes.

Por um lado, a radiação direta normal é, em média, acima dos 2000Wh/m<sup>2</sup> por dia, podendo mesmo atingir os 8500Wh/m<sup>2</sup>. Para uma superfície horizontal, a radiação total num ano é, em média 4500Wh/m<sup>2</sup> por dia, onde os valores podem variar entre 2000Wh/m<sup>2</sup> e 8000Wh/m<sup>2</sup>. Por outro lado, o número de horas de sol é aproximadamente 11h/dia durante quase todo o ano.

Por último, pode-se concluir que Fevereiro é o mês com a radiação total para uma superfície horizontal mais elevada, ao passo que Novembro tem os menores valores.

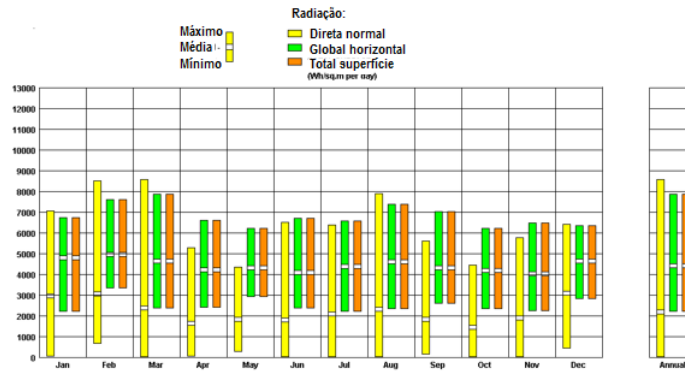


Figura 91 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Bogotá

Paralelamente a este estudo, simulou-se o rendimento de um sistema de AQS com um coletor solar, através da variação da sua inclinação. O máximo obtido atingiu-se para uma inclinação de 10° (similar à latitude de Bogotá, como seria de esperar). Para este valor obteve-se um máximo de fração solar de cerca de 65% e um rendimento do coletor de 37%, como representado na Figura 92.

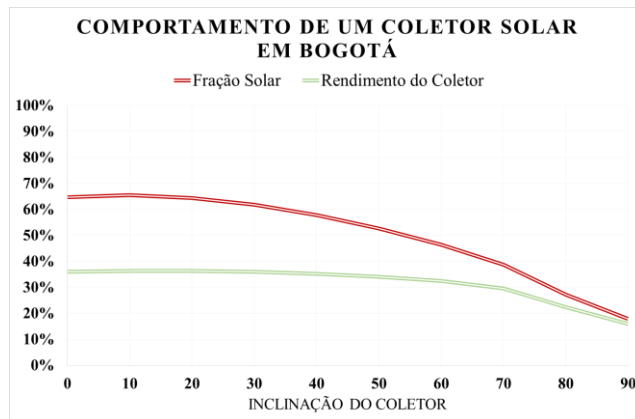


Figura 92 - Comportamento de um coletor solar em Bogotá

A utilização de sistemas solares deve ser incorporada num edifício modular em Bogotá para diminuir a dependência energética e é necessária para atingir um *Zero Energy Building*.

### 6.2.3 Análise SWOT

A análise SWOT para Bogotá está representada na Tabela 11.

Tabela 11 - Análise SWOT ao edifício modular em Bogotá

	Vantagens	Desvantagens
Análise interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A modularidade e o sistema de macho-fêmea permitem a adaptação completa do edifício consoante os diferentes projetos. Tempo de construção reduzido e não necessita de mão-de-obra especializada;</li> <li>- Os painéis sanduiche têm uma elevada resistência ao fogo, são resistentes à humidade e mofo e permitem um isolamento acústico;</li> <li>- Edifício adaptado ao clima de Bogotá com a possibilidade de ir além em termos de eficiência energética através de um <i>passive design</i>;</li> <li>- Melhor comportamento térmico do que um edifício típico da classe social pobre da Colômbia;</li> <li>- Com a inflação constante dos preços de eletricidade e combustíveis, o favorecimento da redução do consumo energético traduz-se em menores custos para os ocupantes durante o tempo de utilização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As unidades do edifício modular são transportadas por estradas, o que limita muitas vezes a sua dimensão e, conseqüentemente, as divisões da habitação;</li> <li>- O custo da habitação modular é superior ao valor de uma casa construída pelo método tradicional.</li> </ul>
Análise externa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entre 1970 e 2012, houve mais de 31.000 desastres naturais na Colômbia, destruindo cerca de 198.000 edifícios e danificando 1.300.000 [41] A reconstrução rápida destes é possível através de edifícios modulares;</li> <li>- Elevada taxa de urbanização sem resposta eficiente por parte quer da indústria quer do governo. Cerca de 22% dos 7 milhões de habitantes de Bogotá vivem em assentamentos informais.</li> <li>- A indústria começa a considerar a eficiência na utilização de recursos e adoção de práticas sustentáveis e a reconhecer a eficiência energética como uma oportunidade de mercado;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para atingir um edifício passivo, devem-se realizar alterações no processo de fabrico dos módulos (aumento da espessura) o que se traduz em custos de investimentos;</li> <li>- Atingir um ZEB eleva os custos totais do edifício;</li> <li>- População na sua maioria pobre, sem acesso a recursos e sem capacidade económica para comprar uma habitação. Incentivos devem ser provenientes do governo através de programas sociais;</li> <li>- Exportação para países em desenvolvimento, cuja principal preocupação é o crescimento económico e não tanto a proteção ambiental ou aumento da eficiência energética.</li> </ul>

## 6.3 Caracas

A cidade de Caracas é caracterizada por elevadas temperaturas ao longo de todo o ano e por uma amplitude térmica diária pequena, daí que a falta de inércia do edifício modular seja benéfica. No entanto, várias alterações do projeto atual serão propostas, já que neste tipo de clima todas as soluções devem estar direcionadas para minimizar o aquecimento excessivo do edifício.

### 6.3.1 *Passive Design*

A incorporação de métodos de construção passiva na fachada para diminuir a necessidade energética deve atuar em três pontos distintos: envidraçados, sombreamentos e ventilação (natural ou mecânica).

Em primeiro lugar, deve-se reduzir ao máximo os ganhos solares através de dois aspetos fundamentais: tipo de envidraçados e a sua orientação. Assim os envidraçados devem ser duplos, de baixa emissividade (*Low-E*) com caixilharias de corte térmico e orientados na sua maioria a Norte. Deve-se também reduzir ou eliminar os envidraçados direcionados a Oeste para minimizar os ganhos durante o período da tarde.

Todos os envidraçados devem ter sombreamento, ao contrário do que acontece no caso em estudo. Deve ser estudado a possibilidade de introduzir um sombreamento móvel em cada envidraçado ou o beiral do telhado deve ser dimensionado para sombrear as direções que possuem envidraçados, sem pôr em causa a iluminação natural do edifício.

Por último, e talvez o aspeto mais importante, a ventilação do edifício deve ser analisada. Assim a disposição das aberturas deve permitir uma ventilação eficaz, no entanto sem descuidar as alterações supramencionadas. Examinando a rosa-dos-ventos de Caracas (Capítulo “3.1Clima”), o vento predominante é de Este, daí que o edifício deve possuir pelo menos uma abertura com esta direção, sendo as restantes a Norte e Sul.

A introdução de sistemas que permitem aumentar a ventilação natural, como por exemplo, a parede solar ou mesmo um *green roof* devem ser estudadas. As vantagens foram descritas no capítulo “2.3Propostas para atingir *Zero Energy Building* – Tecnologias e Soluções”, no entanto a sua aplicação tem desvantagens que devem ser estudadas para este projeto específico. O primeiro caso necessita de bastante espaço na cobertura para que o aumento das taxas de ventilação seja significativo, o que retira espaço para possíveis sistemas solares. O segundo caso introduz cargas para a estrutura do edifício devido ao seu peso que têm de ser suportadas. Um estudo aprofundado acerca das diferentes soluções é necessário.

### 6.3.2 *Sistemas solares*

Da Figura 93 pode-se concluir que Caracas tem um enorme potencial no que toca à energia solar, o maior das cidades em estudo. Ao longo de um ano, a média da radiação direta normal, por dia, atinge valores na ordem dos 3500Wh/m<sup>2</sup> com uma gama que varia entre 8000Wh/m<sup>2</sup> e

900Wh/m<sup>2</sup>. Enquanto o valor médio da radiação global horizontal é de 5500Wh/m<sup>2</sup>, com um valor máximo de 7200Wh/m<sup>2</sup> e um mínimo de 3500Wh/m<sup>2</sup>.

O mês com a menor média da radiação total para a superfície horizontal é Dezembro, sendo Agosto o mês com a maior média.

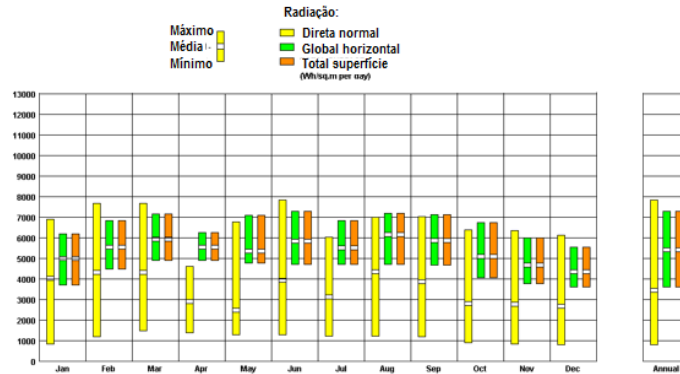


Figura 93 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Caracas

Ao simular-se o sistema de AQS, o enorme potencial referido traduziu-se numa fração solar de cerca de 93%, para uma inclinação do coletor de 10° (valor próximo da latitude de Caracas), tal como se pode observar na Figura 94. Pode-se concluir que existe uma enorme capacidade de aproveitamento da radiação solar e a introdução destes no edifício permitirá obter um *Zero Energy Building*.

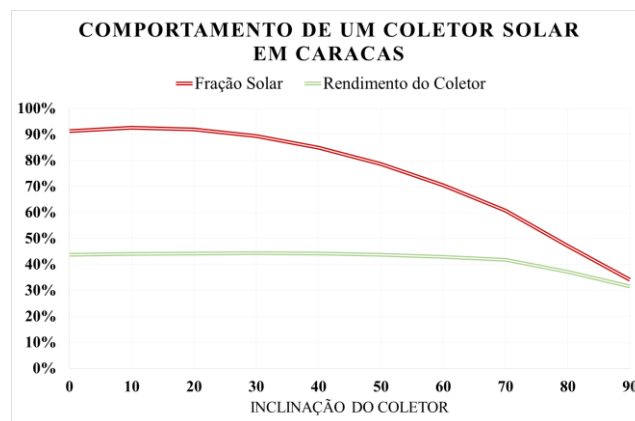


Figura 94 - Comportamento de um coletor solar em Caracas

### 6.3.3 Análise SWOT

A análise SWOT realizada para Caracas está reproduzida na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise SWOT ao edifício modular em Caracas

	Vantagens	Desvantagens
Análise interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A modularidade e o sistema de macho-fêmea permitem a adaptação completa do edifício consoante os diferentes projetos. Tempo de construção reduzido e não necessita de mão-de-obra especializada;</li> <li>- Os painéis sanduiche têm uma elevada resistência ao fogo, são resistentes à humidade e mofo e permitem um isolamento acústico;</li> <li>- O edifício modular obteve os melhores resultados para o clima de Caracas;</li> <li>- Possibilidade de ir além em termos de eficiência energética através de um <i>passive design</i> e capacidade de atingir um <i>Zero Energy Building</i>;</li> <li>- Com a inflação constante dos preços de eletricidade e combustíveis, o favorecimento da redução do consumo energético traduz-se em menores custos para os ocupantes durante o tempo de utilização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As unidades do edifício modular são transportadas por estradas, o que limita muitas vezes a sua dimensão e, conseqüentemente, as divisões da habitação;</li> <li>- O custo da habitação é superior ao valor de uma casa construída pelo método tradicional.</li> </ul>
Análise externa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cerca de 50% da população urbana vive em favelas que carecem de serviços mínimos. Possibilidade de permitir uma rápida execução de um planeamento urbano visando a desagregação das favelas (<i>barrios</i>) existentes em Caracas (Venezuela);</li> <li>- Entre 1970 e 2012, houve mais de 5800 desastres naturais na Venezuela, destruindo cerca de 52000 edifícios e danificando 170000[41]. A reconstrução rápida destes é possível através de edifícios modulares;</li> <li>- A indústria começa a considerar a eficiência na utilização de recursos e adoção de práticas sustentáveis e a reconhecer a eficiência energética como uma oportunidade de mercado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exportação para um país em desenvolvimento, cuja principal preocupação é o crescimento económico e não tanto a proteção ambiental ou aumento da eficiência energética;</li> <li>- População na sua maioria pobre, sem acesso a recursos e sem capacidade económica para comprar uma habitação. Incentivos devem ser provenientes do governo através de programas sociais.</li> </ul>

## 6.4 Lima

Ao contrário dos dois casos anteriores, Lima tem distintamente um período de aquecimento e de arrefecimento no intervalo de um ano, com temperaturas amenas e com amplitudes médias diárias moderadas.

### 6.4.1 Passive Design

Pelos resultados obtidos, pode-se observar que o edifício modular obteve resultados muito similares ao edifício típico latino-americano no que toca ao conforto. A inércia térmica praticamente inexistente acarreta o acompanhamento da temperatura interior com a temperatura exterior. Como esta não atinge valores extremos, deve-se evitar quer as perdas excessivas quer os ganhos excessivos.

Assim, durante o período de aquecimento, é necessário incentivar os ganhos solares passivos e diminuir as perdas para o exterior. A orientação dos envidraçados deve ser Norte (já que Lima se encontra no hemisfério Sul) e deve-se aumentar a resistência térmica da envolvente, quer ao utilizar módulos com mais espessura quer recorrendo a vidros duplos ou triplos.

Analogamente, durante o período de arrefecimento, deve-se incentivar a ventilação natural e a utilização de sombreamentos. Em Lima, a direção predominante do vento é o Sul, daí que se deva colocar pelo menos uma abertura nesta direção.

### 6.4.2 Sistemas solares

Lima apresenta valores de radiação solar média anual similares a Bogotá, no entanto o seu comportamento anual é completamente distinto. Ao passo que a capital colombiana tem uma radiação constante ao longo do ano, a capital peruana não, como se pode observar na Figura 95. Durante a época de aquecimento, a radiação solar incidente atinge o mínimo em Agosto, em que a média diária da radiação direta normal e da radiação global horizontal é cerca de  $500\text{Wh/m}^2$  e  $6000\text{Wh/m}^2$ , respetivamente. Do lado oposto, durante a época de arrefecimento, o mês de Março tem uma radiação direta normal média de  $4000\text{Wh/m}^2$  e uma radiação global horizontal média de cerca de  $6000\text{Wh/m}^2$ .

Em termos anuais, a radiação direta incidente tem uma média a ronda os  $2000\text{Wh/m}^2$ , com uma gama entre  $0\text{Wh/m}^2$  e  $7000\text{Wh/m}^2$ . A radiação global horizontal tem valores entre  $3000\text{Wh/m}^2$  e  $7500\text{Wh/m}^2$ , sendo a média cerca de  $4500\text{Wh/m}^2$ .

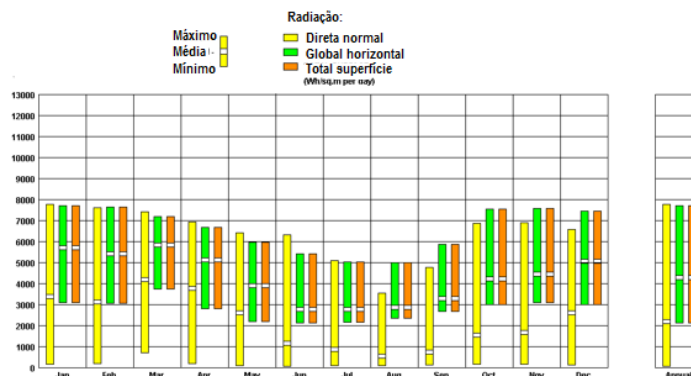


Figura 95 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Lima

Simulando o coletor solar, obteve-se como máximo uma fração de solar de 68% e um rendimento do coletor de 40%, para uma inclinação de 10°, como visível na Figura 96. Deve-se salientar que ao contrário dos casos anteriores, a inclinação deve promover os ganhos durante a época de aquecimento (de Maio a Setembro).

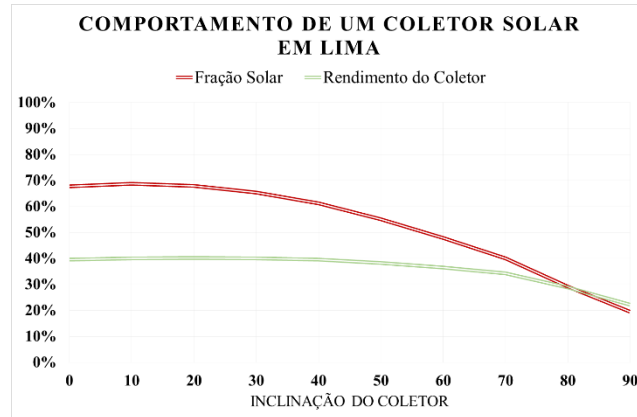


Figura 96 - Comportamento de um coletor solar em Lima

Em suma, a utilização de coletores solares em Lima deve ser incentivada.

#### 6.4.3 Análise SWOT

A análise SWOT efetuada à presença do edifício modular em Lima está representada na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise SWOT ao edifício modular em Lima

	Vantagens	Desvantagens
Análise interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A modularidade e o sistema de macho-fêmea permitem a adaptação completa do edifício consoante os diferentes projetos. Tempo de construção reduzido e não necessita de mão-de-obra especializada;</li> <li>- Os painéis sanduiche têm uma elevada resistência ao fogo, são resistentes à humidade e mofo e permitem um isolamento acústico;</li> <li>- Melhor comportamento térmico do que um edifício típico da classe social pobre do Peru;</li> <li>- Com a inflação constante dos preços de eletricidade e combustíveis, o favorecimento da redução do consumo energético traduz-se em menores custos para os ocupantes durante o tempo de utilização do edifício.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restrição do tamanho dos módulos devido ao transporte dos mesmos, limitando a dimensão do edifício;</li> <li>-O custo da habitação é superior ao valor de uma casa construída pelo método tradicional.</li> </ul>
Análise externa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A indústria começa a considerar a eficiência na utilização de recursos e adoção de práticas sustentáveis e a reconhecer a eficiência energética como uma oportunidade de mercado;</li> <li>- Acima de 35% da população em Lima vive em favelas denominadas “<i>pueblos jóvenes</i>” ou “<i>barriadas</i>”. Possibilidade de uma rápida execução de um planeamento urbano;</li> <li>- Entre 1970 e 2012, houve mais de 21000 desastres naturais na Venezuela, destruindo cerca de 226000 edifícios e danificando 376000 [41]. A reconstrução rápida destes é possível através de edifícios modulares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exportação para um país em desenvolvimento, cuja principal preocupação é o crescimento económico e não tanto a proteção ambiental ou aumento da eficiência energética;</li> <li>- População na sua maioria pobre, sem acesso a recursos e sem capacidade económica para comprar uma habitação. Incentivos devem ser provenientes do governo através de programas sociais;</li> <li>- Geograficamente, a expansão urbana está limitada pelo Oceano Pacifico e pela cordilheira dos Andes.</li> </ul>

## 6.5 Porto, Coimbra e Lisboa

As três cidades portuguesas também têm claramente uma estação de aquecimento e arrefecimento tal como Lima, no entanto a maior amplitude térmica neste clima resultou em maiores necessidades energéticas. Pode-se concluir através dos resultados obtidos uma inadaptabilidade do edifício modular a estas cidades.

### 6.5.1 *Passive Design*

Uma das principais recomendações para atingir um *Zero Energy Building* num clima temperado passa pelo aumento da inércia térmica dos módulos PUR. Para se obter inércia térmica em painéis sanduíche como os utilizados no presente caso, sem alterar a planta do edifício, pode-se recorrer a PCM – *Phase Change Materials*. A característica interessante deste tipo de materiais prende-se com o facto de poderem armazenar energia sob a forma de calor latente bem como calor sensível. À medida que a temperatura aumenta, o material muda a sua fase de sólido para líquido, através de uma reação endotérmica - o PCM absorve calor. Similarmente, assim que a temperatura diminui, o material altera a sua fase de líquido para sólido através de uma reação exotérmica – o PCM liberta calor. Um estudo que introduziu PCM num módulo semelhante ao presente estudo é descrito no “ANEXO E: Módulo Sandwich de Poliuretano”, no subcapítulo “Estudo de introdução de PCM’s num módulo sandwich de PUR:”.

Como a grande maioria dos materiais mais inovadores atualmente, a utilização de PCM’s acarreta um custo elevado e é, neste momento, a maior barreira à sua utilização global. Outro revés à sua utilização é que, apesar da riqueza académica de estudos existentes em relação à utilização destes, não existem muitos edifícios que comprovaram a fiabilidade de recorrer a estes materiais. A introdução de uma tecnologia nova e aparentemente inexperiente, particularmente no clima económico atual, é um risco bastante grande que as empresas podem não estar dispostas a correr [42].

Em conclusão, a utilização de PCM’s deve ser estudada e experimentada em termos industriais, caso se pretenda utilizar o edifício modular em Portugal. Além da introdução de inércia térmica, o edifício deve ser adaptado ao facto de existir uma estação de aquecimento e de arrefecimento.

Por essa razão, durante o período de aquecimento, deve-se procurar elevar os ganhos passivos e diminuir as perdas para o exterior. Os envidraçados devem estar orientados a Sul e deve-se diminuir as perdas para o exterior promovendo uma maior espessura de isolamento e a utilização de vidros duplos ou triplos. Por outro lado, durante o período de arrefecimento, deve-se incentivar a ventilação natural. Por último, os sombreamentos devem ser dimensionados, tal que durante o Verão haja um controlo dos ganhos solares, mas que no Inverno os maximize.

### 6.5.2 *Sistemas solares*

As três cidades portuguesas estão a uma distância próxima entre si e o seu clima é muito similar portanto, a radiação solar que atinge cada uma das cidades é bastante semelhante. À medida que nos aproximamos do Equador, a radiação solar é mais elevada, o que significa que o Porto tem a radiação solar menos intensa e Lisboa a mais intensa.

Comum a todas as cidades é a distinta diferença entre a estação de aquecimento e arrefecimento, reconhecendo-se a primeira entre Outubro e Março e a segunda entre Abril e Setembro.

No caso do Porto, a radiação direta normal média diária é de  $4000\text{Wh/m}^2$ , com um valor máximo e mínimo, de  $8500\text{Wh/m}^2$  e  $0\text{Wh/m}^2$ , respetivamente. A radiação total para uma superfície horizontal é em média  $4200\text{Wh/m}^2$  por dia, com uma gama aproximadamente entre  $500\text{Wh/m}^2$  e  $8000\text{Wh/m}^2$ , conforme representado na Figura 97. Por último, o mês mais intenso em termos de radiação é Junho e o menos intenso é Dezembro.

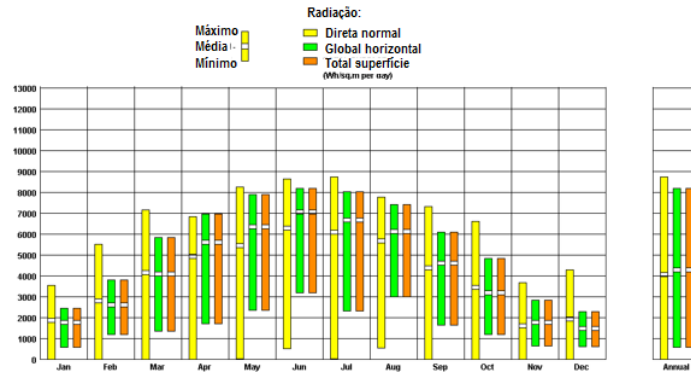


Figura 97 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal no Porto

Relativamente a Coimbra, os valores médios anuais praticamente iguais ao Porto. A diferença entre as duas cidades são os meses com maior intensidade em termos de radiação solar, já que neste caso é Julho, tal como é visível na Figura 98.

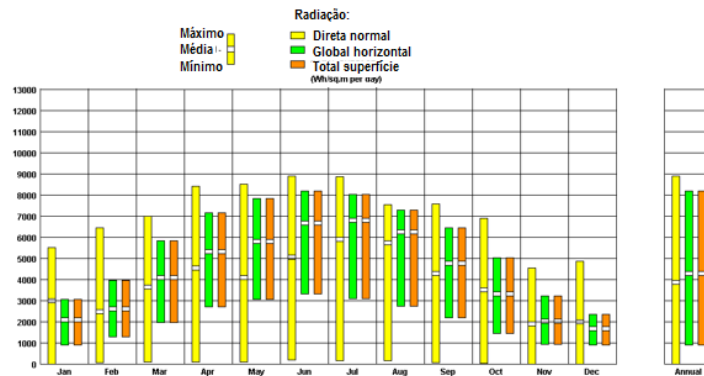


Figura 98 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Coimbra

Lisboa, sendo o local mais a Sul estudado das cidades portuguesas, tem uma radiação solar maior do que Porto e Coimbra. A radiação direta normal tem uma média diária de  $4800\text{Wh/m}^2$ , com um valor máximo e mínimo, de  $8500\text{Wh/m}^2$  e  $0\text{Wh/m}^2$ , respetivamente. A radiação total para uma superfície horizontal é em média  $4500\text{Wh/m}^2$  por dia, com uma gama aproximadamente entre  $500\text{Wh/m}^2$  e  $8800\text{Wh/m}^2$ .

Julho é o mês com maior radiação solar, com uma radiação direta normal média de  $7000\text{Wh/m}^2$  por dia e global horizontal de  $7500\text{Wh/m}^2$ . Contrariamente, Janeiro tem uma radiação direta normal média de  $3000\text{Wh/m}^2$  e global horizontal de  $2000\text{Wh/m}^2$ , tal como representado na Figura 99.

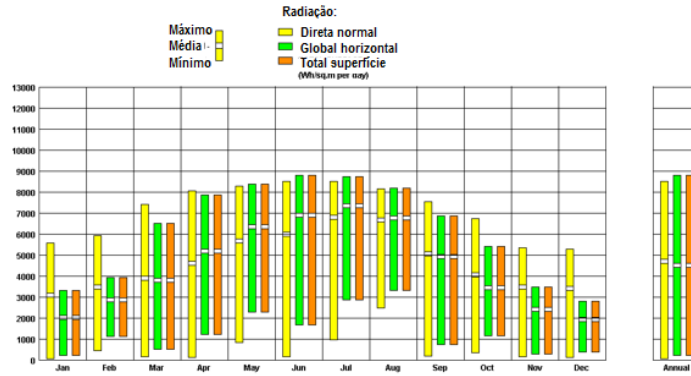


Figura 99 - Radiação solar média diária para uma superfície horizontal em Lisboa

Em relação à simulação dos sistemas solares, os resultados entre as três cidades são muito similares, com um pequeno aumento da fração solar à medida que as cidades estão localizadas a Sul. Isto significa que Lisboa tem a maior fração, seguida de Coimbra e, por fim, o Porto.

Como se pode observar na Figura 100, a fração solar no Porto atinge no máximo 70% para uma inclinação do coletor de 40° (próximo do valor da latitude), ao passo que o rendimento do coletor mantém-se constante, mesmo variando a inclinação, com um valor próximo dos 35%.

O comportamento do sistema solar em Coimbra é muito similar ao do Porto, como se pode observar na Figura 101, no entanto o valor máximo da fração solar atinge 75%. Por último, o sistema solar em Lisboa tem uma fração solar que ronda os 80%, superior aos dois casos anteriores. A variação quer da fração solar quer do rendimento do coletor consoante a inclinação deste é similar a Coimbra e Lisboa, como se pode concluir a partir da Figura 102.

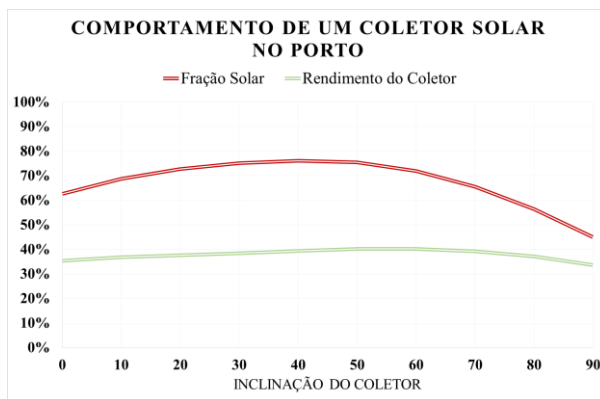


Figura 100 - Comportamento de um coletor solar no Porto

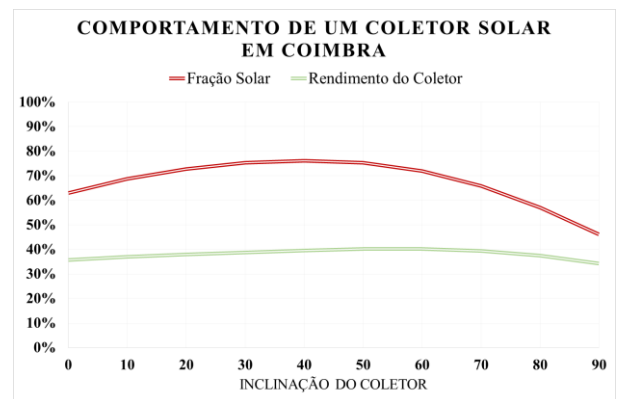


Figura 101 - Comportamento de um coletor solar em Coimbra

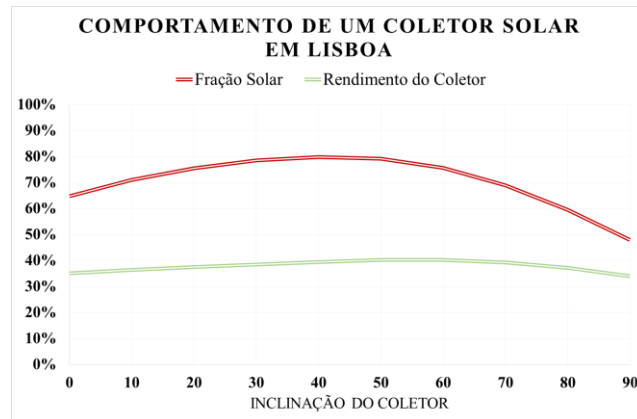


Figura 102 -Comportamento de um coletor solar em Lisboa

### 6.5.3 Análise SWOT

A análise SWOT realizada às três cidades portuguesas em estudo está representada na Tabela 14.

Tabela 14 - Análise SWOT ao edifício modular no Porto, Coimbra e Lisboa

	Vantagens	Desvantagens
Análise interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A modularidade e o sistema de macho-fêmea permitem a adaptação completa do edifício consoante os diferentes projetos. Tempo de construção reduzido e não necessita de mão-de-obra especializada;</li> <li>- Os painéis sanduiche têm uma elevada resistência ao fogo, são resistentes à humidade e mofo e permitem um isolamento acústico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restrição do tamanho dos módulos devido ao transporte dos mesmos, limitando a dimensão do edifício;</li> <li>- Edifício não adaptado ao clima mediterrânico. Necessário um estudo mais aprofundado acerca do <i>passive design</i> do edifício, principalmente a nível da inércia térmica. Elevados custos de investigação e desenvolvimento de produto;</li> <li>- A construção modular tem uma quota insignificante do mercado a nível europeu, percecionada geralmente como inferior quando comparada a um edifício tradicional. Devido a esse preconceito, o preço de venda do edifício, em Portugal, pode não equivaler ao seu valor real e existir dificuldade de implementação no mercado;</li> <li>- Os edifícios modulares têm limitações a um nível estético, que podem ser ultrapassadas com a construção tradicional;</li> <li>- Obrigatoriedade do comprador possuir o terreno para a construção, sendo que o investimento total para este é a soma do edifício modular e da compra do terreno. Em alguns casos, o custo total pode ser superior ao valor de uma casa construída pelo método tradicional.</li> </ul>
Análise externa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Todos os Estados-Membros têm de assegurar, até ao dia 31 de Dezembro de 2020, que todos os novos edifícios são quase <i>Zero-Energy Buildings</i>, o que significa que a aposta em edifícios eficientes e o desenvolvimento de políticas vão no sentido da eficiência energética;</li> <li>- A eficiência energética é atualmente uma oportunidade de mercado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de <i>benchmarking</i>, o que pode comprometer as oportunidades mencionadas;</li> <li>- Falta quer de consciência ambiental quer de retorno no investimento entre os proprietários de terreno, agentes imobiliários, locatários.</li> </ul>

## 6.6 Conclusão

Concluiu-se que, além de um comportamento superior do edifício modular comparativamente ao edifício típico latino-americano, nesta região existem oportunidades de negócio que devem ser exploradas, tais como a rápida urbanização e a propensão a desastres naturais.

Estudo revelaram também a ineficiência destes edifícios. Estes causam não só danos ao ambiente como às economias locais. A perda, em média, de 35% de água potável através de fugas nas 17 maiores cidades latino-americanas é um dos exemplos mais expressivos [43].

Face à rápida urbanização e às economias emergentes desta região, a construção urbana continuará a acelerar, ampliando os danos ambientais e financeiros, caso as ineficiências do setor da construção não sejam corrigidas. Atualmente, os edifícios consomem cerca de 21% de água potável e 42% de eletricidade, enquanto emitem cerca de 25% de CO<sub>2</sub> e produzem 65% de resíduos. Estudos indicam que uma mudança para edifícios sustentáveis implicaria uma redução no consumo de energia até 50% e de água até 40%. Além disso, seria possível alcançar uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> até 39% e na produção de resíduos em cerca de 70% [43].

Por outro lado, a pobreza que se verifica nestes países e o facto das preocupações de crescimento económico suplantarem as de eficiência energética constituem uma ameaça ao sucesso do investimento nesta área.

No que toca a Portugal, tendo em conta o comportamento do edifício português, será muito difícil a entrada neste mercado, já que é imprescindível aumentar a inércia térmica do edifício modular para poder competir com o atual modelo. Apesar das oportunidades que a EPBD proporciona, a necessidade de investigação e desenvolvimento do produto é um revés para a empresa.

Para tornar o produto da empresa mais vantajoso foram realizadas recomendações em específico para a adaptação a cada clima. Todas as opções apresentadas ao longo deste capítulo possibilitam que o balanço entre energia consumida e produzida, ao longo de um ano, seja nulo. O estudo acerca dos sistemas solares revelou que todos os locais são vantajosos para integrar estes sistemas no edifício, sendo Caracas a cidade com mais exposição solar e, consequentemente, maior rendimento desses sistemas. Conclui-se, assim, que atingir um *Zero Energy Building* através do caso em estudo é possível.

Na Tabela 15 estão descritas, para cada local, as principais recomendações a deliberação resultante da análise SWOT realizada.

Contudo, associado a estas medidas existe um custo financeiro que não foi considerado por sair do âmbito do presente relatório. Recomenda-se, como trabalho futuro, a realização de uma análise *cost-effectiveness* para determinar quais as opções, em cada projeto específico, que devem ser incorporadas no edifício.

Tabela 15 - Recomendações específicas para obter um *Zero Energy Building* em diferentes climas

<b>Cidade</b>	<b>Recomendações</b>
<b>Bogotá</b>	<p>Possibilidade de investir neste mercado, já que o edifício modular tem um comportamento melhor do que o edifício típico latino-americano;</p> <p>São necessárias alterações para atingir um ZEB. Deve-se promover os ganhos solares e minimizar as perdas para o exterior através da envolvente.</p>
<b>Caracas</b>	<p>Forte possibilidade de retirar quota do mercado neste tipo de clima, devido à grande adaptação destes edifícios a climas quentes;</p> <p>Os maiores investimentos devem ser dirigidos para este tipo de clima;</p> <p>Alterações necessárias para atingir um ZEB. Deve-se reduzir ao máximo os ganhos solares e promover ventilação natural do edifício.</p>
<b>Lima</b>	<p>Possibilidade de investir neste mercado, já que o edifício modular tem um comportamento similar ao edifício típico latino-americano</p> <p>Alterações necessárias para atingir um ZEB. Deve-se projetar o edifício tendo em conta a fase de aquecimento e arrefecimento deste tipo de climas.</p>
<b>Porto, Coimbra, Lisboa</b>	<p>Obrigatoriedade de investigação e desenvolvimento do produto para poder competir neste mercado. Deve-se principalmente aumentar a inércia térmica do edifício.</p> <p>Atualmente sem quota de mercado.</p>

## 7 Análise Regulamentar

A aplicação de diferentes medidas no projeto no sentido de obter um *Zero Energy Building* e atingir este mesmo objetivo é apenas uma vertente do conceito de arquitetura sustentável. Esta ideia de sustentabilidade na arquitetura pretende reduzir o impacto ambiental dos edifícios em todas as suas fases de vida, desde a sua conceção até à demolição.

No sentido de avaliar e certificar ambientalmente o edifício obtido no capítulo anterior para as diferentes cidades, será utilizado o critério mais difundido internacionalmente, o LEED. Para mais informação sobre os sistemas que certificam ambientalmente os edifícios mais empregados atualmente recomenda-se a leitura do “ANEXO I: Ferramentas de avaliação e certificação da sustentabilidade de um edifício”.

### 7.1 LEED

O sistema LEED é composto por um guia e uma lista de verificação de projeto na qual são distinguidas seis áreas totais, sendo necessário satisfazer um conjunto de pré-requisitos de desempenho.

Os projetos candidatos a uma certificação LEED devem:

- Obedecer às leis e regulamentos ambientais vigentes do local onde será realizado o projeto;
- Ser um espaço/edifício completo e permanente;
- Utilizar uma fronteira do edifício no local admissível, isto é, o limite do projeto deve incluir todos os terrenos associados ao edifício, incluindo os terrenos que serão perturbados pela construção do mesmo;
- Ter uma área mínima de construção de 93m<sup>2</sup>;<sup>6</sup>
- Cumprir com uma taxa mínima de ocupação;
- Comprometer-se a partilhar a informação dos gastos energéticos e de água do edifício com a *US Green Building Council* durante um período mínimo de 5 anos;
- Estar de acordo com um rácio mínimo de 2% entre a área de construção e área do local.

Caso obedeça a estes requisitos, o projeto pode então ser submetido a uma avaliação consoante os diferentes critérios existentes. Pela Figura 103, conclui-se que o edifício atualmente cumpre as exigências de 13 critérios e é possível cumprir mais 66 créditos, perfazendo um total de 79 créditos. Assim, dependendo de cada projeto individualmente e, tendo em conta, o número de créditos passíveis de serem cumpridos, o edifício pode atingir a classificação LEED de Ouro ou não atingir sequer o nível de certificado.

Para a contextualização da Figura 103 e a consequente conclusão, os critérios presentes na classificação serão explicados passo a passo, assim como as suposições feitas para atingir as exigências.

---

<sup>6</sup> O edifício do presente estudo tem 43m<sup>2</sup> de área. No entanto, a modularidade permite aumentar a área do projeto. Por outro lado, a empresa possui diversos projetos que ultrapassam a área mínima permitida.

LEED 2009 for New Construction and Major Renovations				Edifício Modular				
Project Checklist				jun/14				
<b>4 13 9</b>		<b>Sustainable Sites</b>	Possible Points: 26	<b>Materials and Resources, Continued</b>				
Y	?	N		Y	?	N		
1			Prereq 1 Construction Activity Pollution Prevention	2			Credit 4 Recycled Content	1 to 2
	5		Credit 1 Site Selection	2			Credit 5 Regional Materials	1 to 2
		1	Credit 2 Development Density and Community Connectivity		1		Credit 6 Rapidly Renewable Materials	1
			Credit 3 Brownfield Redevelopment			1	Credit 7 Certified Wood	1
	6		Credit 4.1 Alternative Transportation—Public Transportation Access	<b>5 6 4</b>			<b>Indoor Environmental Quality</b>	Possible Points: 15
		1	Credit 4.2 Alternative Transportation—Bicycle Storage and Changing Rooms	Y			Prereq 1 Minimum Indoor Air Quality Performance	
			Credit 4.3 Alternative Transportation—Low-Emitting and Fuel-Efficient Vehicles	Y			Prereq 2 Environmental Tobacco Smoke (ETS) Control	
		2	Credit 4.4 Alternative Transportation—Parking Capacity		1		Credit 1 Outdoor Air Delivery Monitoring	1
	1		Credit 5.1 Site Development—Protect or Restore Habitat			1	Credit 2 Increased Ventilation	1
		1	Credit 5.2 Site Development—Maximize Open Space			1	Credit 3.1 Construction IAQ Management Plan—During Construction	1
			Credit 6.1 Stormwater Design—Quantity Control			1	Credit 3.2 Construction IAQ Management Plan—Before Occupancy	1
		1	Credit 6.2 Stormwater Design—Quality Control			1	Credit 4.1 Low-Emitting Materials—Adhesives and Sealants	1
	1		Credit 7.1 Heat Island Effect—Non-roof			1	Credit 4.2 Low-Emitting Materials—Paints and Coatings	1
		1	Credit 7.2 Heat Island Effect—Roof			1	Credit 4.3 Low-Emitting Materials—Flooring Systems	1
			Credit 8 Light Pollution Reduction			1	Credit 4.4 Low-Emitting Materials—Composite Wood and Agrifiber Products	1
<b>4 6</b>		<b>Water Efficiency</b>	Possible Points: 10			1	Credit 5 Indoor Chemical and Pollutant Source Control	1
Y			Prereq 1 Water Use Reduction—20% Reduction			1	Credit 6.1 Controllability of Systems—Lighting	1
	4		Credit 1 Water Efficient Landscaping			1	Credit 6.2 Controllability of Systems—Thermal Comfort	1
		2	Credit 2 Innovative Wastewater Technologies			1	Credit 7.1 Thermal Comfort—Design	1
		4	Credit 3 Water Use Reduction			1	Credit 7.2 Thermal Comfort—Verification	1
<b>35</b>		<b>Energy and Atmosphere</b>	Possible Points: 35			1	Credit 8.1 Daylight and Views—Daylight	1
Y			Prereq 1 Fundamental Commissioning of Building Energy Systems			1	Credit 8.2 Daylight and Views—Views	1
Y			Prereq 2 Minimum Energy Performance	<b>6</b>		<b>Innovation and Design Process</b>	Possible Points: 6	
Y			Prereq 3 Fundamental Refrigerant Management			1	Credit 1.1 Innovation in Design: Specific Title	1
	19		Credit 1 Optimize Energy Performance			1	Credit 1.2 Innovation in Design: Specific Title	1
		7	Credit 2 On-Site Renewable Energy			1	Credit 1.3 Innovation in Design: Specific Title	1
		2	Credit 3 Enhanced Commissioning			1	Credit 1.4 Innovation in Design: Specific Title	1
		2	Credit 4 Enhanced Refrigerant Management			1	Credit 1.5 Innovation in Design: Specific Title	1
		3	Credit 5 Measurement and Verification			1	Credit 2 LEED Accredited Professional	1
		2	Credit 6 Green Power	<b>4</b>		<b>Regional Priority Credits</b>	Possible Points: 4	
<b>6 8</b>		<b>Materials and Resources</b>	Possible Points: 14			1	Credit 1.1 Regional Priority: Specific Credit	1
Y			Prereq 1 Storage and Collection of Recyclables			1	Credit 1.2 Regional Priority: Specific Credit	1
		3	Credit 1.1 Building Reuse—Maintain Existing Walls, Floors, and Roof			1	Credit 1.3 Regional Priority: Specific Credit	1
		1	Credit 1.2 Building Reuse—Maintain 50% of Interior Non-Structural Elements			1	Credit 1.4 Regional Priority: Specific Credit	1
		2	Credit 2 Construction Waste Management	<b>13 66 31</b>		<b>Total</b>	Possible Points: 110	
		2	Credit 3 Materials Reuse	Certified 40 to 49 points Silver 50 to 59 points Gold 60 to 79 points Platinum 80 to 110				

Figura 103 - Certificado LEED para o edifício modular

Tabela 16 - Critérios "Locais Sustentáveis" da certificação LEED

LOCAIS SUSTENTÁVEIS					
Crédito	Requisito	Comentário	S	?	N
1	O projeto não pode localizar-se em terrenos férteis, terrenos não desenvolvidos cuja elevação é inferior a 1,5m acima da elevação da maior cheia dos últimos 100 anos, terrenos identificados como habitat para espécies em perigo ou em vias de extinção, terrenos a 30m de pântanos, terrenos não desenvolvidos que estejam num raio de 15m de um corpo de água e terrenos que antes do projeto eram públicos.	Durante o processo de escolha do local, deve ser dada preferência a locais que não incluam elementos sensíveis ou terrenos restritivos.	1		
2	Construção do edifício num local previamente desenvolvido e dentro de uma comunidade com uma densidade mínima de 13800m <sup>2</sup> /hectare.	Se o projeto estiver localizado em grandes centros urbanos é um objetivo facilmente alcançável. Caso seja numa comunidade rural, torna-se mais difícil devido à baixa densidade populacional.		5	
3	Desenvolvimento do projeto num <i>brownfield</i> <sup>7</sup> definido por uma agência local, regional ou nacional	A limpeza de um <i>brownfield</i> engloba muitos custos adicionais e um grande investimento, o que muito provavelmente não caberá neste tipo de projetos.			1
4.1	Distância de 805m de uma estação de metro/comboio ou a 402m de uma paragem de autocarro.	Critério bastante dependente do local onde se realizará o projeto, mas possível alcançar, principalmente nos centros urbanos.		6	
4.2	O projeto tem instalações cobertas para armazenamento de bicicletas para mais de 15% dos ocupantes do edifício.	O edifício não possui tais comodidades.			1
4.3	O projeto proporciona comodidades para veículos de baixa emissão e eficientes	O edifício não possui tais comodidades.			3
4.4	Minimização do tamanho do parque de estacionamento ou garagem.	O edifício não possui garagem.	2		
5.1	Caso o terreno do edifício ainda não tenha sido desenvolvido, a perturbação do local deve estar limitada a 12m além do perímetro do edifício; 3m além dos passeios, pátios, estacionamentos à superfície; 4,5m além do lancil da estrada e 7,6m para além de áreas com superfícies permeáveis.	Caso o terreno ainda não tenha sido desenvolvido, pelo tipo de construção modular, a perturbação no local é diminuta e o critério é alcançável.		1	

<sup>7</sup>*Brownfield* é um terreno previamente utilizado para fins industriais ou comerciais que pode estar contaminado e tem potencial para ser reutilizado, desde que seja limpo.

	Caso o terreno já tenha sido desenvolvido, o projeto deve restaurar ou proteger 50% do local (excluindo o local do edifício) ou 20% do local do projeto (incluindo o edifício) com vegetação nativa ou adaptada ao clima.	Caso o terreno tenha sido desenvolvido, existe um custo superior na restauração do terreno o que poderá ser um revés no alcance deste critério.			
<b>5.2</b>	Caso o local tenha requisitos acerca de espaços abertos, o projeto deve considerar uma área de espaço aberto que exceda os requisitos em pelo menos 25%. Caso o local não tenha qualquer requisito de planeamento urbano, o projeto deve ter um espaço aberto, com vegetação, adjacente ao edifício com uma área igual ao edifício. Caso o local tenha requisitos de planeamento, mas não em relação a espaços abertos, estes devem ter uma área igual a pelo menos 20% da área do projeto.	O edifício não possui nenhum espaço aberto.			<b>1</b>
<b>6.1</b>	Caso o terreno tenha uma impermeabilidade igual ou inferior a 50%, o projeto deve implementar um plano de gestão das águas pluviais que impeça um aumento da taxa máxima de descarga após a construção do projeto ou um plano que proteja o edifício de escoamentos provenientes de erosão excessiva. Caso a impermeabilidade do terreno seja superior a 50%, o projeto deve implementar um plano de gestão que permita reduzir em 25% o volume de escoamento de águas pluviais.	Critério bastante dependente do local onde se insere o projeto, no entanto não existe nenhum plano de gestão de águas pluviais.			<b>1</b>
<b>6.2</b>	O projeto deve implementar um plano de gestão de águas pluviais que reduza a cobertura impermeável e promova a infiltração, captura e tratamento de 90% da média anual.	A cobertura é composta por chapa de aço, o que não promove a infiltração nem reduz a impermeabilidade.			<b>1</b>
<b>7.1</b>	Em pelo menos 50% da área de <i>hardscape</i> <sup>8</sup> , as seguintes estratégias devem ser adotadas: sombra proveniente da copa das árvores, sombra proveniente de estruturas cobertas com painéis solares que produzirão energia para compensar a utilização de energia provenientes de fontes não renováveis, sombra provenientes de dispositivos arquitetónicos com um índice de reflexão solar igual ou superior a 29 ou utilizar um sistema de pavimento permeável (pelo menos 50% permeável).	A sombra é fornecida através de palas da cobertura, que tem um SRI superior a 29. É necessário determinar se atinge 50% da área.		<b>1</b>	
<b>7.2</b>	Caso a cobertura tenha uma inclinação superior a 10°, o índice de reflexão solar (SRI) igual ou superior a 29, senão o SRI deve ser igual ou superior a 78.	A cobertura de chapa de aço possui um revestimento, em que o SRI é superior a 29.	<b>1</b>		
<b>8</b>	A potência da iluminação com uma linha direta para qualquer abertura do edifício deve ser reduzida através de um dispositivo automático em 50% entre as 23h00 e 5h00 ou através de proteções nos	O edifício não possui dispositivos automáticos de regulação da iluminação			<b>1</b>

<sup>8</sup>*Hardscape* refere-se a pátios, passeios, vedações e outras estruturas exteriores ao edifício.

	envidraçados controlados por um dispositivo automático que resultem numa transmitância inferior a 10% entre as 23h00 e 5h00.				
--	--	--	--	--	--

Tabela 17 - Critérios "Energia e Atmosfera" da certificação LEED

ENERGIA E ATMOSFERA					
Crédito	Requisito	Comentário	S	?	N
1	Demonstrar uma melhoria percentual na avaliação do desempenho energético do edifício comparado com o desempenho do edifício de referência de acordo com a norma ASHRAE 90.1-2007	A envolvente e os sistemas devem ser projetados para maximizar o desempenho energético. Um modelo de simulação deve ser utilizado para não só avaliar o desempenho energético como identificar as medidas mais rentáveis.		19	
2	Utilização de sistemas de fontes de energia renovável no local para compensar os custos energéticos do edifício. Cálculo do desempenho do projeto, expressando a energia produzida pelos sistemas como uma percentagem dos custos anuais de energia do edifício.	Deve-se avaliar o potencial de utilização de sistemas de fontes de energia renovável para cada local específico e calcular a energia produzida por estes.		7	
3	Implementação de atividades de comissionamento adicional.	Deve ser realizado um contrato com uma entidade independente que se encarregue do comissionamento do edifício.		2	
4	Utilizar equipamentos que minimizam ou não recorrem a compostos que contribuem para a destruição da camada de ozono.	O sistema AVAC e sistemas de refrigeração não devem utilizar estes compostos.		2	
5	Desenvolvimento e implementação de um plano para medição e verificação dos consumos energéticos do edifício ao longo do tempo.	O projeto deve criar um plano de verificação dos consumos energéticos do edifício ao longo do tempo e compará-los com os valores teóricos.		3	
6	Estabelecer um contrato de pelo menos 2 anos para que pelo menos 35% da eletricidade fornecida ao edifício provenha de energias renováveis.	Contrato dependente não só do projeto como do fornecedor de energia elétrica da rede		2	

Tabela 18 - Critérios "Materiais e Recursos" da certificação LEED

MATERIAIS E RECURSOS					
Crédito	Requisito	Comentário	S	?	N
1.1	O projeto deve manter a estrutura do edifício existente (incluindo o pavimento e teto) e o envolvente.	O edifício é modular, não utiliza/mantém a estrutura de edifícios já existentes.			3
1.2	O projeto deve incluir elementos interiores não estruturais (paredes interiores, portas, revestimentos, entre outros) em pelo menos 50% do edifício completos.	O edifício é modular, não inclui elementos interiores não estruturais de edifícios já existentes.			1
2	O projeto deve reciclar/reutilizar resíduos não perigosos provenientes da construção e demolição do edifício. Deve desenvolver e implementar um plano de gestão de resíduos.	Na construção não existe produção de resíduos. Na demolição, os módulos PUR podem ser reutilizados em aplicações menos exigentes.		2	
3	O projeto deve incluir materiais que sejam reutilizados ou recuperados, tal que a sua soma constitua, pelo menos, 5% ou 10% do custo total dos materiais do projeto.	Na demolição, a chapa de aço pode ser reutilizada para o fabrico de novos módulos.		2	
4	O projeto deve utilizar materiais com conteúdo reciclado tal que a soma do conteúdo reciclado pelo consumidor mais metade do conteúdo pré-consumidor (materiais desviados do fluxo de resíduos durante o processo de fabricação) constitua, pelo menos, 10% ou 20% do custo total dos materiais do projeto.	A chapa de aço utilizada quer na cobertura quer nos módulos PUR contém conteúdo reciclado. Deve-se promover a reciclagem junto do consumidor para obter a pontuação desejada.		2	
5	O projeto deve utilizar materiais de construção ou produtos que foram extraídos, colhidos ou recuperados, assim como, fabricados a menos de 805km do local de projeto, tal que a sua soma constitua, pelo menos, 10% ou 20% do custo total dos materiais do projeto.	O edifício não possui qualquer material de construção ou produto próximo do local do projeto.			2
6	O projeto deve utilizar materiais de construção e produtos rapidamente renováveis, tal que a sua soma constitua, pelo menos, 2,5% do custo total dos materiais do projeto. Por rapidamente renováveis entende-se que são feitos a partir de plantas e que são tipicamente colhidas dentro de um ciclo igual no inferior a 10 anos.	O edifício não possui qualquer material de construção ou produto rapidamente renovável.			1
7	Utilização de um mínimo de 50% (com base nos custos) de materiais e produtos à base de madeira que são certificados de acordo com os princípios do <i>Forest Stewardship Council</i> .	O edifício não possui qualquer componente em madeira.			1

Tabela 19 - Critérios "Qualidade do Ar Interior" da certificação LEED

QUALIDADE DO AR INTERIOR					
Crédito	Requisito	Comentário	S	?	N
1	O projeto deve instalar sistemas de monitorização permanente para garantir que os sistemas de ventilação mantêm os requisitos mínimos. O equipamento deve ser configurado para emitir um alarme quando os valores de fluxo de ar ou dióxido de carbono variam de acordo com 10% ou mais dos valores de projeto.	O edifício não possui qualquer sistema de monitorização dos sistemas de ventilação ou da concentração de CO <sub>2</sub> , mas é algo que deve ser implementado para obter a pontuação.			1
2	O projeto deve conceber sistemas de ventilação natural para os espaços ocupados que cumpram os requisitos. Deve ser utilizado um modelo analítico, macroscópico e multi-zona que permita calcular o fluxo de ar em cada zona, sendo que a taxa de ventilação deve ser superior ao valor mínimo definido pela norma ASHRAE 62.1-2007 em 90% dos espaços.	O edifício funcionará com ventilação natural, o que praticamente assegura o valor mínimo definido pela ASHRAE 62.1-2007	1		
3.1	O projeto deve desenvolver e implementar um plano de gestão de qualidade do ar interior. Durante a construção, deve cumprir ou exceder as medidas de controlo recomendadas pela <i>Sheet Metal and Air Conditioning National Contractor Association</i> (SMACNA), proteger os materiais armazenados no local e absorventes dos danos causados pela humidade e se UTA's forem instaladas permanentemente no edifício deve ser utilizado um filtro com uma eficiência mínima	O projeto atualmente não possui um plano de gestão de qualidade do ar interior durante a construção do edifício, no entanto essa possibilidade deve ser estudada.			1
3.2	O projeto deve desenvolver um plano de gestão de qualidade do ar interior e implementá-lo após o acabamento do edifício. As opções baseiam-se no processo de <i>flush-out</i> <sup>9</sup> ou a realização de testes normalizados de acordo com a EPA.	O projeto atualmente não possui um plano de gestão de qualidade do ar interior no final da construção do edifício, contudo é algo que pode ser desenvolvido.			1
4.1	Todos os adesivos e vedantes utilizados no interior do edifício não devem exceder o limite de compostos orgânicos voláteis.	Deve ser feito um levantamento de todos os adesivos e vedantes utilizados e verificar a sua conformidade com os requisitos exigidos.		1	

<sup>9</sup> Processo de forçar a entrada de uma certa quantidade de ar exterior através de um edifício por um período de tempo antes da ocupação para remover alguns poluentes que possam ser emitidos por materiais, tintas, acabamentos.

4.2	Todas as tintas e revestimentos utilizados no interior do edifício não devem exceder o limite de compostos orgânicos voláteis.	Deve ser feito um levantamento de todas as tintas e revestimentos utilizados e verificar a sua conformidade com os requisitos exigidos.		1	
4.3	Para a obtenção deste critério existem duas opções. Por um lado, todos os elementos do pavimento utilizados no interior do edifício devem atender os requisitos de teste e produtos do Departamento de Serviços de Saúde da Califórnia para o teste de emissões de orgânicos voláteis. Por outro lado, todos os tapetes instalados devem cumprir os requisitos, assim como os seus adesivos; todos os pisos devem ser certificados (de cerâmica, de madeira, de borracha, vinil, linóleo e piso laminado); betão, madeira, bambu e cortiça devem cumprir também os requisitos impostos e os adesivos utilizados nas telhas e argamassa devem cumprir os limites impostos pela <i>South Coast Air Quality Management District</i> .	Deve ser feito um levantamento de todos os elementos do pavimento utilizados e verificar a sua conformidade com os requisitos exigidos.		1	
4.4	Todos os compósitos de madeira e produtos <i>agrifiber</i> utilizados no interior do edifício não devem conter adição de resinas de ureia-formaldeído.	Não existe nenhum compósito de madeira ou produtos <i>agrifiber</i> no interior do edifício	1		
5	O projeto deve minimizar e controlar a entrada de poluentes no edifício através das seguintes estratégias: instalação de grelhas de pelo menos 3m de comprimento que capturem partículas que entram no edifício através das entradas externas usadas regularmente, extração de ar suficiente para criar uma pressão negativa em espaços onde gases perigosos ou produtos químicos podem estar presentes ou serem utilizados e aplicação de filtros na insuflação e extração de ar nos edifícios ventilados mecanicamente.	O edifício não controla a entrada de poluentes. A possibilidade da instalação de grelhas deve ser estudada.			1
6.1	O projeto deve providenciar o controlo de iluminação para, no mínimo, 90% dos ocupantes possa ajustar a iluminação às suas necessidades e preferências.	O projeto permite o controlo da iluminação quer natural quer artificial.	1		
6.2	O projeto deve providenciar controlos individuais de conforto para, no mínimo, 50% dos ocupantes possa ajustar o ambiente às suas necessidades e preferências. Janelas operáveis podem ser utilizados para os ocupantes localizados a 6m do interior e 3m de ambos os lados da parte operável de uma janela. As áreas das janelas operáveis devem cumprir os requisitos da norma ASHRAE 62.1-2007.	O projeto permite o controlo das janelas por parte de todos os ocupantes.	1		
7.1	O projeto do edifício juntamente com o sistema AVAC deve garantir os requisitos de conforto térmico presentes na norma ASHRAE 55-2004.	Devem ser realizadas simulações dinâmicas ou monitorização do edifício para verificar este critério		1	
7.2	O projeto deve implementar um sistema de monitorização permanente para garantir que o desempenho do edifício satisfaz os critérios de conforto do critério anterior. Projetos residenciais não são elegíveis para este critério.	Projetos residenciais não são elegíveis para este critério.			1

<b>8.1</b>	O projeto deve permitir que a iluminação natural exista em 75% dos espaços. Este valor deve ser calculado por simulação, método prescritivo, medição ou combinação dos anteriores.	Este valor deve ser calculado por simulação, mas a presença de envidraçados em todas as direções permite uma elevada taxa de iluminação natural.		<b>1</b>	
<b>8.2</b>	O projeto deve permitir que os ocupantes do edifício tenham uma linha de visão direta para o exterior através dos envidraçados, entre 0,76m e 2,28m acima do piso em 90% de todas as áreas regularmente ocupadas.	Todas as divisões possuem envidraçados, o que significa que os ocupantes do edifício têm uma linha de visão direta para o exterior.		<b>1</b>	

Tabela 20 - Critérios "Eficiência na utilização da água" da certificação LEED

<b>EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE ÁGUA</b>					
<b>Crédito</b>	<b>Requisito</b>	<b>Comentário</b>	<b>S</b>	<b>?</b>	<b>N</b>
<b>1</b>	Redução de 50% ou 100% na utilização de água potável na irrigação, através da utilização da captura de água da chuva ou de águas residuais tratadas quer no edifício quer por um órgão público especificamente para uso não potável. Deve-se considerar também dispositivos de irrigação eficiente.	O projeto não utiliza irrigação.	<b>4</b>		
<b>2</b>	Redução do uso de água potável em 50% através da utilização de equipamentos de conservação de água (e.g. urinóis) ou utilização de água não potável (e.g. captura da água da chuva)	Critério dependente dos equipamentos utilizados no edifício para a obtenção da pontuação.		<b>2</b>	
<b>3</b>	Estratégias que em conjunto reduzirão o consumo de água tendo em conta o consumo base calculado para o edifício.	Critério dependente não só dos equipamentos utilizados no edifício como também do consumidor para a obtenção da pontuação.		<b>4</b>	

Tabela 21 - Critérios "Inovação e Processos de Design" da certificação LEED

INOVAÇÃO E PROCESSOS DE DESIGN					
Crédito	Requisito	Comentário	S	?	N
1.1	Inovação em Design: Título específico.	Não possui crédito específico.			1
1.2	Inovação em Design: Título específico.	Não possui crédito específico.			1
1.3	Inovação em Design: Título específico.	Não possui crédito específico.			1
1.4	Inovação em Design: Título específico.	Não possui crédito específico.			1
1.5	Inovação em Design: Título específico.	Não possui crédito específico.			1
2	Profissional acreditado pelo LEED.	O projeto não conta com um profissional acreditado.			1

Tabela 22 - Critérios "Créditos de Prioridade Regional" da certificação LEED

CRÉDITOS DE PRIORIDADE REGIONAL					
Crédito	Requisito	Comentário	S	?	N
1.1	Prioridade regional: Crédito específico	Não possui crédito específico.			1
1.2	Prioridade regional: Crédito específico.	Não possui crédito específico.			1
1.3	Prioridade regional: Crédito específico	Não possui crédito específico.			1
1.4	Prioridade regional: Crédito específico	Não possui crédito específico.			1

## 7.2 Conclusão

O recurso a certificações energéticas internacionalmente reconhecidas propicia o apoio a nível de incentivos nacionais ou mesmo locais aos edifícios verdes. Apesar de alguns países latino-americanos como o Brasil e a Colômbia possuírem sistemas de certificação energética, os sistemas internacionais são os mais utilizados na América Latina para a obtenção de um certificado de eficiência energética[43].

Uma vez que a grande maioria dos países em desenvolvimento tem uma ação governamental fraca, sistemas de certificação regulamentar suportados por várias parcerias com a indústria de construção, tal como o LEED, fornecem uma poderosa forma de iniciar um programa de construção sustentável a nível nacional. [43]

Em suma, a certificação energética através de um sistema como o LEED pode ajudar à entrada e expansão da empresa no mercado sul-americano e, por essa razão, a empresa deve considerá-lo.

Pela análise dos critérios do LEED para novas construções, pode-se concluir que o edifício em estudo tem fortes possibilidades de atingir o nível de certificado, mas consoante o empenho e investimento no projeto pode chegar a atingir classificação de Ouro.



## 8 Conclusão

Através da elaboração do presente trabalho foi possível concluir que a América Latina apresenta-se como uma oportunidade de negócio para a empresa Purever Group. A realidade atual é que os edifícios convencionais nesta região são ineficientes.

Assim, a aposta da empresa em exportar edifícios modulares para este mercado, em rápida expansão, é aconselhável pelas diversas oportunidades que aí se proporcionaram. Ao longo deste estudo, pretendeu-se determinar a que climas o edifício modular está mais adaptado e, por conseguinte, em quais a empresa deve direcionar o seu investimento.

Para tal, iniciou-se o presente relatório com um estudo de clima e conforto para três capitais sul-americanas: Bogotá, Caracas e Lima e, devido em termos comparativos com Portugal, para o Porto, Coimbra e Lisboa.

O edifício modular foi comparado com o típico português e com o típico latino-americano. Os termos de comparação foram os materiais, modo de construção e comportamento térmico. Neste último foram realizadas simulações dinâmicas que visaram determinar quais as necessidades energéticas para manter o edifício termicamente confortável e qual a categoria de conforto que atinja, segundo a norma EN 15251, num regime de *free floating*.

Concluiu-se que, devido à sua construção mais cuidada e desenvolvida, o edifício português tem o melhor comportamento em todos os locais. No entanto, este tipo de construção apenas existe na América Latina em escalões socioeconómicos mais altos e não nos mais baixos. Quando o edifício modular foi comparado com o edifício típico latino-americano, vulgo favela, tinha um comportamento superior, estando apto para exportação para as três cidades sul-americanas estudadas.

No entanto, para atingir um melhor comportamento e ser considerado um edifício passivo ou mesmo um *Zero Energy Building*, o *design* do edifício deve ser alterado e adaptado consoante o clima. Assim, foram investigadas as alterações necessárias para a implementação de um *passive design* na habitação e analisou-se a possibilidade da utilização de sistemas solares. Concluiu-se que Caracas era o clima ao qual o edifício estava mais adaptado e mais facilmente seria atingida a classificação de ZEB.

Por último, foi realizado um estudo acerca da possibilidade de certificar energeticamente o edifício, utilizando os critérios do LEED. Concluiu-se que é possível obter uma certificação Ouro ou não atingir o nível de certificado, dependendo do projeto em que o edifício é inserido.

A certificação energética é um ponto que adquire extrema importância para garantir a escalabilidade da estratégia da empresa e do seu plano de negócios. A certificação por uma associação ou organização internacional que represente os interesses da indústria da construção, como é o caso do *Green Building Council*, pode ajudar à expansão deste projeto nos restantes países em desenvolvimento da região.

No entanto, nos países em desenvolvimento, a ampla implementação de edifícios passivos ou *Zero Energy Building* pode apresentar bastantes obstáculos. A falta de informação, os custos do investimento inicial superiores a um edifício convencional e a complexidade do projeto quer em *design* quer em tecnologia são os principais fatores que não permitem o crescimento destes edifícios. Como tal, e apesar da demanda crescente, a eficiência energética nos edifícios é, atualmente, um nicho do mercado e orientada para suprir a procura para classes socioeconómicas mais altas, focada em edifícios governamentais ou de grandes corporações.

Porém, estudos realizados na América Latina demonstram que os ganhos económicos e ambientais não estão apenas limitados a estes setores, mas também a setores socioeconómicos mais baixos. Consequentemente, surgiram oportunidades significativas na entrada de edifícios sustentáveis no mercado orientado para estas classes, através de financiamentos de programas governamentais suportados por empréstimos de desenvolvimento e outros subsídios internacionais.

O envolvimento e o compromisso genuíno do governo, das organizações internacionais e das instituições bancárias são fundamentais para a expansão dos projetos de edifícios verdes para setores socioeconómicos mais baixos. No entanto, a escalabilidade neste sector é um processo iterativo, já que antes de lançar um programa em grande escala de edifícios verdes, os governos ou organizações devem realizar um programa inicial de teste.

Potencialmente, o estabelecimento de parcerias público-privadas serão uma forma eficaz de poder exportar para estes países, em que o governo forneceria uma certa quantidade de subsídios e o setor privado contribuiria com a capacidade financeira e técnica. Parcerias estabelecidas requerem características fundamentais para se obter sucesso: transparência regulamentar e institucional, maturidade operacional e conhecimento técnico consolidado, apoio político para atrair o setor privado e facilidades financeiras sólidas a longo prazo

Para tornar os projetos da empresa financeiramente acessíveis e possibilitar o estabelecimento de parcerias é necessário ter em conta o custo dos materiais, preço de construção e financiamento necessário. Propõe-se, como trabalho futuro, fazer uma análise *cost-effectiveness* às diferentes alternativas propostas para alcançar um *passive design* do edifício e determinar os custos totais, desde a produção dos módulos até à sua construção e quais as vantagens para os países em questão.

Tendo em conta também que os valores assumidos para taxas de ventilação no caso II e para a aberturas de janelas no caso III resultam de avaliações semi-empíricas, será aconselhável fazer a verificação dos valores considerados em estudo subsequentes e determinar quais os modelos que maximizam a redução das necessidades energéticas.

Por outro lado, para avaliar os reais impactos ambientais deve-se realizar uma análise do ciclo de vida do edifício, desde a sua produção até demolição. No “ANEXO J: Análise do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*)” estão descritas análises passíveis de serem realizadas e que devem ser estudadas.

Por último, grande parte dos países latino-americanos experienciaram uma onda demográfica de urbanização, o que proporcionou as atuais oportunidades de investimento nestes países. Atualmente, a Ásia e África Subsariana estão a passar por essa fase. Um estudo exploratório destes climas e mercados, tal como o realizado no presente relatório é algo que a empresa deve considerar, caso o mercado sul-americano seja consolidado.

## 9 Bibliografia

1. Attia, S., *A Tool for Design Decision Making: Zero Energy Residential Buildings in Hot Humid Climates*, in *Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme*. 2012, Université Catholique de Louvain: Louvain.
2. Marszal, A.J. and P. Heiselberg *A literature review of Zero Energy Buildings (ZEB) definitions*. DCE Technical Reports, 2009. 24.
3. Panagiotidou, M. and R.J. Fuller, *Progress in ZEBs—A review of definitions, policies and construction activity*. *Energy Policy*, 2013. **62**(0): p. 196-206.
4. Li, D.H.W., L. Yang, and J.C. Lam, *Zero energy buildings and sustainable development implications – A review*. *Energy*, 2013. **54**(0): p. 1-10.
5. Adhikari, R.S., et al., *Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?* *Energy Procedia*, 2012. **14**(0): p. 1331-1336.
6. Energy Information Administration, *Annual Energy Review*, U.S. Department of Energy, Editor. 2012: Washington, DC.
7. Market Observatory for Energy, *Key Figures*. 2011, European Commission.
8. International Energy Agency. *IEA Statistics by Country*. 2014 [20/06/2014]; Available from:  
<http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=PORTUGAL&year=2011&product=Balances>.
9. Musall, E., et al. *Net Zero energy solar buildings: an overview and analysis on worldwide building projects*. in *EuroSun conference*. 2010.
10. *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.*, EC, Editor. 2002, Official Journal of the European Communities.
11. *Directive 2010/31/EU Of The European Parliament And Of The Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*, EU, Editor. 2010, Official Journal of the European Communities.
12. Sartori, I., A. Napolitano, and K. Voss, *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*. *Energy and Buildings*, 2012. **48**(0): p. 220-232.
13. Hermelink, A., et al., *Towards nearly zero-energy buildings - Definition of common principles under the EPBD*. 2012, Ecofys.
14. Torcellini, P., et al., *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*, in *ACEEE Summer Study*, NREL, Editor. 2006, Midwest Research Institute: Pacific Grove, California. p. 15.
15. Kılıç, Ş., *A net-zero building application and its role in exergy-aware local energy strategies for sustainability*. *Energy Conversion and Management*, 2012. **63**(0): p. 208-217.
16. Pacheco, R., J. Ordóñez, and G. Martínez, *Energy efficient design of building: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(6): p. 3559-3573.
17. Xing, Y., N. Hewitt, and P. Griffiths, *Zero carbon buildings refurbishment—A Hierarchical pathway*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. **15**(6): p. 3229-3236.
18. Thirugnanasambandam, M., S. Iniyan, and R. Goic, *A review of solar thermal technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. **14**(1): p. 312-322.
19. Timilsina, G.R., L. Kurdgelashvili, and P.A. Narbel, *Solar energy: Markets, economics and policies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(1): p. 449-465.
20. Kalogirou, S.A., *Solar thermal collectors and applications*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004. **30**(3): p. 231-295.

21. Parida, B., S. Iniyar, and R. Goic, *A review of solar photovoltaic technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1625-1636.
22. SolarGIS. *Solar Geographic Information System*. 2014 [28/05/2014]; Available from: <http://solargis.info/>.
23. Kim, D.S. and C.A. Infante Ferreira, *Solar refrigeration options – a state-of-the-art review*. International Journal of Refrigeration, 2008. **31**(1): p. 3-15.
24. Toscano, G., et al., *Emission from realistic utilization of wood pellet stove*. Energy, 2014(0).
25. Thek, G. and I. Obernberger, *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. 2010: Routledge.
26. Arnoldus, M. and R. Bymolt, *Demystifying Carbon Markets: A Guide to Developing Carbon Credit Projects*. 2012: KIT Publisher.
27. Kapsalaki, M., V. Leal, and M. Santamouris, *A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings*. Energy and Buildings, 2012. **55**(0): p. 765-778.
28. Kolokotsa, D., et al., *A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings*. Solar Energy, 2011. **85**(12): p. 3067-3084.
29. Kottek, M., et al., *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. Gebrüder Borntraeger, 2006. **15**(3): p. 259-263.
30. Milne, M., *Climate Consultant 5.5*. 2014, UCLA: Los Angeles.
31. Halawa, E. and J. van Hoof, *The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview*. Energy and Buildings, 2012. **51**(0): p. 101-110.
32. European Committee for Standardization, *EN 15251:2007-08 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics 2007*, European Committee for Standardization: Bruxelles.
33. Pina dos Santos, C.A., Matias, Luis, *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura de Edifícios*, ed. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2006.
34. Ferreira, J. and M. Pinheiro, *In search of better energy performance in the Portuguese buildings—The case of the Portuguese regulation*. Energy Policy, 2011. **39**(12): p. 7666-7683.
35. Mateus, R., *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2004, Universidade do Minho: Universidade do Minho.
36. Borges, D.d.B.e., *Avaliação do impacto do solar térmico para produção de AQS e apoio à Climatização no âmbito da nova Regulamentação in Engenharia Mecânica*. 2008, Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia.
37. Papanikolaou, A. and F. Taucer, *Review of Non-Engineered Houses in Latin America with Reference to Building Practices and Self-Construction Projects*. 2004, European Laboratory for Structural Assessment (ELSA).
38. Fay, M., *The Urban Poor in Latin America*. 2005, Washington D.C.: The World Bank.
39. Fernandes, E., *Regularization of Informal Settlements in Latin America*. 2011, Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy.
40. PassivHaus. *Passive House Institute - The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings*. 2012 [cited 2014 30/05/2014]; Available from: <http://www.passiv.de/en/index.php>.
41. The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) and United Nations Development Programme (UNDP). *DesInventar - Disaster Information Management System*. 2011 [25/05/2014]; Available from: <http://www.desinventar.net/>.

42. Fraser, M., *Increasing thermal mass in lightweight dwellings using phase change materials – a literature review*. Northumbria Working Paper Series: Interdisciplinary Studies in the Built and Virtual Environment,, 2009. **2**: p. 69-83.
43. *Green Building in Latin America*, in *ELLA area: Environmental management 2013*, Evidences and Lesson learned from Latin America (ELLA).
44. Peel, M.C., B.L. Finlayson, and T.A. McMahon, *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2007. **11**(5): p. 1633-1644.
45. Florides, G.A., et al., *Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness*. Applied Energy, 2002. **73**(3–4): p. 299-328.
46. Shaviv, E., *The influence of the orientation of the main solar glazing on the total energy consumption of a building*. Solar Energy, 1981. **26**(5): p. 453-454.
47. Amos-Abanyie, S., F.O. Akuffo, and V. Kutin-Sanwu, *Effects of Thermal Mass, Window Size, and Night-Time Ventilation on Peak Indoor Air Temperature in the Warm-Humid Climate of Ghana*. The Scientific World Journal, 2013. **2013**: p. 9.
48. Baker, D.N.V., *Passive and Low Energy Building Design for Tropical Island Climates*. 1987, London: The Commonwealth Secretariat.
49. Hausladen, G., M. De Saldanha, and P. Liedl, *Climate Skin*. 2008: Birkhauser Architecture.
50. Ashrae, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Comfort Conditions for Human Occupancy*. 2004: American Society of Heating, Air-Conditioning, and Refrigeration Engineers, Inc.
51. Cook, J., *Passive Cooling*. 1989: Mit Press.
52. Zhai, X.Q., Z.P. Song, and R.Z. Wang, *A review for the applications of solar chimneys in buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(8): p. 3757-3767.
53. Khanal, R. and C. Lei, *Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation*. Energy and Buildings, 2011. **43**(8): p. 1811-1819.
54. Hirunlabh, J., et al., *New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation*. Building and Environment, 2001. **36**(3): p. 383-391.
55. Givoni, B., *Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems*. Energy and Buildings, 1991. **17**(3): p. 177-199.
56. *Evaporative Cooling: Saving Energy in More Ways Than Ever*, in *Energy Design Resources E-News*. 2010, Energy Design Resources.
57. Raissi, S. and M. Taheri, *Skytherm: an approach to year-round thermal energy sufficient houses*. Renewable Energy, 2000. **19**(4): p. 527-543.
58. Florides, G. and S. Kalogirou, *Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications*. Renewable Energy, 2007. **32**(15): p. 2461-2478.
59. Rawlings, R.H.D. and J.R. Sykulski, *Ground source heat pumps: A technology review*. Building Services Engineering Research and Technology, 1999. **20**(3): p. 119-129.
60. Sarbu, I. and C. Sebarchievici, *General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings*. Energy and Buildings, 2014. **70**(0): p. 441-454.
61. Castleton, H.F., et al., *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit*. Energy and Buildings, 2010. **42**(10): p. 1582-1591.
62. Lazzarin, R.M., F. Castellotti, and F. Busato, *Experimental measurements and numerical modelling of a green roof*. Energy and Buildings, 2005. **37**(12): p. 1260-1267.
63. Köhler, M., et al., *Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics*. Environmental Management and Health, 2002. **13**(4): p. 382-391.
64. Zhang, X., T. Muneer, and J. Kubie, *A design guide for performance assessment of solar light-pipes*. Lighting Research & Technology, 2002. **34**(2): p. 149-169.

65. Hinnells, M., *Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings*. Energy Policy, 2008. **36**(12): p. 4427-4433.
66. El Chaar, L., L.A. Lamont, and N. El Zein, *Review of photovoltaic technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(5): p. 2165-2175.
67. Tiwari, G.N., R.K. Mishra, and S.C. Solanki, *Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling*. Applied Energy, 2011. **88**(7): p. 2287-2304.
68. Chow, T.T., *A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology*. Applied Energy, 2010. **87**(2): p. 365-379.
69. Tyagi, V.V., S.C. Kaushik, and S.K. Tyagi, *Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(3): p. 1383-1398.
70. Djongyang, N., R. Tchinda, and D. Njomo, *Thermal comfort: A review paper*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(9): p. 2626-2640.
71. ISO/TC 159, *ISO 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. 2005, International Organization for Standardization.
72. Nicol, J.F. and M.A. Humphreys, *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. Energy and Buildings, 2002. **34**(6): p. 563-572.
73. Nicol, J.F. and M.A. Humphreys, *Thermal comfort as part of a self-regulating system*. Building Research and Practice, 1973. **1**(3): p. 174-179.
74. de Dear, R.J. and G.S. Brager, *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55*. Energy and Buildings, 2002. **34**(6): p. 549-561.
75. Gagge, A.P., A.P. Fobelets, and L.G. Berglund, *A standard predictive index of human response to the thermal environment*. 1986. Medium: X; Size: Pages: 709-731.
76. *Painel Industrial - Especificações Técnicas*, ColdKit, Editor. 2014, ColdKit.
77. *Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam*. 2006, Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations.
78. PU-Europe. *Waste management and polyurethane insulation in the context of resource efficiency*. 2013; Available from: [http://www.pu-europe.eu/site/fileadmin/Factsheets\\_public/Polyurethane\\_insulation\\_and\\_waste\\_management.pdf](http://www.pu-europe.eu/site/fileadmin/Factsheets_public/Polyurethane_insulation_and_waste_management.pdf).
79. Castellón, C., et al., *Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels*. Renewable Energy, 2010. **35**(10): p. 2370-2374.
80. Wang, L., J. Gwilliam, and P. Jones, *Case study of zero energy house design in UK*. Energy and Buildings, 2009. **41**(11): p. 1215-1222.
81. Department of Energy, *EnergyPlus Documentation*. 2013: U.S. Department of Energy.
82. Costa, F.d.S., *Desempenho energético de edifícios residenciais no contexto da regulamentação térmica com recurso ao EnergyPlus e TRNSYS*, in *Engenharia Civil*. 2012, Universidade Nova de Lisboa: Lisboa.
83. Solar Energy Laboratory, *TRNSYS 16 Documentation*. Vol. Volume 1 - Getting Started. 2004: Wisconsin University.
84. Lee, W.L., *A comprehensive review of metrics of building environmental assessment schemes*. Energy and Buildings, 2013. **62**(0): p. 403-413.
85. US Green Building Council. *LEED*. 2014 [cited 2014 18/03/2014]; Available from: <http://www.usgbc.org/leed>.
86. Larsson, N., *User Guide to the SB Tool assessment framework*. 2012: iiSBE.

87. LiderA, *Sistema de apoio para a procura, avaliação e certificação da sustentabilidade dos ambientes construídos nas fases de planeamento*. 2010, LiderA.
88. *Decreto-Lei n.º 118/2013*, M.d.E.e.d. Emprego, Editor. 2013: Diário da República, 1.ª série — N.º 159 — 20 de agosto de 2013.
89. *Despacho (extrato) n.º 15793-J/2013*, O.D.T.E.E. Ministério Do Ambiente, Editor. 2013, : Diário da República, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013.
90. *Despacho (extrato) n.º 15793-C/2013*, O.D.T.E.E. Ministério Do Ambiente, Editor. 2013: Diário da República, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013.
91. Lewandowska, A., A. Noskowiak, and G. Pajchrowski, *Comparative life cycle assessment of passive and traditional residential buildings' use with a special focus on energy-related aspects*. Energy and Buildings, 2013. **67**(0): p. 635-646.
92. Ramesh, T., R. Prakash, and K.K. Shukla, *Life cycle energy analysis of buildings: An overview*. Energy and Buildings, 2010. **42**(10): p. 1592-1600.
93. Sesana, M.M. and G. Salvalai, *Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs*. Building and Environment, 2013. **67**(0): p. 211-216.
94. Sartori, I. and A.G. Hestnes, *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article*. Energy and Buildings, 2007. **39**(3): p. 249-257.
95. Hernandez, P. and P. Kenny, *From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)*. Energy and Buildings, 2010. **42**(6): p. 815-821.



## ANEXO A: Classificação do clima mundial

A primeira classificação quantitativa do clima mundial foi apresentada pelo cientista alemão Wladimir Köppen em 1900 [29, 44]. Esta classificação tem por base três níveis, no qual o primeiro é baseado em cinco grupos de vegetação, o segundo está relacionado com a precipitação e, por último, o terceiro está relacionado com a temperatura.

Assim, para os primeiros dois níveis, vem:

Tabela 23 – Primeiro e segundo nível de classificação do clima mundial[29]

Tipo	Descrição do clima	Critério
<b>A</b>	<b>Equatorial</b>	<b><math>T_{\min} \geq +18^{\circ}\text{C}</math></b>
Af	Floresta tropical	$P_{\min} \geq 60\text{mm}$
Am	Monções	$P_{\text{anual}} \geq 25(100 - P_{\min})$
As	Savana com seca no Verão	$P_{\min} < 60\text{mm}$ (no Verão)
Aw	Savana com seca no Inverno	$P_{\min} > 60\text{mm}$ (no Inverno)
<b>B</b>	<b>Árido</b>	<b><math>P_{\text{anual}} &lt; 10 P_{\text{th}}</math></b>
BS	Estepe	$P_{\text{anual}} > 5 P_{\text{th}}$
BW	Deserto	$P_{\text{anual}} \leq 5 P_{\text{th}}$
<b>C</b>	<b>Temperado</b>	<b><math>-3^{\circ}\text{C} &lt; T_{\min} &lt; +18^{\circ}\text{C}</math></b>
Cs	Seca no Verão	$P_{\min_{\text{verão}}} < P_{\min_{\text{inverno}}} + P_{\max_{\text{inverno}}} > 3P_{\min_{\text{verão}}} + P_{\min_{\text{verão}}} < 40\text{mm}$
Cw	Seca no Inverno	$P_{\min_{\text{inverno}}} < P_{\min_{\text{verão}}} + P_{\max_{\text{verão}}} > 10 P_{\min_{\text{inverno}}}$
Cf	Sem época de seca	Não se aplicam os critérios de s e w
<b>D</b>	<b>Neve</b>	<b><math>T_{\min} &lt; -3^{\circ}\text{C}</math></b>
Ds	Seca no Verão	$P_{\min_{\text{verão}}} < P_{\min_{\text{inverno}}} + P_{\max_{\text{inverno}}} > 3P_{\min_{\text{verão}}} + P_{\min_{\text{verão}}} < 40\text{mm}$
Dw	Seca no Inverno	$P_{\min_{\text{inverno}}} < P_{\min_{\text{verão}}} + P_{\max_{\text{verão}}} > 10 P_{\min_{\text{inverno}}}$
Df	Sem época de seca	Não se aplicam os critérios de s e w
<b>E</b>	<b>Polar</b>	<b><math>T_{\max} &lt; +10^{\circ}\text{C}</math></b>
ET	Tundra	$0^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < +10^{\circ}\text{C}$
EF	Gelo	$T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$

O terceiro nível da classificação só tem significado para os climas áridos (B), climas temperados (C) e climas de neve (D).

No caso dos climas áridos (B), este podem ser divididos consoante o valor da temperatura média anual – critério *h* e *k*. No caso dos climas temperados e de neve (C e D), consoante a temperatura média mensal máxima ou mínima, dependendo do critério – critério *a* ao *d*.

Tabela 24 – Terceiro nível de classificação do clima mundial[29]

Tipo	Descrição do clima	Critério
h	Quente	$T_{\text{anual}} \geq +18^{\circ}\text{C}$
k	Frio	$T_{\text{anual}} < +18^{\circ}\text{C}$
a	Verão quente	$T_{\text{max}} \geq +22^{\circ}\text{C}$
b	Verão temperado	Não se aplica o critério de <i>a</i> e existem 4 meses tal que $T_{\text{mes}} \geq 10^{\circ}\text{C}$
c	Verão/Inverno frio	Não se aplica o critério de <i>b</i> e $T_{\text{min}} > -38^{\circ}\text{C}$
d	Continental	Similar a <i>c</i> , mas $T_{\text{min}} < -38^{\circ}\text{C}$

Para garantir a reprodutibilidade dos critérios retirados de [29], deve-se fazer uma breve referência ao significado da nomenclatura utilizada nas Tabela 23 e Tabela 24. A média anual da temperatura junto à superfície (2m) é dada por  $T_{\text{anual}}$  e a média mensal da temperatura do mês mais quente e mais frio por  $T_{\text{max}}$  e  $T_{\text{min}}$ , respetivamente. Em relação à precipitação,  $P_{\text{anual}}$  é precipitação anual acumulada e  $P_{\text{min}}$  é a precipitação do mês mais seco. Adicionalmente,  $P_{\text{min\_verão}}$ ,  $P_{\text{min\_inverno}}$ ,  $P_{\text{max\_verão}}$  e  $P_{\text{max\_inverno}}$  são definidos como os mínimos e máximos valores mensais de precipitação para o Inverno e Verão (neste caso o ano é dividido nestas duas estações, que variam consoante o hemisfério em estudo).

Por último, nos climas áridos, existe a introdução de um valor,  $P_{\text{th}}$ , que representa um limiar de seca que depende da  $T_{\text{anual}}$ , de tal forma que:

$$P_{\text{th}} = \begin{cases} 2 \times T_{\text{anual}} , & \text{se pelo menos } 2/3 \text{ da} \\ & \text{precipitação anual ocorre no inverno.} \\ 2 \times T_{\text{anual}} + 28 , & \text{se pelo menos } 2/3 \text{ da} \\ & \text{precipitação anual ocorre no Verão.} \\ 2 \times T_{\text{anual}} + 14 , & \text{se os critérios} \\ & \text{anteriores não se verificam.} \end{cases}$$

Após este esclarecimento, pode-se observar na Figura 104, o clima mundial segundo a classificação supra mencionada.

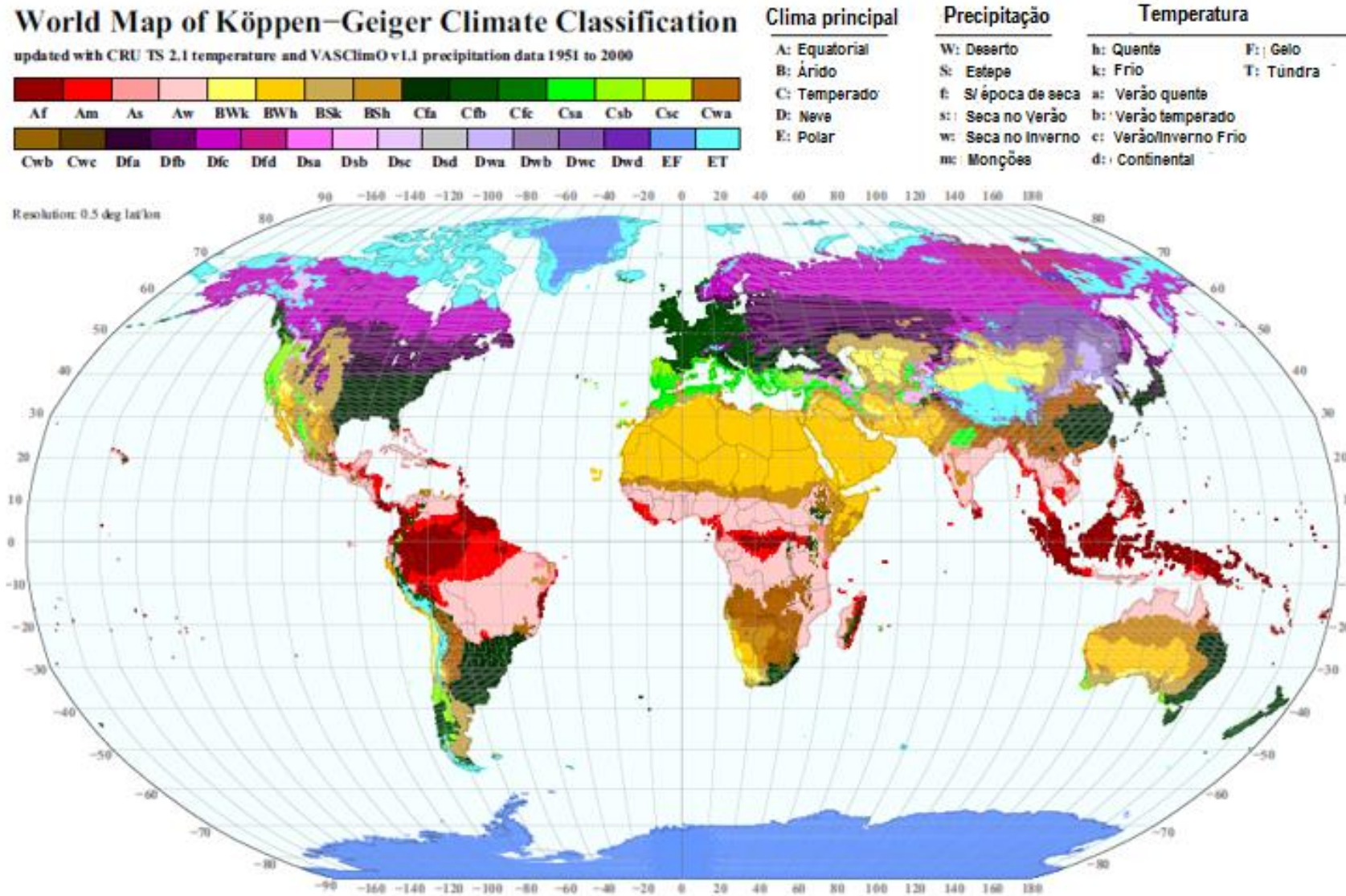


Figura 104 – Mapa-múndi com a classificação climática de Wladimir Köppen[29]



## ANEXO B: *Design* Passivo

Neste anexo pretende-se descrever os principais parâmetros e tecnologias adotadas para se obter um *design* passivo.

### a) Orientação e organização espacial do edifício

O primeiro fator a ter em conta deve ser o índice de compacidade, isto é, a razão entre o volume total do edifício e a área exterior total da fachada. Este conceito está relacionado com a capacidade do edifício de armazenar energia e com a transferência de calor entre o interior e o exterior através da sua envolvente. De forma a minimizar as perdas/ganhos energéticos através da fachada, pretende-se que um edifício seja o mais compacto possível, ou seja, que tenha uma elevada razão entre o volume e a área superficial[16, 45].

O segundo parâmetro é o fator de forma. Este é a razão entre o comprimento e a largura do edifício. Juntamente com a orientação, este define a percentagem da fachada exposta a cada ponto cardeal e, por conseguinte, a radiação solar incidente em cada parede[16].

Entre os parâmetros que intervêm no projeto do edifício, a orientação é o mais importante e o que tem sido estudado mais frequentemente. É aceite que uma orientação a Sul (no caso do hemisfério Norte) permite maiores ganhos solares no Inverno e o controlo da radiação no Verão. Regra geral, os maiores envidraçados devem estar orientados a Sul[16]. Um estudo realizado por *Shaviv*, através de diversas simulações de um edifício de escritórios em Telavive, concluiu que se a orientação a Sul não for possível, sudeste será a melhor opção, tal como se pode observar na Figura 105[46].

	Sul		30° Este		30° Oeste	
	kWh/ano	%	kWh/ano	%	kWh/ano	%
Aquecimento	186	0	231	24	219	18
Arrefecimento	281	0	286	2	369	31
Total	467	0	517	11	588	26
T° max (°C)	26.4		26.6		27.0	

Figura 105 - Consumo energético de um edifício com três orientações diferentes [46]

A orientação correta do edifício é uma medida que não introduz custos adicionais nas fases de projeto, que reduz quer a necessidade energética quer a utilização de sistemas passivos mais sofisticados. Permite também uma maior quantidade de luz natural, reduzindo assim a utilização de luz artificial. Por último, o rendimento dos coletores solares é também influenciado pela orientação devido à quantidade de energia solar que atinge estes sistemas[16].

### b) Envolvente do edifício

A envolvente e o período de funcionamento dos sistemas de aquecimento/arrefecimento são os fatores que têm maior impacto no consumo total de energia do edifício, pois influenciam as condições climáticas existentes no interior do edifício e, por sua vez, a energia necessária para se atingir as condições de conforto térmico [16].

Os aspetos mais relevantes na caracterização da envolvente são o coeficiente de transmissão térmica (U) e a inércia térmica. O primeiro determina a transferência de calor por unidade de área que ocorre através da envolvente. Assim, a redução da razão da área vidro/parede e a utilização de isolamento são fatores que reduzem consideravelmente a necessidade energética. As características da envolvente devem ser conjugadas com a inércia térmica do edifício [16].

A inércia térmica está relacionada com a massa dos materiais estruturais da envolvente, que armazenam calor e causam um atraso temporal na transferência de calor. Esta propriedade térmica é dependente da massa volúmica, capacidade térmica e condutividade de cada material. A distribuição da inércia térmica num edifício deve estar sujeita à orientação de cada superfície, já que se pretende que a descarga de calor seja realizada durante a noite, quando a temperatura exterior decresce. [45].

Em climas quentes, a inércia térmica reduz a temperatura máxima atingida no interior e ao mesmo tempo aumenta a temperatura mínima, uma vez que o calor armazenado durante o dia é irradiado durante a noite para o espaço interior [47]. No entanto, este aumento é apenas útil em dois casos: se a variação de temperatura ao longo de um dia for bastante grande (climas quentes e secos) ou se o edifício estiver desocupado durante o período noturno.

Caso o clima seja caracterizado por uma pequena variação da temperatura ao longo do dia, como em climas quentes e húmidos, a utilização de inércia térmica pode mesmo ser desvantajosa, já que o calor armazenado durante o dia contribui para um aumento da temperatura, durante as horas de sono, acima do limite máximo de conforto [48].

Assim, para reduzir ao máximo a necessidade energética, deve haver um compromisso entre o isolamento e a inércia térmica. Recomenda-se também que o isolamento esteja colocado no exterior, para que o calor acumulado não esteja acoplado com as fontes externas de calor (como por exemplo a radiação solar), mas sim com o interior do edifício [48]. Isto permite que o calor armazenado seja utilizado para manter a temperatura interior estável.

### **c) Envidraçados e sombreamento**

No dimensionamento dos envidraçados é necessário considerar a sua performance em termos de transferência de calor, transmissão solar, iluminação natural e conforto térmico [16]. Em termos energéticos, deve-se minimizar a transferência de calor com o exterior. A utilização de um envidraçado duplo vidro ou triplo e a aplicação de um revestimento de baixa emissividade (Low-E<sup>10</sup>), aplicado sobre o lado interno do vidro externo reduz de uma forma eficaz o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) [49].

Em relação aos ganhos solares, a orientação e a área devem ser combinados com as propriedades dos envidraçados (particularmente a transmissão solar do vidro – g) consoante o clima para que se obtenha uma melhor performance. Em climas frios, pretende-se maximizar os ganhos solares, reduzindo assim as necessidades de aquecimento. Em climas quentes, deve haver um compromisso entre os ganhos solares (para evitar que haja um sobreaquecimento no edifício, sem pôr em causa o conforto visual dos ocupantes).

Sistemas de sombreamento são comumente utilizados no controlo da radiação solar que é transmitida para o interior do edifício. Um dos métodos mais expeditos é a utilização de

---

<sup>10</sup> Revestimentos de baixa emissividade minimizam a quantidade de radiação ultravioleta e infravermelha, sem comprometer a quantidade de radiação visível transmitida.

sombreamentos na fachada. Palas horizontais, como as representadas na Figura 106, são dimensionadas para que, quando a altura do sol é maior, haja sombreamento. A utilização de palas maiores diminui a transmissão de radiação solar para o interior do edifício, o que provoca a redução das necessidades de arrefecimento, mas aumenta as de aquecimento. Pode-se recorrer também a mecanismos que os ocupantes da casa podem controlar, tais como persianas e cortinas[16].

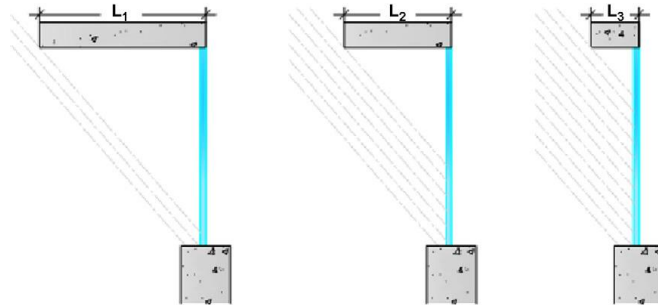


Figura 106 - Efeito do tipo de sombreamento na radiação incidente numa janela[16]

É relevante não só considerar o seu desempenho em termos de conforto térmico, como também de conforto visual, nomeadamente no que toca à iluminação natural do edifício. É necessário que haja uma medida de compromisso de tal forma que se diminua ao máximo as necessidades de arrefecimento, sem pôr em causa a utilização de iluminação natural. Ao diminuir a utilização de luz artificial, reduz-se quer de custos quer de ganhos internos[16, 49].

#### **d) Sistemas passivos de arrefecimento/aquecimento**

Sistemas passivos são uma abordagem no projeto de um edifício que controlam a temperatura interior sem consumo energético, recorrendo geralmente à convecção natural causada pela diferença de densidades entre o ar quente e o ar frio. O termo “passivo” não exclui a possibilidade de utilizar um ventilador ou bomba para melhorar a performance do sistema.

O aquecimento passivo resulta na utilização de certos elementos para armazenar o calor proveniente da energia solar. Espaços fechados com ganhos solares diretos, tal como a chaminé solar ou parede de Trombe, fornecem não só uma superfície extra para a absorção da radiação solar, assim como massa adicional para o armazenamento do calor.

Contudo, a pesquisa de sistemas passivos tem sido direcionada para o arrefecimento. No que concerne ao arrefecimento passivo, este recorre a processos naturais – convecção, evaporação ou radiação [16]. Em seguida serão descritos os principais processos de arrefecimento passivo.

##### **d1) Ventilação natural:**

Um dos principais processos de arrefecimento é a ventilação natural. Este é bastante difundido globalmente e muito utilizado em climas quentes e húmidos, pois a velocidade acrescida do ar, aumenta a transferência de calor por convecção através da pele, o que transmite uma sensação de conforto a uma temperatura mais elevada. Mesmo que as condições de humidade e temperatura no interior sejam iguais ao exterior, com este método os ocupantes sentem-se confortáveis mesmo que, [16].

Na Figura 107, é apresentado um gráfico do aumento da temperatura de conforto em função da velocidade do ar, segundo a norma da ASHRAE 55-2004[50].

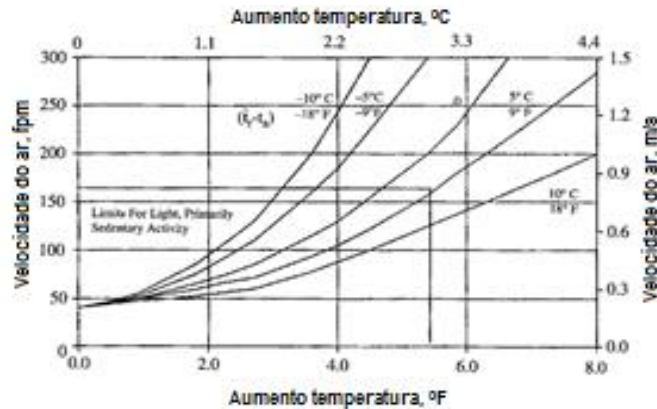


Figura 107 - Aumento da temperatura de conforto através do aumento da velocidade do ar [50]

A ventilação natural ocorre devido a uma diferença de pressão entre o local de entrada e de saída do ar. Por sua vez, esta pode dever-se a uma diferença de temperatura ou devido ao vento[51]. A escolha do local influencia a ventilação natural, uma vez que as condições do vento são afetadas pela topografia local e a rugosidade do terreno. A velocidade do vento pode ser aumentada ou diminuída pelo relevo do terreno e diminuída pela introdução de obstáculos [48].

Tendo em conta o projeto do edifício, o aspeto mais importante é a definição das aberturas, visto que estas influenciam diretamente o padrão do fluxo de ar e, por conseguinte, a eficácia da ventilação[48, 51]. Pode-se observar na Figura 108 de que forma a configuração das aberturas num edifício altera o fluxo de ar.

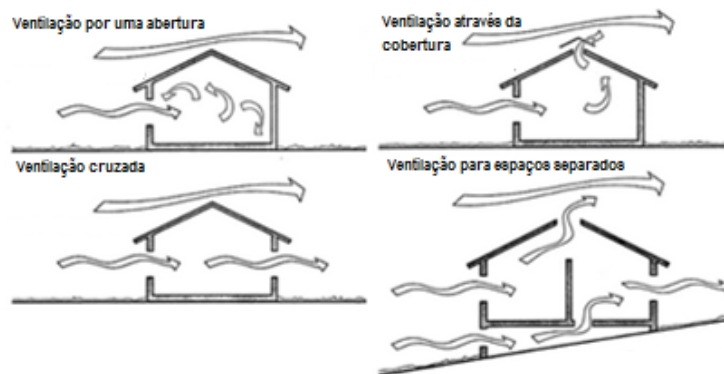


Figura 108 - Influência das aberturas do edifício na ventilação natural induzida pelo vento [48]

O objetivo principal é providenciar o conforto dos ocupantes através do movimento do ar, mas deve-se ter em atenção que, em certos casos, a velocidade não deve ser muito elevada. Por exemplo, em escritórios, a velocidade não deve exceder 1,5m/s, pois causaria o arrasto de folhas de papel. Na Figura 109, a velocidade interior do ar é expressa em função da área da janela. Pode-se concluir que a velocidade do ar não aumenta muito quando a área da janela é superior a 40% da área da parede. Além disso, uma única janela gera uma velocidade do ar no máximo

15% da velocidade do vento, ao passo que se existir ventilação cruzada<sup>11</sup> esse valor pode atingir os 40% [48].

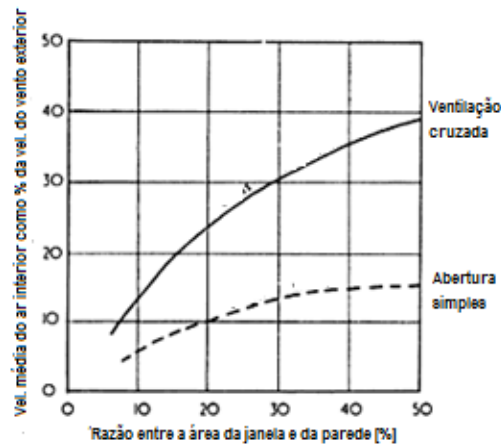


Figura 109 - Efeito do tamanho das aberturas na velocidade do ar [48]

As aberturas não influenciam apenas a velocidade, como também a distribuição do ar. Uma abertura de pequena dimensão gera uma distribuição de ar pouco uniforme e com uma velocidade máxima elevada, ao contrário de uma janela de grande dimensão. Esta, por sua vez, produz uma distribuição uniforme, mas com uma velocidade máxima menor [48].

Além do vento, pode induzir-se um fluxo de ar através da diferença de temperaturas. Um dos principais conceitos é composto essencialmente por um canal de ar de termosifão, no qual o mecanismo de ventilação é a convecção natural. Através da radiação solar, o ar presente na chaminé solar aumenta a sua temperatura e, por conseguinte, diminui a sua densidade. A diminuição da densidade provoca uma subida no ar que será extraído no topo da chaminé provocando a ventilação no edifício. [52] São, geralmente, adotados em climas quentes e secos. No entanto, deve-se ter em atenção a configuração das aberturas, pois este conceito está associado não só à ventilação natural, como também ao aquecimento passivo e mesmo ao isolamento térmico, como se pode observar na Figura 110 [16, 51].

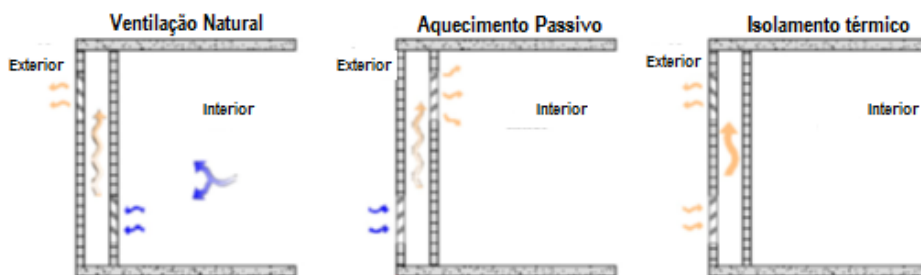


Figura 110 - Modelos da chaminé solar [16]

Diferentes configurações foram propostas com base neste princípio. As mais recorrentes são construídas junto à parede do edifício – parede solar ou parede Trombe – ou na cobertura. A estrutura é edificada para maximizar os ganhos solares, sendo geralmente composta por uma parede absorvedora, uma caixa-de-ar e um envidraçado com elevada transmissividade solar [52].

<sup>11</sup> Ventilação cruzada permite a circulação de fluxo de ar através de aberturas opostas num espaço ou edifício.

A parede solar é um canal vertical adjunto à parede exterior do edifício, estando representando Figura 111 uma possível solução. A radiação solar aquece a superfície e a convecção natural é desencadeada pela diferença de temperaturas existente. Edifícios com telhados de duas águas podem ser projetados para integrar uma chaminé solar, como na Figura 112. Com este conceito, é possível diminuir a fração solar absorvida pela habitação e, simultaneamente, induzir a ventilação natural.

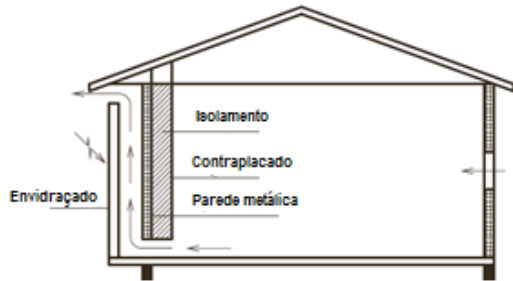


Figura 111 - Parede Solar [52]

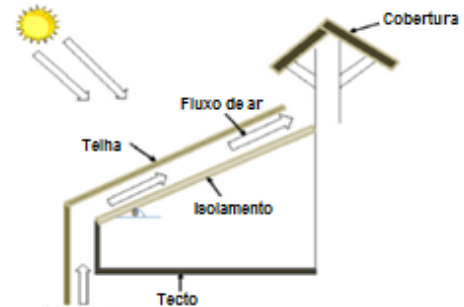


Figura 112 - Chaminé solar integrada no telhado [53]

A solução ótima de uma chaminé solar que promova a ventilação natural deve ter em atenção alguns parâmetros, dos quais se destacam: o rácio entre a altura da chaminé e a caixa-de-ar, a diferença de altura entre os pontos de insuflação e extração de ar, as áreas das aberturas, as características térmicas do material absorvedor e a inclinação da chaminé. Dos parâmetros anteriormente referidos, um dos mais influentes é a largura da caixa-de-ar, já que está diretamente relacionada com o fluxo de ar. No caso das paredes solares mais comuns, uma largura da caixa-de-ar de 0,3m é o valor ótimo[53].

A chaminé solar, introduzida no telhado, é uma ideia promissora quer em termos de performance quer pela sua facilidade de integração no edifício. O valor ótimo da inclinação varia entre 40° e 60°, dependendo da localização e latitude e a altura da caixa-de-ar deverá ser de 0,14m[53]. No entanto, quanto maior o comprimento do coletor solar, menor o fluxo de ar por unidade de área. Assim, foram propostas várias configurações que visam maximizar a ventilação, como é perceptível na Figura 113[54].

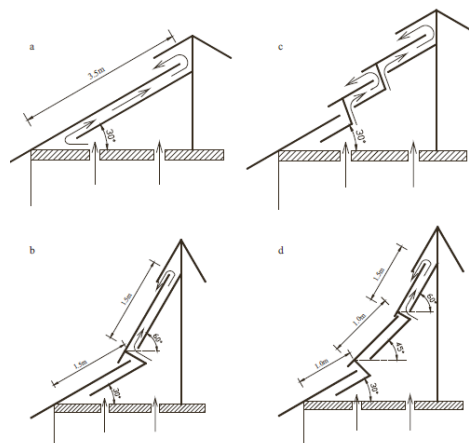


Figura 113 - Possíveis configurações da chaminé solar para maximização da ventilação natural [54]

É necessário ressaltar que as pesquisas que têm vindo a ser realizadas focam-se na questão de maximizar o fluxo de ar com a otimização do *design*. Porém, estas não referem qual deverá ser a ventilação adequada para o conforto dos ocupantes[53].

### **d2) Ventilação noturna:**

A ventilação noturna é adequada para locais com gradientes térmicos consideráveis entre o dia e a noite. Uma situação favorável ocorre quando a temperatura exterior decresce cerca de 15°C durante a noite[49]. Este tipo de ventilação pretende arrefecer a massa estrutural do edifício durante a noite através de elevadas taxas de ventilação. Assim, durante o dia, é possível assegurar o conforto térmico dos ocupantes sem recorrer à ventilação [16, 48].

Para que a ventilação noturna seja eficaz, o edifício deve ter uma elevada massa, dado que este conceito está intrinsecamente ligado à eficácia do ponto de vista do armazenamento de energia. Além disso, a ventilação diurna não é desejável, já que aumenta a temperatura interior. Esta deve situar-se na ordem de uma renovação por hora [55].

Geralmente, esta solução é adotada em edifícios de serviços que estão fechados durante o período noturno, já que a elevada taxa de ventilação poderia causar desconforto aos ocupantes – uma solução passaria por direcionar o fluxo de ar para o teto[55]. Por último, ao restringir a ventilação diurna, limita-se também a gama de conforto dos ocupantes, pois o arrefecimento psicológico devido à velocidade do ar deixa de existir. Neste caso, o movimento do ar deve ser assegurado por ventoinhas[48, 55].

### **d3) Arrefecimento por radiação:**

É um mecanismo de arrefecimento natural que, em certas circunstâncias, pode ser adotado para o controlo térmico dos edifícios. O potencial deste processo é elevado, sobretudo sob céu limpo e em regiões com uma humidade atmosférica diminuta[51].

O arrefecimento por radiação requer a construção de um telhado com um material pesado e com um grande coeficiente de condutibilidade (como por exemplo o betão) e com um isolamento removível[16].

Durante o dia, o isolamento externo no telhado minimiza os ganhos devidos à radiação solar. A massa do telhado pode, assim, atuar como um dissipador de calor, absorvendo o calor do interior do edifício durante o dia. Durante a noite, o isolamento é removido, o que permite o arrefecimento da cobertura através da convecção natural e por trocas de radiação com o céu[16]. As trocas de calor por radiação são bastante eficazes no arrefecimento, já que a temperatura do céu é bastante inferior à da cobertura.

### **d4) Arrefecimento evaporativo:**

Este é um dos métodos mais eficazes, já que aproveita correntes de ar fresco para diminuir a temperatura interior dos edifícios através da evaporação direta ou indireta da água [16].

Na evaporação direta, o ar exterior é arrefecido através da evaporação da água, aumentando assim a sua humidade relativa. Este componente, visível na Figura 114, é constituído por um cárter que suporta todos os restantes elementos. Junto à entrada do ar exterior, existem almofadas absorventes (constituídas por células de papel especial), que são humedecidas com água, sendo esta circulada através de uma bomba. Por último, encontra-se o ventilador, responsável pela aspiração do ar exterior e pela sua condução através das almofadas, descarregando o ar arrefecido no edifício[51].

Outra solução foi proposta por *Givoni*, em que o mesmo conceito se aplicava, mas não se recorria a um ventilador. As almofadas seriam colocadas junto às janelas e o ar, proveniente

da ventilação natural, seria humedecido. No entanto, pelo facto da vista da janela ser bloqueada, esta medida não tem sido adotada [16, 55].

No entanto, em climas quentes e húmidos, o arrefecimento evaporativo direto não é possível devido à elevada humidade relativa do ar. Nestes casos, a solução passa pelo arrefecimento evaporativo indireto[48]. Em sistemas de evaporação indireta, a humidade absoluta do ar interior não aumenta. Um dos primeiros métodos foi a utilização de um leito de pedras como permutador de calor. O ar extraído do edifício era humidificado (e assim arrefecido) e, em seguida, atravessava o leito de pedras, arrefecendo-o. O ar exterior, antes de ser insuflado no edifício, era conduzido pelo leito de pedras, previamente arrefecido. Assim, o ar exterior era arrefecido sem haver a sua humidificação. Este ciclo de arrefecimento durava entre 10 e 20 minutos[51].

Outros métodos incluem arrefecedores evaporativos indiretos de tubos ou placas, nos quais existem dois fluxos de ar exterior. Um dos fluxos é arrefecido diretamente através da sua humidificação, sendo o outro arrefecido pela transferência de calor entre tubos ou placas, consoante o caso [51].

Se se combinarem os dois processos de arrefecimento evaporativo em série, a corrente de ar obtida pode ter menor humidade relativa e a uma temperatura inferior do que se um processo fosse utilizado isoladamente[51]. Na Figura 115, pode-se observar que o ar exterior, numa primeira fase, atravessa um arrefecedor evaporativo indireto de placas e que posteriormente é humidificado (atravessando as almofadas), sendo arrefecido diretamente.

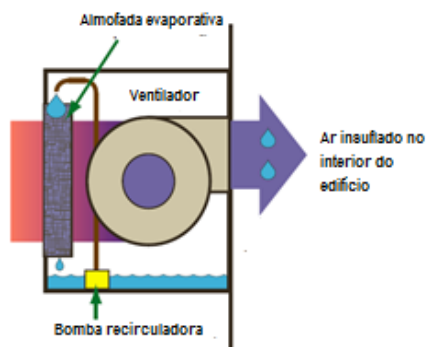


Figura 114 – Sistema evaporativo direto[56]

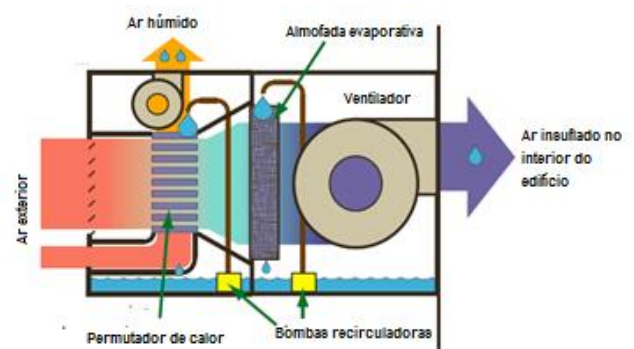


Figura 115 – Sistema evaporativo de duas fases[56]

No entanto, as propostas anteriormente expostas requerem equipamentos, que por sua vez, necessitam de energia para serem colocados em funcionamento. As soluções existentes atualmente, sem necessidades energéticas, baseiam-se no arrefecimento passivo das superfícies exteriores do edifício, geralmente a cobertura [51]. A solução mais comum é a utilização de reservatórios de água em cima do telhado, um conceito denominado *Skytherm*. Neste sistema, a cobertura do edifício (geralmente uma plataforma de metal) está revestido de sacos plásticos finos com água[51, 57].

Na época de arrefecimento, durante o dia, painéis de isolamento cobrem a água para a proteger do sol e do calor, enquanto à noite estes painéis são removidos para que a água seja arrefecida por convecção natural e por trocas de radiação com o céu (arrefecimento radiativo). Após a água ser arrefecida à noite, esta absorverá o calor do espaço imediatamente abaixo no dia seguinte através da evaporação. Na época de aquecimento, a posição do painel é revertida, cobrindo a água durante a noite para minimizar as perdas para o exterior e aumentar os ganhos

solares durante o dia. O modo de funcionamento está representado na Figura 116 e Figura 117, respetivamente.

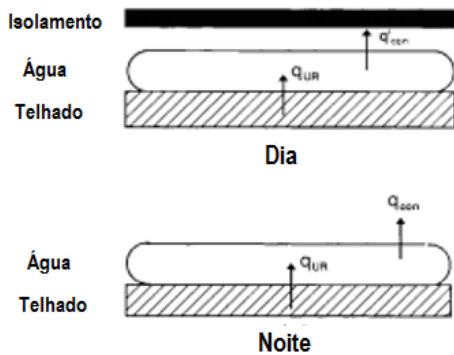


Figura 116 – Conceito Skytherm na época de arrefecimento[57]

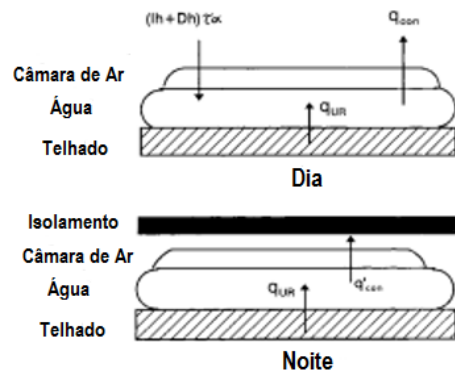


Figura 117- Conceito Skytherm na época de aquecimento[57]

Existe também o caso em que o isolamento é fixo e o arrefecimento é conseguido através da associação com uma parede de Trombe. O ar aquecido na parede de Trombe gera uma corrente de convecção natural que é conduzida através de uma abertura para os reservatórios de água na cobertura. Estes estão a uma temperatura inferior à do ar por evaporação contínua da água. A corrente de ar ao atravessar a cobertura é então arrefecida, sendo em seguida insuflada no edifício. Caso se pretenda aquecimento, as aberturas da parede de Trombe para a cobertura devem estar fechadas, operando o princípio geral de uma chaminé solar. Este método está exemplificado na Figura 118[16, 55].

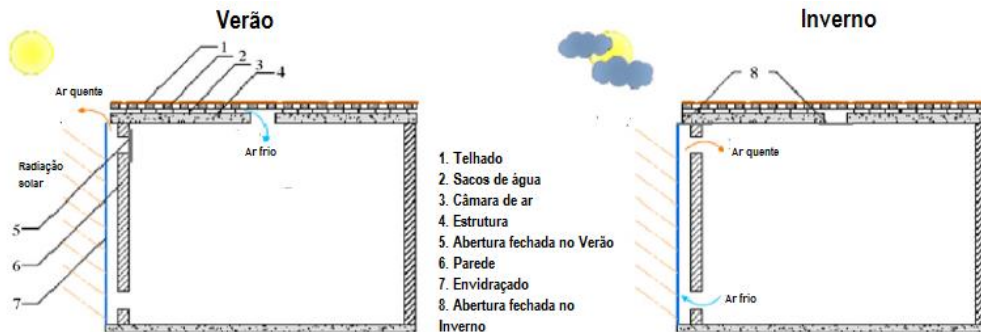


Figura 118 – Sistema de arrefecimento evaporativo indireto [16]

#### d5) Arrefecimento através do solo:

Por último, o processo de arrefecimento através do solo tira vantagem da inércia térmica do solo para arrefecer o edifício [16]. Medições demonstraram que a temperatura do solo, a partir de uma certa profundidade, mantém-se relativamente constante ao longo do ano. Isto deve-se ao facto de as flutuações de temperatura à superfície serem diminuídas pela elevada inércia térmica do solo, à medida que a profundidade aumenta. Além disso, existe uma desfasagem entre as flutuações de temperatura à superfície e no solo. Portanto, a uma certa profundidade, a temperatura do solo será sempre superior ao ar exterior no Inverno e inferior no Verão[58].

Atualmente, a transferência de calor do solo para o fluido faz-se através de condutas no solo. Nestas, a circulação pode ser direta (sendo ar o fluido circulante) ou indireta (a circulação é feita através de um fluido secundário, recorrendo a um sistema com uma bomba de calor)[59].

No primeiro caso, o circuito das condutas pode ser aberto ou fechado. Sendo aberto, o ar exterior atravessa os tubos enterrados no solo para pré-aquecimento ou pré-arrefecimento, sendo em seguida aquecido ou arrefecido por uma unidade convencional de ar condicionado, antes de ser insuflado no edifício. Este procedimento é visível na Figura 119[58].

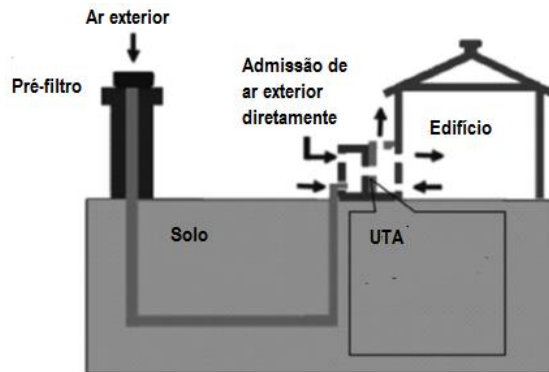


Figura 119 - Princípio básico de funcionamento de sistemas ar-terra abertos [58]

No caso dos circuitos fechados, o ar proveniente do edifício é conduzido através de um circuito, pelo qual se dá a transferência de calor com o solo. O circuito poderá ter diversas configurações consoante o espaço disponível, como se pode observar na Figura 120. Geralmente, a eficiência destes permutadores ar-terra aumenta quanto maior for o comprimento do tubo ou maior a profundidade à qual este está enterrado. Contudo, a eficiência diminui quanto maior for o diâmetro do tubo[58].

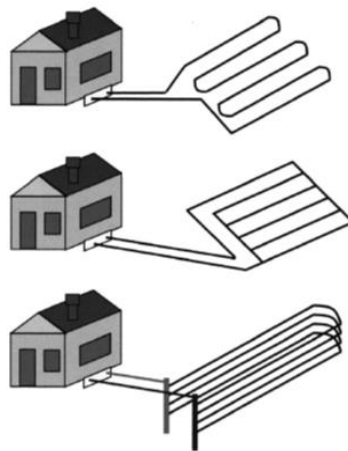


Figura 120 - Configurações possíveis de um circuito fechado [58]

No segundo caso, os sistemas recorrem ao princípio termodinâmico de uma bomba de calor. Estes sistemas baseiam-se num ciclo de Carnot invertido, patente na Figura 121, no qual se podem demarcar três subsistemas fundamentais: subsistema de conexão ao solo (fonte fria), a bomba de calor e um subsistema de distribuição de calor para o consumidor (edifício – fonte quente)[60].

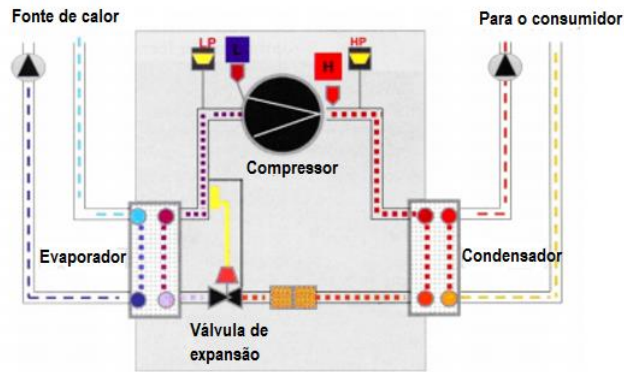


Figura 121 - Funcionamento de uma bomba de calor [60]

Existem três soluções distintas para a fonte fria do ciclo da bomba de calor (quando o sistema opera num ciclo frigorífico e se pretende o arrefecimento do edifício): água subterrânea (*Ground-water heat pumps*), água à superfície (*Surface-water heat pumps*) ou o solo (*Ground-coupled heat pumps*), como se pode observar na Figura 122[60].

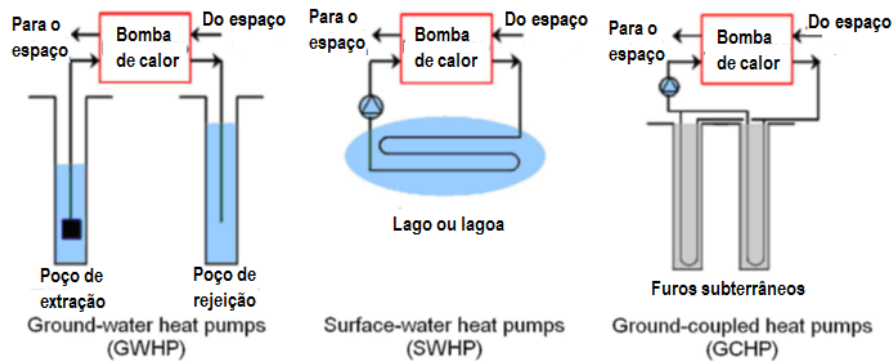


Figura 122 - Esquemas das diferentes classificações dos sistemas com bomba de calor [60]

No primeiro caso, a utilização de água subterrânea como fonte fria, tem vantagens como um custo inicial menor e menor necessidade de área. No entanto, a sua aplicação é bastante restrita, já que a disponibilidade de água subterrânea é limitada e tem elevados custos de manutenção, devido à corrosão das tubagens[60].

No segundo caso, a transferência de calor para a fonte fria é constituído por um fluido que circula em tubagens de polietileno de elevada densidade (HDPE) posicionados a uma profundidade adequada de um lago, lagoa ou reservatório. Contudo, este sistema apresenta uma grande desvantagem, já que a temperatura da água à superfície é bastante afetada pelas condições ambientais, especialmente no inverno[60].

Por último, a fonte fria é o solo em que o calor é rejeitado através de um circuito fechado, em que nele circulam água ou um fluido anticongelante. O circuito tanto pode ser instalado verticalmente como horizontalmente, dependendo do espaço disponível e do tipo de solo. Estes sistemas tem o potencial de reduzir a energia necessária para o arrefecimento em 30-50% e a energia para o aquecimento em 20-40% [60].

Sistemas com circulação direta têm inerentemente uma eficiência superior, já que não existe a circulação de um fluido secundário, mas o seu projeto é mais minucioso, assim como podem existir problemas ambientais. Além disso, o desenvolvimento fúngico é superior comparativamente aos sistemas de circulação indireta, daí que, atualmente, esta solução seja preterida em relação à bomba de calor[59].

### d6) Cobertura jardinada:

A cobertura jardinada (ou *Green Roof*) é um conceito geralmente associado ao *Zero Energy Building*, no qual a cobertura do edifício está coberto parcialmente ou mesmo totalmente por uma camada de vegetação. Este conceito divide-se em duas classificações[61]:

- Extensivo: a camada de substrato é fina com um baixo nível de plantio, tipicamente sedum ou relva, sendo muito leve para a estrutura e que requerem pouca manutenção;
- Intensivo: a cama de substrato é mais profunda para permitir que o enraizamento da vegetação, geralmente arbustos e árvores, necessitando de uma manutenção regular.

Geralmente, o telhado estrutural do edifício é coberto por um revestimento de impermeabilização e sobre este está colocada uma barreira anti raízes que impede a danificação da estrutura. As camadas superiores têm a função de drenagem e retenção, isto é, recolher as partículas finas e deixar a água passar. No topo, a vegetação e o solo, enriquecido em húmus e minerais, completam a estrutura. Na Figura 123 está representado um típico *green roof*[62].

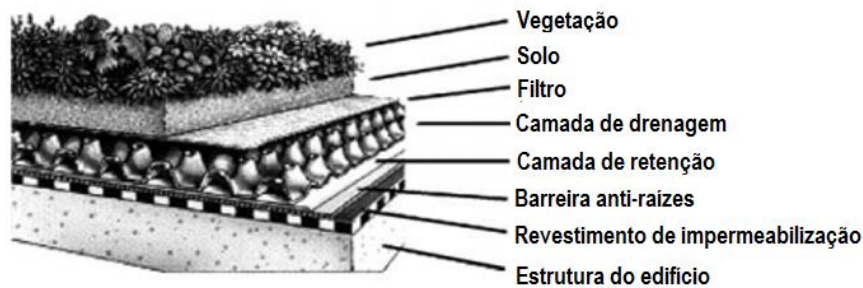


Figura 123 - Diferentes camadas de um *Green Roof* extensivo [62]

Esta solução acarreta benefícios não só para o edifício, mas também para o ambiente circundante. Por um lado, durante a época de aquecimento, a introdução de inércia térmica e isolamento reduz as necessidades energéticas. Por outro lado, na época de arrefecimento, provocam a diminuição da temperatura da cobertura, o que se traduz numa diminuição do consumo energético anual. A retenção da água é a principal causa para a redução de temperatura no telhado do edifício[61, 63].

A Figura 124 compara os resultados obtidos num estudo realizado por *Lazzarin et al* [62] entre uma cobertura jardinada seca e húmida e um telhado tradicional durante a época de arrefecimento. Neste estudo, a transferência de calor devido à convecção e radiação foi modelada recorrendo a um coeficiente de adução [62].

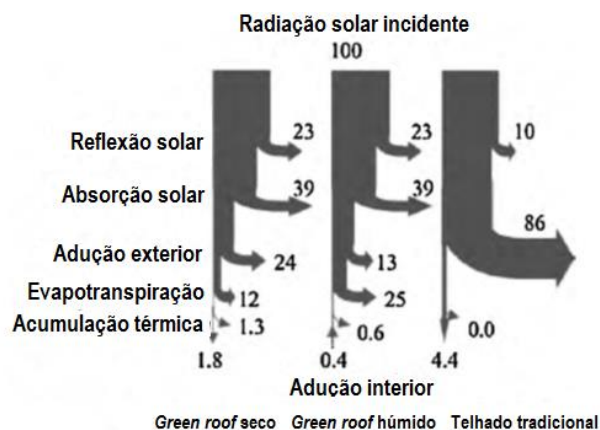


Figura 124 - Comparação das trocas energéticas em diferentes tipos de coberturas[62]

Constata-se que num *green roof* húmido, a perda por evapotranspiração é mais do dobro do que o *green roof* seco. Assim, o primeiro não só reduz o fluxo de calor que chega ao interior do edifício (tal como o último), como também remove calor do interior do edifício, funcionando como um dissipador passivo de calor [62].

Várias conclusões podem ser retiradas da figura anterior. A primeira é que não só existe o efeito de arrefecimento devido à evaporação da água, como também o efeito de isolamento, diminuindo o fluxo de calor. Além disso, melhoram a refletividade da cobertura, diminuindo assim os ganhos solares. No entanto, apesar de melhorar a proteção térmica do edifício, este não deve substituir a camada de isolamento[61]. A existência do solo introduz inércia térmica ao edifício, estabilizando assim as temperaturas interiores ao longo de todo o ano [61, 63].

Além das vantagens presentes na climatização do edifício e redução dos consumos energéticos, deve-se salientar outros benefícios deste conceito. À medida que mais solo urbano é impermeabilizado, as águas pluviais sobrecarregam o sistema de saneamento, o que causam inundações, levando a que águas residuais atinjam a superfície. Este caso é especialmente próprio em climas tropicais, já que existe uma precipitação elevada em pouco espaço de tempo. Assim, a retenção da água nos *green roofs* permite quer uma melhor gestão das águas pluviais quer uma melhoria na qualidade de escoamento de água[61, 63].

Este conceito também assegura uma melhor qualidade da água, uma vez que reduz a poluição causada pelas inundações de águas residuais. Tem também efeitos positivos como a retenção de poluentes e a remoção de nutrientes que são essenciais para melhorar a qualidade da água nos rios e mesmo na rede [63].

Em termos urbanos, promove-se uma melhoria da qualidade do ar e uma redução do calor proveniente do efeito de ilha urbana[61, 63]. Por último, a cobertura dos edifícios tem uma maior durabilidade devido às menores temperaturas à superfície e melhor proteção contra os raios UV [61]. No entanto, para um clima quente e húmido, deverá haver uma especial atenção à fauna e flora devido a problemas higiénicos. Como exemplo, a febre de Dengue é transmitida por um mosquito que utiliza pequenos corpos d'água para se reproduzir[63].

#### **e) Iluminação e equipamentos**

Por último, a redução da energia consumida ao longo do ano deve ter a colaboração do utilizador final. Deve-se promover o uso de lâmpadas e equipamentos o mais eficientes possível, além da sua utilização racional[17].

É estimado que a iluminação elétrica constitui cerca de 30% do consumo total de eletricidade doméstico e de 19% do consumo global. No caso das lâmpadas, a construção do edifício, tal como foi referido, deve permitir a utilização da luz natural o mais possível. Para tal, pode-se recorrer a algumas técnicas que visam a iluminação no centro do edifício sem a necessidade de iluminação artificial[17].

Tradicionalmente, os envidraçados são utilizados como o único meio de admissão de luz natural no edifício. No entanto, em algumas situações estes podem ser prejudiciais, já que podem criar desconforto devido ao brilho excessivo ou sobreaquecimento. Tubos de luz tornaram-se uma alternativa viável, pois permitem a transmissão da luz natural para o interior dos edifícios e em locais que os envidraçados não podem ser utilizados[64].

Os tubos de luz são constituídos por três partes distintas, nomeadamente uma cúpula, um ou vários tubos ligados com a possibilidade de incorporar curvas e um difusor, tal como visível na

Figura 125. A cúpula transparente é, geralmente, instalada sobre o telhado e tem a função de recolher a radiação solar (quer difusa quer direta). É produzida a partir de policarbonato transparente e é desenhada de tal forma a remover radiação indesejável ultra violeta e selar o tubo à entrada de poeira, neve ou chuva [64].

A segunda parte do sistema consiste num ou vários tubos refletores de luz, nos quais a superfície interior é composta por um espelho altamente refletor para que se atinja um elevado coeficiente de transmissão. Estes tubos são adaptáveis para que se possa incorporar curvas em torno da estrutura do edifício. Por último, o difusor é instalado no teto do espaço a iluminar. Tem a forma de uma cúpula convexa para permitir a difusão uniforme da luz para o espaço abaixo[64].

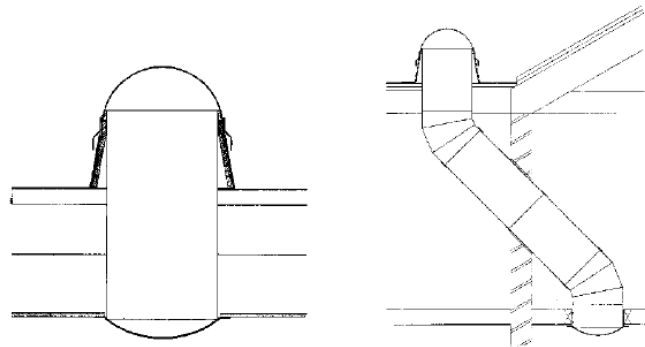


Figura 125 - Tubos de luz [64]

Quando se recorrer à iluminação artificial, esta deve ser apropriada ao ambiente e à função a desempenhar, utilizando lâmpadas mais eficientes. Atualmente, LEDs estão numa fase inicial de desenvolvimento, mas oferecem uma oportunidade de repensar todo o processo de iluminação de edifícios[65].

## **ANEXO C: Energia solar**

A energia solar incidente pode ser aproveitada de diferentes formas. Este anexo pretende descrever quais são as principais técnicas de conversão solar e de que forma se podem aplicar num edifício. Para tal deve-se, em primeiro lugar, diferenciar de que forma se pode aproveitar esta energia e, em seguida, descrever as principais tecnologias de cada um e, após essa introdução, explicitar quais as aplicações de cada um.

### **Coletores solares**

Coletores solares transformam a energia solar em energia interna para um sistema de transporte. Estes dispositivos absorvem a radiação solar, convertendo-a em calor e transferindo-a para um fluido que circula através do coletor. As soluções construtivas são diferentes consoante o rendimento que se pretende e da sua aplicação. Em seguida serão descritas as principais tecnologias e aplicações destes coletores.

#### ***Tecnologia***

Existem diversos modelos de coletores solares. Um dos critérios de classificação é o número de graus de liberdade: zero (estacionários), um ou dois. Quanto maior é o número de graus de liberdade, maior é a capacidade do coletor seguir a trajetória do sol, aumentando assim a quantidade de energia incidente o que se traduz numa maior temperatura do fluido de trabalho [20].

No entanto, para o presente caso, no qual as temperaturas do fluido não são muito elevadas, a utilização de coletores estacionários é suficiente. Em seguida, faz-se uma descrição de cada um dos coletores estacionários.

#### ***Coletor de placa plana:***

Constituído por uma cobertura transparente que transmite a radiação solar, levando a que esta incida numa superfície de elevada absorvidade. Grande parte da energia da radiação solar é absorvida, sendo então transferida em forma de calor para as tubagens onde circula o fluido (água, água com aditivos anticongelantes ou ar) que será direcionado para armazenamento ou utilização direta. A parte inferior e lateral é bem isolada para reduzir ao máximo as perdas por condução. Os tubos podem ser soldados ao coletor ou ser uma parte integrante deste [20].

A cobertura transparente é utilizada para reduzir as perdas por convecção na placa de absorção através da contenção da camada de ar entre a placa e o vidro. Também reduz as perdas por radiação já que é transparente a radiação de baixo comprimento de onda (radiação solar) e praticamente opaca à radiação de grande comprimento de onda (radiação emitida pela placa) [20].

Estes coletores estão geralmente fixos numa posição e orientados para o equador (para sul no hemisfério norte, para norte no hemisfério sul). A inclinação ótima é igual à latitude do local com variações do ângulo entre 10° e 15°, dependendo da aplicação. Pretende-se absorver a maior energia solar possível a um custo menor [20].

### *Coletor de tubos de vácuo:*

Este coletor, em termos de construção, é semelhante ao coletor de placa plana, no entanto as tubagens nos quais circula o fluido está colocado dentro de um tubo selado a vácuo. O vácuo permite diminuir as perdas por convecção e por radiação, o que significa que o calor fica retido, aumentando assim a eficiência. Para além do vácuo, um filme absorvedor é colocado entre os dois tubos de forma a absorver a radiação incidente [20].

Dentro da tubagem circula um fluido, geralmente metanol, que é sujeito a um ciclo de evaporação-condensação. Neste ciclo, a energia solar evapora o líquido e o vapor sobe até um permutador de calor (condensador) que transfere a energia acumulada para outro fluido (água ou ar). O fluido condensado retorna ao coletor solar e o processo é repetido [20].

### *Coletores concentradores:*

Estes coletores são projetados para concentrar raios. Para tal, o coletor é constituído por dois espelhos parabólicos colocados simetricamente em relação ao eixo do tubo que irá absorver a radiação incidente [20].

A utilização dos espelhos parabólicos permite que raios que não estejam paralelos ou alinhados com o coletor seja refletido para o tubo através de múltiplas reflexões internas através dos espelhos. A orientação deste coletor dependerá do ângulo de aceitação, isto é, o ângulo máximo que a radiação pode incidir e ser convergida para o tubo [20].

## **Aplicações**

### **Aquecimento de águas sanitárias**

#### *Termossifão:*

Nos sistemas por termossifão o transporte do fluido é realizado através de convecção natural, o que significa que este tipo de sistema é passivo. O fluido, ao ser aquecido no coletor, expande e torna-se menos denso, subindo até ao topo do depósito de armazenamento, sendo substituído no coletor pelo fluido mais frio que se encontra no fundo no depósito de armazenamento – devido à estratificação que ocorre no depósito. No depósito pode ainda haver uma forma auxiliar de aquecimento para que o fluido atinja a temperatura desejada. O funcionamento acima descrito está representado na Figura 126 [20].

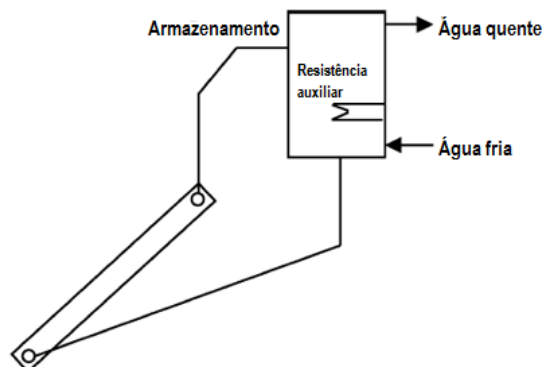


Figura 126 - Sistemas de termossifão [20]

A principal desvantagem é que são unidades bastantes altas e durante a noite o ciclo inverte-se, havendo o arrefecimento da água. Para que isto não suceda, o tanque deve estar colocado numa posição superior ao coletor de pelo menos 30cm [20].

*Sistemas do coletor integrado com armazenamento:*

Estes sistemas utilizam o armazenamento de água quente como parte integrante do coletor, como por exemplo, a superfície do depósito de armazenamento ser utilizado para absorver a radiação solar. A grande desvantagem deste tipo de sistemas é a elevada perda térmica para o exterior, já que a maior parte da superfície do depósito não pode ser isolada e é intencionalmente exposta para que haja a absorção da radiação solar, o que leva a uma redução abrupta da temperatura da água durante a noite[20].

*Circulação direta:*

Sistemas de circulação direta recorrem a uma bomba para circular a água desde o depósito de armazenamento até ao coletor, quando a energia solar disponível é suficiente para aumentar a temperatura da água. Como a circulação é feita através da bomba, o depósito pode ser colocado quer numa cota superior quer inferior ao coletor [20].

Geralmente, nestes sistemas, o depósito de armazenamento é equipado com um equipamento auxiliar de aquecimento, porém dois depósitos podem ser usados [20].

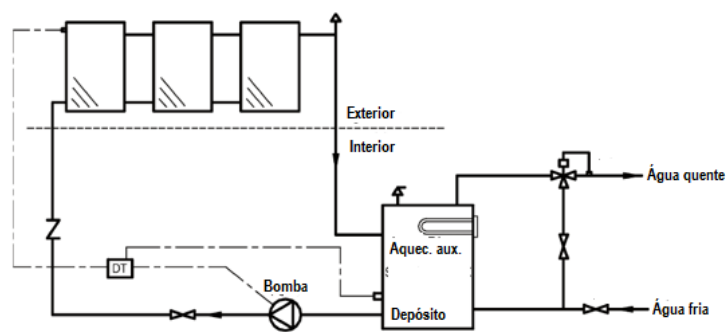


Figura 127 - Sistemas de circulação direta [20]

*Sistema de aquecimento de água indireto:*

Sistemas indiretos de aquecimento de água são similares ao anterior, no entanto o fluido do coletor está presente num circuito fechado, em que o calor é transferido para o depósito de água através de um permutador de calor. O fluido mais comum é uma solução de água e glicol, apesar de outros fluidos como óleos de silicone possam também ser utilizados. [20]

É necessário salientar que como o circuito é fechado, o sistema requer um tanque de expansão e uma válvula limitadora de pressão. Caso o fluido possa começar a decompor-se ou tornar-se corrosivo a altas temperaturas é necessário também uma proteção para sobre temperatura.[20]

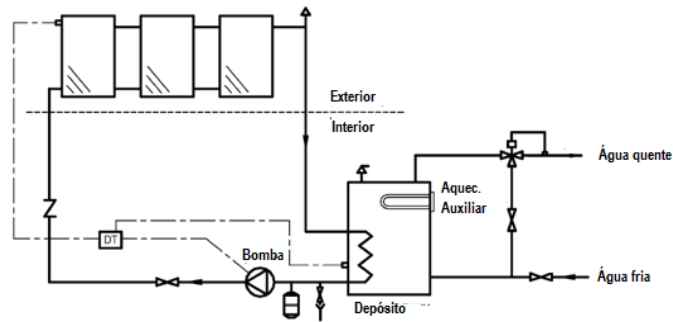


Figura 128 - Sistemas de aquecimento indireto [20]

### Sistemas a ar:

Sistemas a ar são sistemas indiretos, tal como o anterior, em que o fluido do coletor é ar sendo utilizado um permutador de calor ar-água. Este tipo de sistemas geralmente recorre a dois depósitos de água – um para armazenamento e outro para aquecimento auxiliar. A principal vantagem é que o ar não corre risco de congelamento ou ebulição e é não-corrosivo. Porém, o equipamento de circulação do ar ocupa mais espaço e as fugas de ar são mais difíceis de detetar.[20]

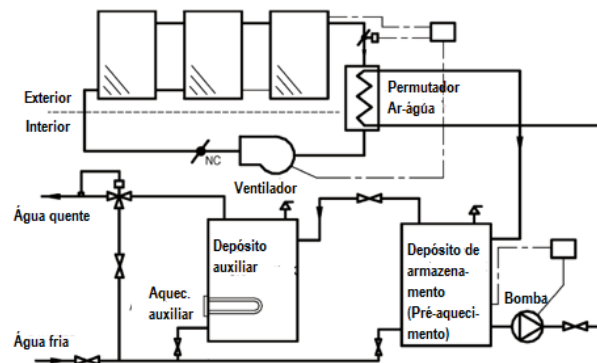


Figura 129 - Sistemas a ar [20]

### Aquecimento do interior do edifício:

Sistemas de aquecimento do interior do edifício, de forma geral, utilizam coletores para aquecer um fluido, unidades de armazenamento para conservar a energia até ao momento em que for necessário e um equipamento de distribuição para que o aquecimento dos espaços seja controlado. Estes sistemas são combinados com o aquecimento de águas quentes sanitárias.[20]

### Sistemas a água:

Consistem em várias combinações dos sistemas referidos anteriormente. Quando são utilizados para aquecimento do espaço e produção de água quente, este sistema permite o controlo independente do depósito de armazenamento e do depósito auxiliar, já que ao mesmo tempo que a água proveniente do coletor é adicionada ao depósito de armazenamento, água do depósito é removida para suprir a carga do edifício. [20]

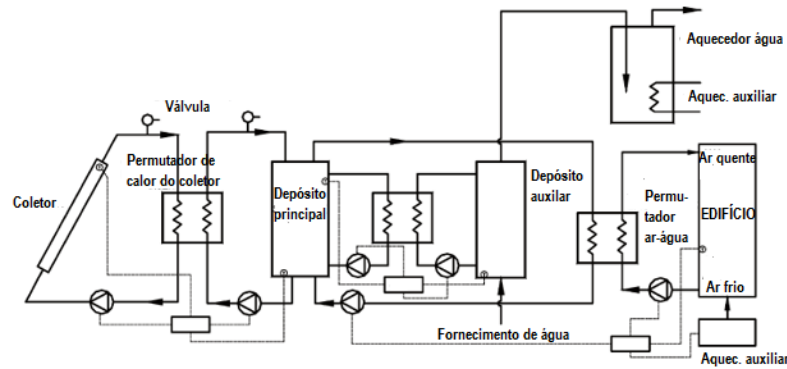


Figura 130 - Sistema a água de aquecimento do edifício e AQS [20]

### Sistemas a ar:

Neste domínio, os diferentes modos de operação são conseguidos através do controlo do fluxo de ar. Na maior parte dos casos não é prático combinar os modos de adição de energia (proveniente do coletor) e remoção de energia (aquecimento do interior do edifício) no depósito de armazenamento. [20]

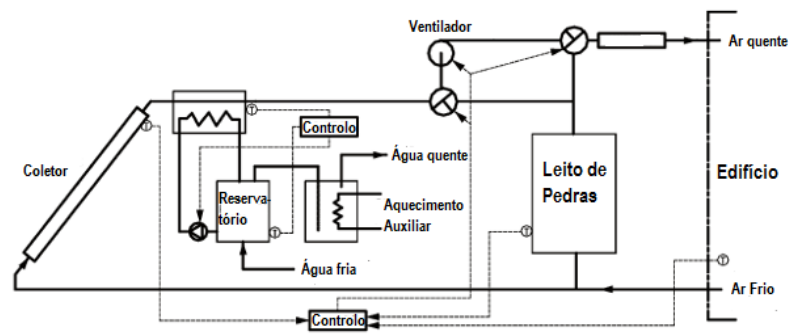


Figura 131 - Sistema a ar de aquecimento do edifício e AQS[20]

### Refrigeração solar térmica:

Sistemas de refrigeração solar térmica utilizam o calor proveniente do sol invés da produção de eletricidade para produzir o efeito de arrefecimento, recorrendo-se geralmente aos coletores solares de placa plana ou de vácuo (devido à sua maior eficiência). Dentro deste sistema existem duas tendências distintas. [23]

#### Processo termomecânico:

Neste caso, a refrigeração é obtida através de um processo termomecânico, o qual está representado na Figura 132. A bomba de calor converte o calor proveniente do coletor solar em energia mecânica (trabalho), que por sua vez aciona o compressor mecânico do ciclo de compressão de vapor de uma máquina frigorífica, para remover o calor  $Q_e$  da fonte fria à temperatura  $T_L$ , sendo o calor  $Q_C$  rejeitado para o ambiente à temperatura  $T_M$ . Para a produção de trabalho a partir do calor proveniente do coletor solar, tanto o ciclo de Rankine como de Stirling foram testados. [23]

A eficiência será a razão entre  $Q_c$  e  $Q_g$ , em que máxima eficiência estará limitada pela eficiência de um ciclo de Carnot com as mesmas temperaturas de trabalho. Assim, vem na equação 1: [23]

$$\eta_{Sol.-Arref.}^{ideal} = \eta_{Sol.-Trab.}^{ideal} \times \eta_{Trab.-Arref.}^{ideal} = \frac{T_L}{T_H} \times \left( \frac{T_H - T_M}{T_M - T_L} \right) \quad (1)$$

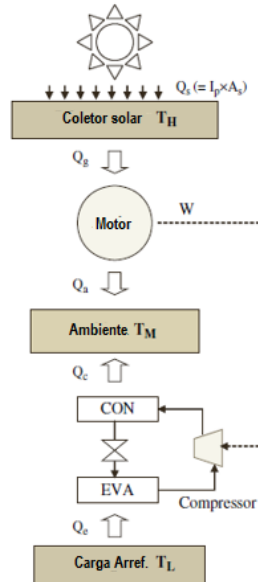


Figura 132 - Funcionamento de um ciclo de arrefecimento termomecânico [23]

Para que este sistema possa ser competitivo, o preço da combinação do coletor solar com a bomba de calor deve ser comparável à utilização de um painel fotovoltaico.

#### Processo por sorção:

No segundo caso, o arrefecimento é obtido por sorção<sup>12</sup>, isto é, a atração física ou química entre um par de substâncias. Entre as duas substâncias, aquela com maior temperatura de fusão é considerada o sorbente e a que tiver menor temperatura de fusão é utilizada como fluido frigorígeno (será o sorbato). Os ciclos termodinâmicos podem ser fechados ou abertos [23]

Na Figura 133 está representado um sistema fechado que inclui o ciclo de sorção. De forma geral, existem dois componentes importantes: absorvedor - onde ocorre a sorção – e o gerador - onde ocorre a dessorção (processo inverso à sorção). Para além destes, é necessário um evaporador, condensador e um coletor solar - responsável por fornecer a energia necessária ao processo.

Relativamente ao processo, o gerador recebe o calor proveniente do coletor solar  $Q_g$  de forma a regenerar o sorbente, ou seja, há a separação das duas substâncias – o sorbente e um vapor frigorígeno. Este último é direcionado para o condensador, onde passa para o estado líquido, sendo o calor rejeitado para o ambiente  $Q_c$ . [23]

<sup>12</sup>Sorção refere-se à simultaneidade dos processos de absorção e adsorção. Absorção é o processo no qual uma substância incorpora outra num estado diferente do seu. Ocorre absorção de líquidos e gases por sólidos e líquidos. A adsorção é o processo pelo qual uma substância (gás ou líquido) adere à superfície de outra (sólido).

O fluido proveniente do condensador é conduzido para o evaporador. Neste componente, o fluido remove calor  $Q_e$  da fonte fria, evaporando. O vapor frigorífero entra no absorvedor, no qual é absorvido pelo sorbente regenerado na primeira etapa, rejeitando calor  $Q_a$  para o ambiente, iniciando assim um novo ciclo.

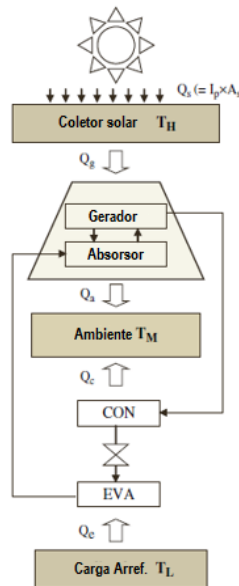


Figura 133 - Esquema de um sistema de sorção[23]

Do conceito de sorção, os dois processos (quer a absorção quer a adsorção) foram adotados como mecanismo de arrefecimento. A refrigeração utilizando a absorção tem sido a mais estudada e aplicada, já que requer um consumo de eletricidade nulo ou muito pequeno. Por outro lado, as dimensões físicas de um equipamento de absorção são menores do que se for de adsorção, devido ao maior coeficiente de transferência de calor do absorvente. Por último, a fluidez do absorvente garante maior flexibilidade para obter uma máquina mais compacta. Este método, atualmente, tem COPs que variam entre 0,3 e 1,2. A seleção do tipo de sistema de absorção depende principalmente da performance do coletor solar escolhido.[23]

Relativamente à adsorção, esta pode ser física ou química. Na adsorção física, os adsorventes podem ser regenerados apenas sendo aquecidos, no entanto só podem ser regenerados quando atingem o estado de saturação. Por esta razão, são necessários vários leitos de adsorvente para que o processo não seja intermitente. A adsorção química é caracterizada pela forte ligação química entre o adsorbato e o adsorvente, pelo que é mais difícil reverter o processo, havendo a necessidade de maior energia para remover as moléculas adsorvidas.[23]

No ciclo aberto de arrefecimento por sorção, um género particular do processo tem sido estudado em climas húmidos, no qual o sorvente é utilizado para desumidificar o ar. Geralmente recorre-se à sílica gel, alumina ativada, cloreto de lítio ou brometo de lítio.[23]

Se o dessecante for líquido, este circula entre o absorvedor e o regenerador da mesma forma que num sistema de absorção fechado, tal como representado na Figura 134. A principal diferença é que a temperatura de equilíbrio não é determinada pela pressão total, mas sim pela pressão parcial da água do ar húmido ao qual a substância está exposta.[23]

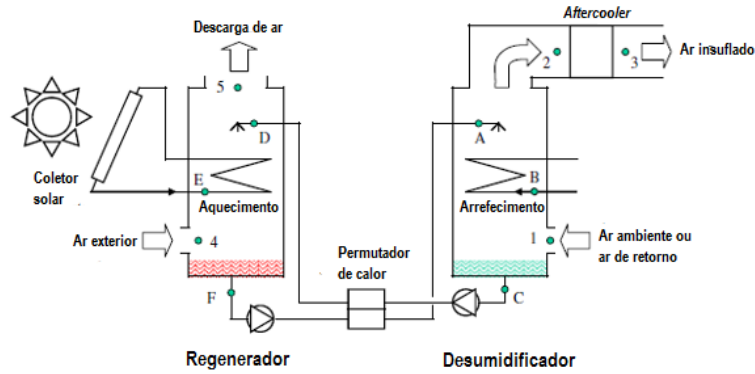


Figura 134 – Sistema de arrefecimento através de um dessecante líquido [23]

Com a preferência de um dessecante sólido, a construção do sistema é diferente como se pode observar na Figura 135. O sistema é constituído por duas rodas giratórias que têm a função de permutadores. O ar extraído atravessa um arrefecedor evaporativo (de A para B), diminuindo a sua temperatura e, em seguida, troca calor com uma das rodas giratórias (de B para C), o que arrefece um segmento destas. Em seguida, é aquecido até uma temperatura elevada através dos coletores solares (de C para D). O ar resultante, quente e húmido, é utilizado para regenerar o dessecante na roda giratória e, por fim, rejeitado para o ambiente (de D para E). [23]

Do outro lado, o ar exterior entra no segmento regenerado da roda giratória, saindo ar seco e quente. Este é arrefecido até uma certa temperatura através do permutador de calor (de 2 para 3). Dependendo da sua temperatura, o ar pode ser diretamente insuflado no edifício ou atravessa um pós-refrigerador (*aftercooler*). [23]

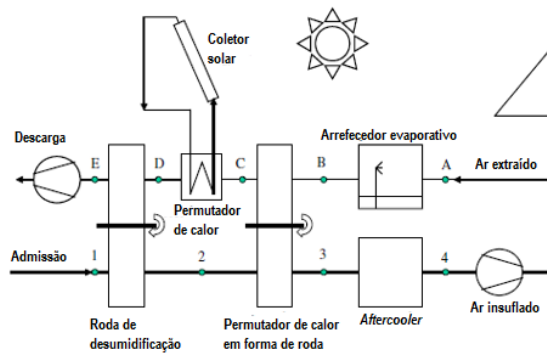


Figura 135 – Sistema de arrefecimento através de um dessecante sólido [23]

## **Painéis fotovoltaicos**

Um painel solar é constituído por células que convertem energia em eletricidade pelo efeito fotovoltaico. Nos últimos 40 anos, diferentes módulos têm sido testados e implementados no mercado. Por essa razão, ao longo deste capítulo, a tecnologia presente nos diferentes painéis fotovoltaicos e as suas principais aplicações serão descritos.

### ***Tecnologia***

#### *Silício:*

A primeira geração de tecnologias fotovoltaicas eram constituídas por uma estrutura cristalina que utilizam silício para produzir as células solares. Esta tecnologia tem sido constantemente desenvolvida para melhorar a sua capacidade e eficiência. Apesar de os custos derivados da sua operação e manutenção, ainda têm um custo inicial bastante grande e o retorno financeiro permanece bastante longo.[66] No entanto esta tecnologia continua a dominar o mercado, havendo atualmente células que atingem 20% de eficiência na transformação de energia radiativa em energia elétrica. [67]

O tipo de célula mais comum é o silício monocristalino e constitui cerca de 80% do mercado e continuará a liderar enquanto não seja desenvolvida uma tecnologia mais eficiente e rentável. Estes painéis tem um comportamento uniforme e previsível e são altamente eficientes, no entanto os processos de produção são lentos, requerem trabalhadores altamente qualificados e consomem bastante energia, o que eleva o seu custo. [66, 67]

Os esforços da indústria fotovoltaica em reduzir custos e aumentar produção levaram ao desenvolvimento de novas técnicas de cristalização. Assim, houve a passagem da utilização de silício monocristalino para policristalino, com uma produção mais simples e, conseqüentemente mais económica, o que permitiu reduzir as falhas na estrutura cristalina e a contaminação do metal.[66, 67]

#### *Tecnologia película fina:*

Em comparação com as células cristalinas de silício, a tecnologia de película fina promete reduzir os custos de investimento de um painel solar através da redução de custos em materiais e fabrico, pois os processos de produção são realizados a uma temperatura menor. Além disso, estas películas podem ser colocadas em diferentes substratos, tais como vidro, aço ou mesmo plástico. No entanto, quando são utilizados no exterior, existe uma degradação da sua eficiência. Atualmente o maior desafio é o aumento da eficiência. [66, 67]

Um dos primeiros desenvolvimentos nesta tecnologia foi a utilização de silício amorfo (os átomos estão organizados de uma forma aleatória), o que permite absorver uma maior parte do espectro solar, no entanto a sua eficiência ronda os 6%-7%. Para melhorar o rendimento destes painéis, diferentes abordagens foram estudadas, tal como a disposição em série de células de silício amorfo e policristalino ou a junção dupla ou tripla de células de silício amorfo [66, 67]

Para além do silício, existem outros materiais tais como o telureto de cádmio (CdTe) ou sulfureto de cádmio/telureto de cádmio, em que o processo de produção é bastante eficiente, o que significa que tem um retorno financeiro menos longo. No entanto, o cádmio é tóxico,

tornando-se uma desvantagem para esta tecnologia. Outras soluções recorrem a disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), bastante similares ao telureto de cádmio. São compostos bastante uniformes e com uma eficiência máxima de 20%, no entanto a escassez de índio é uma contrariedade para o desenvolvimento desta tecnologia. Tanto os painéis de CdTe e o CIGS revelam degradação em ambientes quentes e húmidos, o que leva à necessidade de um revestimento adicional[66]

#### *Composto Semicondutor:*

Nesta tecnologia, camadas de materiais cristalinos são sobrepostas, cada uma com diferentes bandas de absorção, pretendendo-se absorver o máximo possível do espectro solar. Devido ao elevado custo do substrato, o custo destas células é bastante elevado comparativamente às células de silício. No entanto, em aplicações espaciais, o preço é aceitável e é neste mercado que esta tecnologia proliferou.[66]

Uma tecnologia recente recorre a células orgânicas. Atualmente, têm uma eficiência máxima de 4%-5%, no entanto o interesse por este material reside na flexibilidade mecânica e descartabilidade. Uma vez que são produzidas a partir de plástico ao contrário do silício, o processo de produção é bastante rentável, sem qualquer limitação tecnológica. [66]

#### *Nanotecnologia:*

Limitações presentes noutras tecnologias são atenuadas com a introdução de componentes em nano escala devido à sua capacidade de controlar o espectro de energia absorvido, o que proporciona flexibilidade e intermutabilidade. Atualmente, esta pesquisa tem três ramos separados: nanotubos de carbono, pontos quânticos e “*hot carriers*”<sup>13</sup>. [66]

### **Aplicações**

#### *Edifícios:*

Para a otimização da performance dos painéis fotovoltaicos instalados em edifícios, vários fatores devem ser considerados, tais como a temperatura, sombreamento, ângulo de instalação e orientação. Entre estes, a radiação incidente e a temperatura do painel são os mais importantes, já que afetam não só a eficiência elétrica, como também a performance energética do edifício.

Os painéis fotovoltaicos devem estar associados a um sistema de controlo e conversão, que por sua vez será responsável pela distribuição da energia. A eletricidade produzida através dos painéis fotovoltaicos pode ser utilizada pelos equipamentos e lâmpadas do edifício (suprir a carga do edifício), vendida diretamente à rede ou ainda armazenada.

---

<sup>13</sup> O termo refere-se a elétrons de um semicondutor que ganham uma elevada energia cinética, após terem sido acelerados pela presença de um campo elétrico forte. Com esta técnica pretende-se converter este excesso de energia em eletricidade invés de calor, aumentando assim a eficiência dos painéis fotovoltaicos.

Além disso, sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados como parte da fachada do edifício, o que diminui os custos de investimento (já que são compensados pelos materiais de construção que substituem). Nestes casos, utiliza-se geralmente a tecnologia de películas finas.[67]

*Refrigeração solar elétrica:*

A maior vantagem da utilização de painéis solares para refrigeração é a sua simples construção e uma elevada eficiência geral quando combinada com um sistema convencional de compressão de vapor. Um esquema deste tipo é representado na Figura 136.

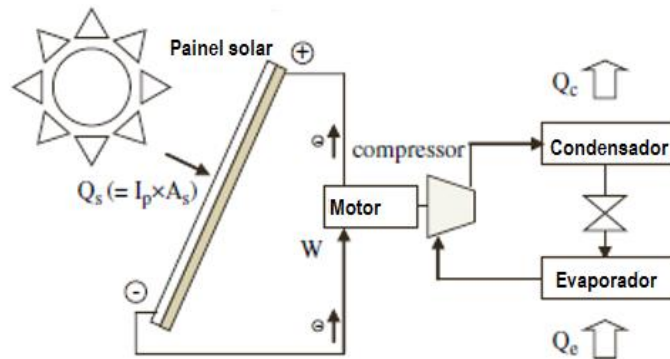


Figura 136 - Esquema da instalação [23]

Neste tipo de instalação, o COP (*Coefficient of Performance*) varia entre 1.1 e 3.3 para diferentes temperaturas do evaporador entre  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $15^{\circ}\text{C}$  e temperatura do condensador entre  $45^{\circ}\text{C}$  e  $61^{\circ}\text{C}$ . [23]

No entanto, existem vários desafios que devem ser ultrapassados para que este tipo de sistemas possa ser amplamente utilizado. Em primeiro lugar, devem ser equipados com meios de lidar com a variabilidade do recurso solar – através de baterias, ligação dual à rede e ao painel solar ou um compressor com capacidade variável. Por outro lado, o preço do painel fotovoltaico deve ser reduzido para que possa competir com outras tecnologias de arrefecimento solar. [23]

## Painéis solares híbridos

Sistemas solares híbridos combinam a integração de um módulo fotovoltaico e um sistema solar térmico num equipamento apenas. O painel fotovoltaico utiliza parte da radiação incidente para produzir eletricidade e o restante é transformado em calor, à medida que a temperatura das células e do substrato aumentam. Ao mesmo tempo, coletor solar pode transferir a maior parte da energia, que passa através da matriz, para um fluido, como água ou ar. Conclui-se então, que esta tecnologia aproveita parte deste calor que, de outra forma, seria perdido, e utiliza-o para aplicações práticas (por exemplo, aquecimento de águas domésticas). Desta forma, existe um melhor aproveitamento da energia solar.[67-69]

Os critérios de projeto devem considerar o tipo de coletor, o rácio entre energia térmica e elétrica, assim como a fração solar. Estes critérios terão influência no modo em que o sistema funcionará, na temperatura de trabalho e eficiência. [68]

Em climas tropicais, as células fotovoltaicas têm um menor rendimento já que não existe a disponibilidade de arrefecimento do sistema através da temperatura exterior. Assim, a colocação de um sistema solar térmico combinado com o sistema fotovoltaico, permite o arrefecimento das células fotovoltaicas, sendo possível mantê-las a uma temperatura ótima de funcionamento, controlando o fluxo do fluido. [69]

Existem diferentes modelos dos sistemas híbridos, que dependem do tipo de painel fotovoltaico, assim como do seu *design*, fluido utilizado para remoção de calor e concentração da radiação solar incidente. Qualquer tecnologia mencionada anteriormente, quer nos coletores térmicos, quer nos coletores fotovoltaicos, pode ser combinado para formar um sistema híbrido.[68, 69]

Em suma, é necessário uma pesquisa principalmente na redução de custos para que possam competir com os atuais coletores. [69]

## ANEXO D: Conforto Térmico

A ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*) define conforto térmico como um estado que expressa satisfação com o meio envolvente [50]. Como tal é influenciado por diferenças pessoais de disposição, cultura e outros fatores pessoais, sociais e organizacionais.

Ao longo dos últimos anos, têm vindo a ser estudadas as respostas térmicas, psicológicas e fisiológicas das pessoas em diferentes ambientes para desenvolver modelos matemáticos passíveis de prever tais respostas. Investigadores têm debatido empiricamente quais as variáveis pessoais, ambientais e fisiológicas influenciam a condição de conforto térmico.

De momento, duas abordagens diferentes na definição de conforto térmico coexistem, cada uma com as suas potencialidades e limites. Por um lado, existe o balanço de térmico que utiliza informações providenciadas por câmaras climáticas para suportar a sua teoria e por outro lado, a abordagem adaptativa que utiliza informação de estudos realizados em edifícios.

### Abordagem por balanço térmico

A teoria do balanço térmico resulta de experiências levadas a cabo por Fanger em câmaras climáticas controladas, utilizando modelos de transferência de calor em regime permanente. Nestes estudos, os participantes utilizavam roupas padrão, assim como realizavam atividades standardizadas, enquanto eram expostos a diferentes condições, sendo registado como eles se sentiam. Este registo utilizava uma escala da ASHRAE de sensação térmica que variava entre o -3 (muito frio) e o 3 (muito quente) [50, 70]. Dentro da câmara eram também avaliados seis parâmetros fundamentais:

- Nível de atividade (taxa metabólica);
- Isolamento no vestuário;
- Temperatura do ar;
- Temperatura radiante;
- Velocidade do ar;
- Humidade.

Dos seis fatores supra mencionados, verifica-se que quatro são variáveis físicas e os restantes são variáveis pessoais. Com os dados registados, Fanger combinou a teoria do balanço térmico com a fisiologia da termorregulação para determinar um intervalo de temperaturas, dentro do qual os ocupantes dos edifícios considerariam confortáveis.[70].

Fanger obteve uma equação que descrevia o conforto térmico como um desequilíbrio entre o fluxo de calor efetivo entre o indivíduo e o meio ambiente e o fluxo de calor necessário para o conforto ideal (ou seja, neutro) para uma dada atividade. Esta fazia a relação entre as condições térmicas e a escala de sensação térmica da ASHRAE, ficando conhecida como “*Predicted Mean Vote*” (PMV). Esta foi então incorporada no índice “*Predicted Percentage of Dissatisfied*” (PPD), dando origem ao modelo PMV-PPD, visível na Figura 137.[70]

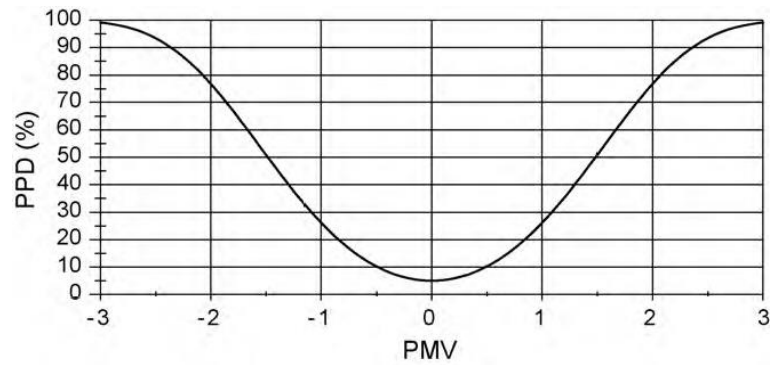


Figura 137 - Modelo PMV-PPD

As normas internacionais recorrem a este modelo para recomendar condições térmicas aceitáveis, como é visível na Figura 138 e Figura 139, tendo em conta os seis parâmetros referenciados anteriormente.[50]

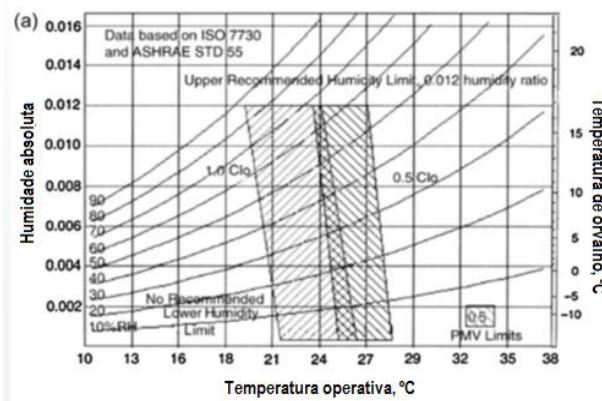


Figura 138 – ASHRAE[50]

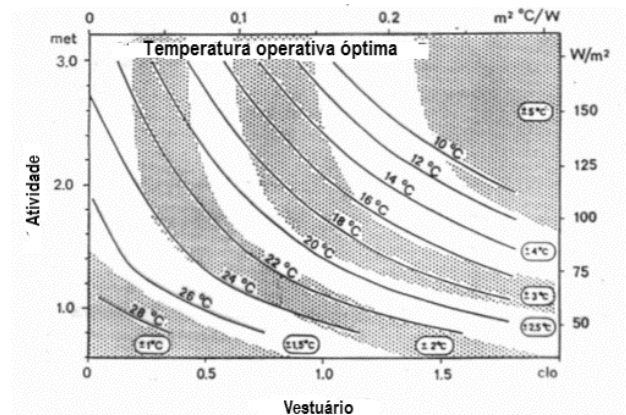


Figura 139 - ISO 7730[71]

### Abordagem adaptativa

A teoria adaptativa assume que os indivíduos são encarregados de alcançar o seu próprio conforto através de diversas ações, como por exemplo a alteração do vestuário. Esta resulta da análise de casos de estudo, em que o conforto térmico e as sensações dos ocupantes são medidos *in situ*, conseguindo assim analisar realmente a aceitação do ambiente térmico, que depende fortemente do contexto em que está inserido, do comportamento dos ocupantes e das suas expectativas.[31, 70]

De acordo com esta hipótese, existem três métodos de adaptação: comportamental (mudança no vestuário, abertura de janelas, entre outros), psicológica (expectativa) e fisiológica (aclimatização<sup>14</sup>). Fatores contextuais e a história térmica do ocupante do edifício modificam quer as suas expectativas quer as suas preferências. [31]

<sup>14</sup> Termo usado para descrever o processo de ajustamento de um organismo a mudanças no seu habitat, geralmente envolvendo a temperatura ou clima.

Nos edifícios que são naturalmente ventilados, os ocupantes possuem um maior número de graus de liberdade no que toca ao controlo térmico – adaptação comportamental - comparativamente a um edifício/sala ventilados mecanicamente, sem opção de controlo por parte dos ocupantes. Esta sensação de controlo é uma das razões que leva a uma maior intervalo nas temperaturas de conforto.[31]

Pode-se observar na Figura 140, que as adaptações comportamentais estão ligadas quer ao contexto social, económico e cultural, quer à adaptação psicológica, que deriva das expetativas referentes ao conforto térmico.[31]

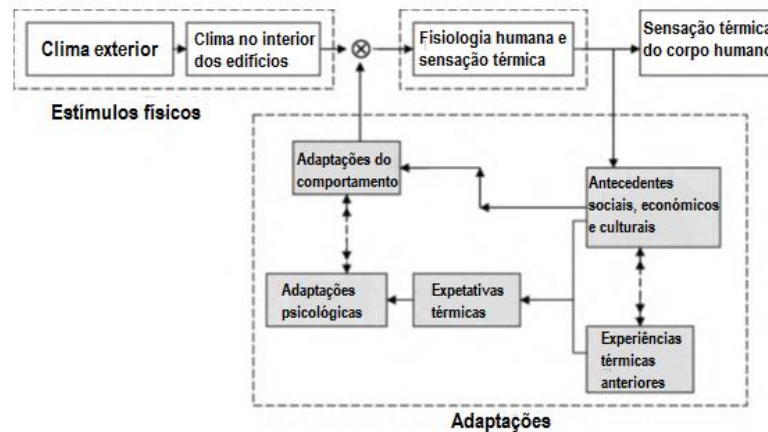


Figura 140 - Mecanismo do método adaptativo [70]

Em termos de normas internacionais, esta abordagem traduz-se numa expressão linear da temperatura de conforto em função da temperatura exterior. Ao contrário do método do balanço térmico que relaciona a temperatura de conforto com seis parâmetros. Atualmente aplica-se ou modelo da ASHRAE 55-2004 [50], representado na Figura 141, ou a norma europeia EN 15251, patente na Figura 142. [32]

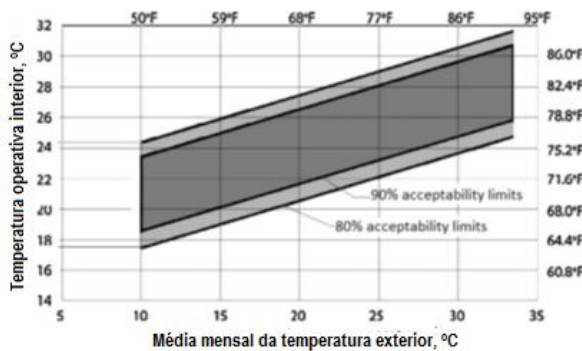


Figura 141 – Modelo adaptativo da norma 55 da ASHRAE[50]

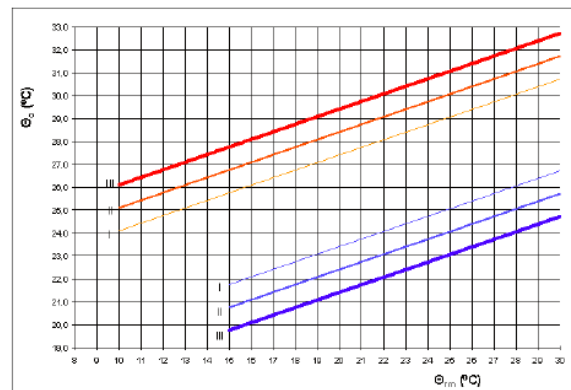


Figura 142 - EN 15251[32]

Apesar de o conceito ser similar, existem diferenças substanciais nas duas normas. Em primeiro lugar, a base de dados e estudos que deram origem a estas normas são diferentes. Em segundo, o gráfico da ASHRAE é aplicado apenas a edifícios naturalmente ventilados, a norma europeia EN 15251 aplica-se a qualquer edifício, desde que este tenha janelas que possam ser operáveis e uma política de vestuário relaxada. Por último, a temperatura nos eixos das abcissas para calcular a temperatura operativa interior é definida de forma diferente. Ao passo que na ASHRAE utiliza-se a média mensal da temperatura exterior, na norma europeia calcula-se uma temperatura média exterior diária ponderada. [31]

A gama de temperaturas da norma europeia, patente na Figura 142, pode ser calculada através das seguintes fórmulas para cada categoria [32]:

- Categoria I:

$$\theta_0 = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 \pm 2 \quad (2)$$

- Categoria II:

$$\theta_0 = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 \pm 3 \quad (3)$$

- Categoria III:

$$\theta_0 = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 \pm 4 \quad (4)$$

Em que a temperatura média diária ponderada é calculada, tendo em conta o valor da temperatura média diária ponderada e da temperatura média diária do dia anterior, tal como se pode observar na equação 5. Recomenda-se que o valor  $\alpha$  seja 0,8:

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha)\theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1} \quad (5)$$

A gama de temperaturas da norma ASHRAE pode ser calculada através da equação 6 e equação 7 para 90% e 80% de pessoas confortáveis, respetivamente[1]:

$$T_{comf} = 0,31 \cdot T_{media\ mensal} + 17,8 \pm 2,5 \quad (6)$$

$$T_{comf} = 0,31 \cdot T_{media\ mensal} + 17,8 \pm 3,5 \quad (7)$$

### Comparação das diferentes abordagens

O método PMV-PPD utiliza uma abordagem racional para o conforto térmico, desenvolvendo um índice de conforto térmico para expressar o conforto do corpo humano em função do ambiente que o rodeia, tendo por base a temperatura, humidade, velocidade do ar, vestuário e atividade. Atualmente, normas como a ISO 7730[71] e ASHRAE 55[50] têm em conta esta abordagem. Os índices são baseados em respostas medidas em condições estáveis dentro de câmaras climáticas, mas é assumido que expressarão a resposta das pessoas nas condições variáveis do dia-a-dia.[72]

No entanto, estudos de conforto térmico em edifícios reais obtiveram resultados diferentes do que seria de esperar, a nível teórico, pelo método PMV-PPD. Os resultados obtidos através dos inquéritos da escala ASHRAE apresentavam uma gama de temperaturas muito mais alargada do que a prevista pelo método. Foi sugerido por [73] que este efeito poderia ser o resultado do feedback entre o conforto dos sujeitos e o seu comportamento e que estes se adaptariam consoante as condições climáticas do estudo. [72, 73]

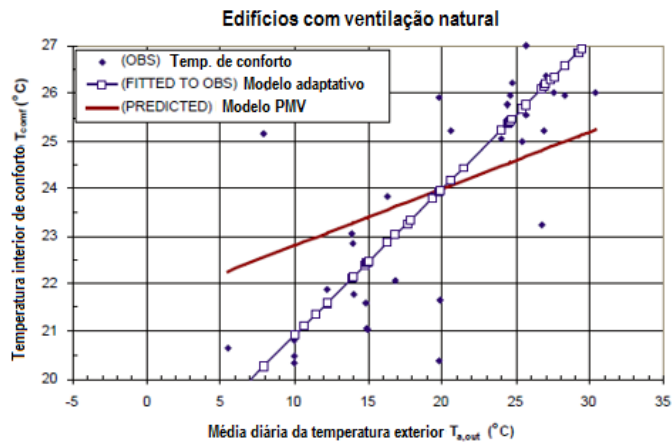


Figura 143 – Temperaturas de conforto térmico em edifícios naturalmente ventilados como previsto pelo modelo PMV-PPD e os resultados obtidos em inquéritos[74]

Na Figura 143, a compilação de resultados de diferentes inquéritos, realizado por *de Dear e Brager*[74] diferem dos resultados previstos pela norma ISO 7730, particularmente quando os edifícios não são mecanicamente ventilados. Como conclusão, a abordagem por balanço térmico prevê desconforto em temperaturas que os inquéritos indicam como confortáveis, o que leva a que a gama de temperaturas de conforto térmico seja subestimada.[74]

Por outro lado, a abordagem adaptativa assenta no princípio fundamental de que se existe uma mudança que causa desconforto, então as pessoas reagem de forma a restaurar o conforto, estabelecendo assim a ligação entre conforto e o contexto onde os inquiridos se encontram. Este princípio baseia-se nos resultados obtidos de inquéritos realizados em diferentes ambientes.

A temperatura de conforto é assim o resultado da interação das pessoas com o edifício e o ambiente que estão a ocupar. Os graus de liberdade que têm para reagir a uma situação de desconforto, refletir-se-á na sua situação de conforto: aqueles com mais possibilidades para se adaptar ao ambiente ou adaptar o ambiente às suas próprias exigências, terão menos probabilidade de se sentir desconfortáveis.[72]

Desta forma, os modelos de conforto adaptativo têm vindo a afirmar-se nos padrões de conforto, um processo que foi acompanhado por extensos debates e discussões acerca das revisões dos padrões de conforto em procura de um consenso. Possuindo normas que são baseadas em evidências práticas é, por si só, algo muito positivo, pois os ocupantes dos edifícios trabalharão num ambiente real e não num ambiente definido em laboratório. [31]

No entanto, os modelos adaptativos, nomeadamente a Figura 141 e Figura 142, revelam que são aplicáveis num intervalo estreito de temperaturas. No caso da norma 55 da ASHRAE[50], entre 10°C e 33°C (temperatura média mensal) e no caso da norma EN 15251, entre 10°C e 30°C (temperatura média diária ponderada). Este intervalo estreito tornam-se um problema em climas extremos.[72]

Por último, apesar da abordagem adaptativa pareça refletir a sensação térmica dos ocupantes em edifícios naturalmente ventilados melhor que o PMV-PPD, surgem bastantes questões relativas a esta abordagem, em particular, os seus fundamentos e a aparente negligência de vários fatores que possam afetar as condições ambiente. Esta abordagem simplificada, em que todas as suposições assumidas para criar o modelo, não estão presentes nas normas pode criar confusão. Pelo contrário, a teoria desenvolvida por Fanger pode ser facilmente modificada para ter em conta fatores adicionais [31, 72]

## A importância da humidade relativa no conforto térmico

Em climas quentes e húmidos, as elevadas humidades relativas podem constituir um problema para o conforto dos ocupantes de um edifício. Este fenómeno foi estudado por Pierce que desenvolveu o conceito de SET\* (*Standard Effective Temperature – Temperatura efetiva*).

O modelo de Pierce converte um ambiente real para um ambiente hipotético, de tal forma que as respostas dos ocupantes sejam as mesmas. O ambiente hipotético mantém-se com uma humidade relativa de 50% e a temperatura é alterada. Pode-se definir então SET\* como a temperatura de bolbo seco de um ambiente hipotético a 50% de humidade relativa para sujeitos com vestuário padrão para uma dada atividade no ambiente real.

Pode-se concluir deste modelo que o valor da humidade relativa altera também a perceção das pessoas em relação à temperatura. Pierce, através do seu modelo, desenvolveu o gráfico patente na Figura 144, que representa a variação da temperatura que as pessoas sentem com a humidade relativa.

A nível fisiológico, o corpo humano remove o calor através da transpiração, recorrendo assim ao arrefecimento evaporativo. Sob condições de elevada humidade, a taxa a que a evaporação ocorre é menor, dando assim a sensação de uma temperatura superior. Por esta razão e, de acordo com a Figura 144, à medida que a temperatura do ar aumenta, a reta referente à sensação térmica tem uma inclinação cada vez mais significativa, em que para maiores humidades relativas, a temperatura percecionada pelo individuo (SET\*) é superior[75].

Desta forma, é essencial que, em climas quentes e húmidos, seja considerado a influência da humidade no conforto térmico

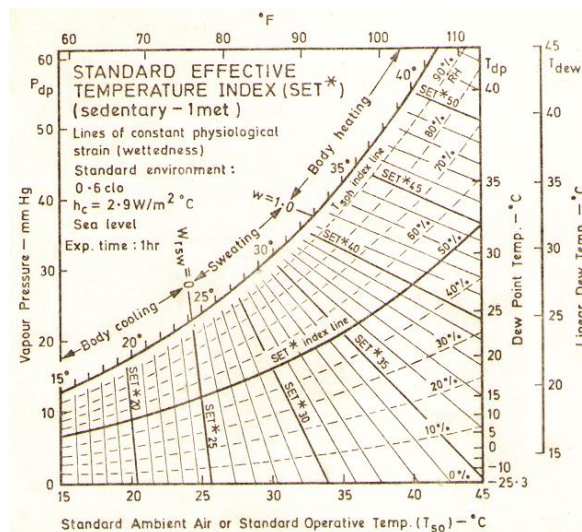


Figura 144 -Influência da humidade relativa na perceção da temperatura [75]

## ANEXO E: Módulo Sandwich de Poliuretano

Os módulos utilizados pela empresa são constituídos por um núcleo de espuma rígida de poliuretano (PUR) e revestimentos de metal em ambas as superfícies. Estes são particularmente adequados para aplicações em telhados e paredes, para várias estruturas de apoio em sala e edifícios industriais, bem como para refrigeração e unidades frigoríficas [76, 77].

A espuma de poliuretano é produzida através de uma reação química entre dois componentes bases líquidos e um agente de expansão com baixo ponto de ebulição, como o pentano ou dióxido de carbono. Os materiais base reagem diretamente ao serem misturados e formam uma matriz polimérica. O calor libertado na reação leva à evaporação do agente de expansão, obtendo-se a espuma de poliuretano. O volume obtido depende diretamente da quantidade adicionada deste agente [77].

Os painéis sanduíche são produzidos através de um processo contínuo ou descontínuo. No primeiro método estes são produzidos em conformadores contínuos. Em primeiro lugar, desenrolam-se as chapas de metal e é aplicada uma película protetora de polietileno (50µm) de baixa densidade, com película adesiva sobre a placa superior e inferior. A fim de aumentar a rigidez, os revestimentos de metal são geralmente perfilados antes da aplicação da espuma e para garantir uma boa aderência são também aquecidas. Em seguida, aplica-se o poliuretano sobre uma chapa de aço ou alumínio sendo alimentados colocada sobre a correia inferior do conformador. Durante a reação, a massa expande e adere à chapa de aço ou de alumínio colocada na correia superior. Após a passagem do conformador, os painéis são cortados com o comprimento desejado. O processo é apresentado na Figura 145. Na produção descontínua deste tipo de elementos, as chapas são colocadas num molde e a cavidade é preenchida com poliuretano.[76, 77]

As chapas de aço podem ter três acabamentos distintos. Por um lado, a chapa de aço pré-lacada é composta por aço galvanizado a quente, com espessuras que variam entre 0,50mm e 0,75mm com um verniz de poliéster. Por outro lado, existe a chapa de aço revestida, em que o aço galvanizado a quente é revestido por uma película de PVC e por uma película protetora de polietileno de baixa densidade aplicado em contínuo.

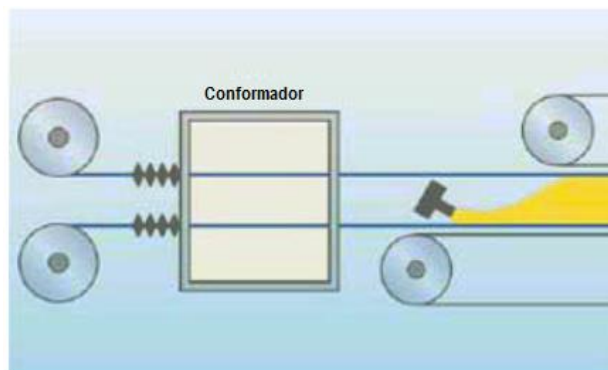


Figura 145 - Produção em contínuo dos painéis sanduíche de PUR[77]

Estes painéis apresentam excelentes características de isolamento. Têm um valor de condutividade térmica baixo e podem reduzir substancialmente as necessidades energéticas. Estas características aliadas às suas propriedades mecânicas e durabilidade levam a que sejam cada vez mais utilizados na construção.[77] Na Tabela 25 são descritas as propriedades mais importantes deste material.

Tabela 25 - Propriedades do painel sanduiche de PUR [76, 77]

Propriedade	Valor característico	Observações
<b>Condutividade térmica [W/m.K]</b>	0,026	Depende da densidade, temperatura, tempo de medida, comportamento na presença de água ou humidade e do agente de expansão utilizado.
<b>Densidade [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	30-45	Estes são os valores <i>standards</i> para o isolamento térmico em edifícios. No entanto, em algumas aplicações podem atingir os 100 Kg/m <sup>3</sup> .
<b>Resistência à compressão [kPa]</b>	100	É dependente particularmente da densidade. Em algumas aplicações, como por exemplo, em coberturas um valor mais elevado é utilizado
<b>Resistência à tração [kPa]</b>	40-900	Depende bastante da densidade.
<b>Resistência à tensão de corte [kPa]</b>	120-450	Depende bastante da densidade.
<b>Resistência à flexão [kPa]</b>	250-1300	Depende bastante da densidade.
<b>Calor específico [J/KgK]</b>	1400-1500	

Além destas propriedades, deve-se ressaltar que, devido à sua estrutura sob a forma de células fechadas, não absorvem água. Por esta razão, a humidade normal existente no interior de um edifício não leva a um aumento da condução através da envolvente. Além das características de estabilidade, os materiais de isolamento de PUR podem resistir a temperaturas até 250°C; por períodos curtos, sem efeitos adversos [77].

Por último, testes de resistência ao fogo foram realizados a painéis de PUR; obtendo-se uma classificação B no comportamento ao fogo, S2 na produção de fumos e d0 na produção de partículas/gotas em chama<sup>15</sup> [76].

Devido à sua elevada performance como isolante, este tem sido o material de escolha para atingir os objetivos de redução energética promovidos pela União Europeia. Além disso, os produtos de isolamento térmico produzidos a partir de poliuretano são extremamente estáveis

<sup>15</sup> Segundo a classificação europeia, três classes foram desenvolvidas. No comportamento ao fogo, a classe varia entre A1 e F, para a produção de fumo entre S1 e S3 e na produção de partículas em chama entre d0 e d2.

e resistentes, possuindo um tempo de vida estimado entre 35 e 70 anos. Valor este igual ou mesmo superior ao de um edifício o que, conseqüentemente, leva a questão de qual o melhor procedimento no final de vida dos módulos de PUR. Assim, será feita uma descrição das opções atuais existentes, salientando-se que os maiores resíduos gerados na EU são provenientes da construção e demolição de edifícios [78].

Os painéis sanduiche podem ser facilmente reutilizados, geralmente em aplicações menos exigentes. Caso estes não possam ser utilizados como um todo, os materiais constituintes podem ser separados. O aço pode ser reciclado, sem descurar que a reciclagem vem com um custo associado, daí que a viabilidade económica deste processo depende diretamente do preço comercial do aço. Os resíduos da espuma de poliuretano podem ser moídos e reprocessados em placas de alta densidade ou perfis que possam substituir a madeira e contraplacados, podendo ser utilizado como elemento de construção das fachadas, material base para caixilhos ou mesmo em bancadas de cozinha. Caso se pretenda isolamento térmico e acústico, a espuma é moída em grânulos e tratada com aditivos e celulose [78].

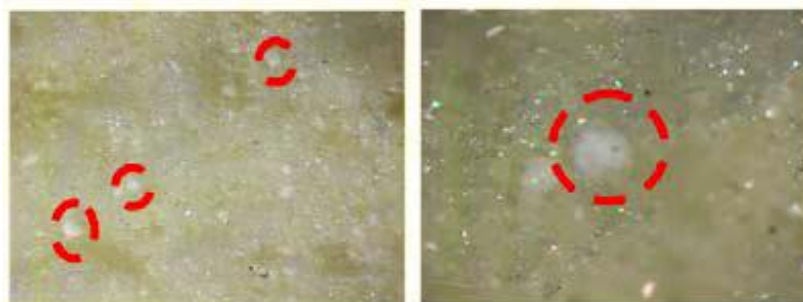
#### **Estudo de introdução de PCM's num módulo sandwich de PUR:**

Foram realizados estudos que pretendiam incorporar estes materiais em módulos semelhantes aos utilizados no presente caso, nos quais foram testados diferentes casos de fabricação na implementação de PCM's [79]

No primeiro caso, sem alterar o processo de fabricação, PCM's microencapsulados foram introduzidos num dos componentes líquidos do poliuretano. Na Figura 146 está representada amostra obtida. Com este processo, a distribuição das microcápsulas é homogénea em toda a espuma, mas o efeito do PCM é sobreposto pelo aumento da condutividade térmica, o que gerava um aquecimento mais rápido da amostra com PCM – menor inércia térmica [79].

No segundo caso, o processo de fabricação foi alterado ligeiramente, para que o PCM fosse introduzido no início do processo, antes da injeção do poliuretano. Neste caso, a distribuição das microcápsulas concentrava-se junto à superfície externa. Os resultados obtidos nas amostras foram inesperados, já que em duas delas o aquecimento era mais rápido e apenas uma terceira amostra evidenciou um aumento da inércia térmica. Tal variedade de resultados foi explicada pela má distribuição de PCM na espuma [79].

No terceiro caso, o PCM era adicionado após o poliuretano, o que levava a uma distribuição do PCM junto à superfície interna da amostra. Neste caso observou-se maior inércia térmica. O segundo e terceiro caso atingiram resultados satisfatórios no que toca à inércia térmica, mas ambos revelaram problemas quando sujeitos ao teste de adesão. Significa que o processo deve ser industrializado para se observar uma melhoria nos resultados obtidos [79].



**Figura 146 - Módulo PUR com a introdução de PCMs**



## **ANEXO F: Comparação entre software de simulação dinâmica de edifícios**

A construção e desenvolvimento de experiências em laboratório no caso dos *Zero Energy Building* é um método bastante dispendioso para explorar possíveis variações nos edifícios. Sem o conhecimento e experiência no projeto de um sistema eficiente em termos energéticos e de conforto térmico, os resultados podem ser bastantes díspares do pretendido. Por outro lado, a complexa interação entre os diversos parâmetros impede o empirismo ou modelos mais simples de cálculo. As simulações de computador são o método mais utilizado já que fornecem uma previsão rápida e precisa do projeto, evitando custos elevados [28, 80].

A obtenção de um modelo correto requer não só uma representação detalhada da estrutura do edifício e dos seus sistemas, como também de um cálculo da interação de todos estes fatores. Uma suposição considerada em praticamente todos os *softwares* de simulação é o paradigma multi-zona: o edifício é dividido em regiões (zonas), cada uma com temperatura e humidade variáveis ao longo do tempo, mas constantes espacialmente. A evolução desta variáveis ao longo do tempo é calculada a partir da solução de um sistema de equações algébricas e diferenciais, em que essencialmente a equação da conservação de energia em cada zona é utilizada para calcular a variação da temperatura e a equação da conservação da massa para determinar a humidade [28].

Existem diferenças significativas entre os vários programas de simulação tanto à implementação de dados e facilidade de utilização, assim como nos modelos térmicos que são empregues produzindo diferentes representações do sistema físico. No domínio dos ZEB recorre-se, geralmente, ao EnergyPlus e TRNSYS para realizar um estudo de viabilidade destes edifícios [28]. Em seguida serão exposto os dois *softwares*.

### **EnergyPlus**

EnergyPlus é um programa de simulação desenvolvido para a modelação de um edifício com a associação de aquecimento/arrefecimento, ventilação e sistemas de ar condicionado. Foi concebido para funcionar como um mecanismo de simulação, ou seja, para ser um elemento dentro de um sistema de programas que incluem um usuário com interface gráfica para descrever o edifício. No entanto, o EnergyPlus pode ser executado de forma autónoma sem tal interface [81].

O programa em si consiste em vários arquivos executáveis, em que são necessários *inputs* que descrevem o edifício a ser modelado e o ambiente circundante. O programa produz vários arquivos de saída que precisam de ser descritos e tratados para que os resultados da simulação façam sentido [81].

O código do programa consiste em módulos que podem ser percecionados graficamente como uma árvore invertida. Ao invés de permitir acesso a módulos de níveis inferiores que seriam chamados para se infiltrarem num nível superior, cada ramo exerce controlo quando os seus sub-ramos são chamados. Este tipo de organização assemelha-se com a gestão de uma empresa, na qual a gestão sobre os funcionários segue um cadeia de comando até atingir o diretor executivo [81].

Um dos benefícios deste conceito modular é permitir uma definição organizada dos parâmetros a considerar, assim como facilita, ao nível do desenvolvimento do programa, a adição de recursos e hiperligações para outros *softwares* [81].

A modularidade da estrutura facilita a adição de novos módulos sem interferir com outros já existentes por parte de investigadores mesmo que tenham um conhecimento restrito de parte da estrutura. Este aspeto é importante já que permite não só uma utilização universal como também o desenvolvimento de modelos o que produz uma evolução sucessiva do programa [81].

Um dos pontos fortes do EnergyPlus baseia-se na integração de todos os aspetos da simulação – cargas, sistemas e instalações. Neste caso, os *outputs* dos sistemas e instalações podem influenciar diretamente a resposta térmica do edifício invés de calcular em primeiro lugar as cargas e depois simular os sistemas e instalações. A simulação é assim acoplada entre estes parâmetros permitindo determinar, por exemplo, o impacto no conforto térmico de um sistema subdimensionado. O diagrama seguinte, Figura 147, representa o panorama básico da integração dos diferentes elementos relativos à simulação energética de um edifício [81].

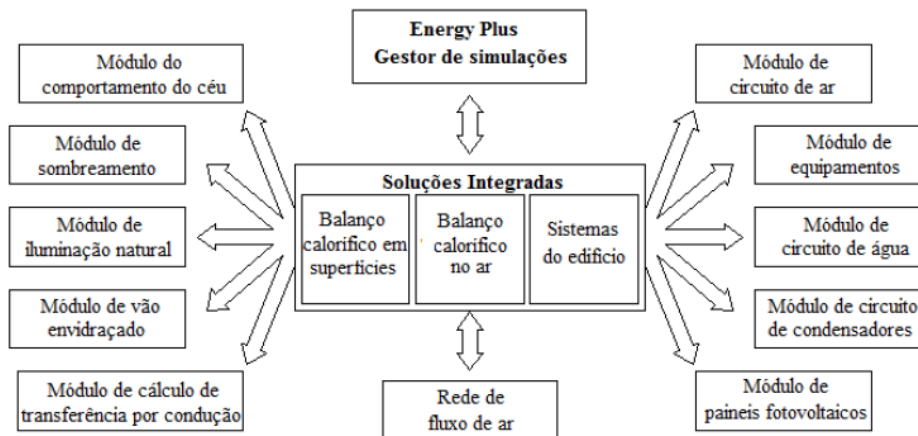


Figura 147 - Elementos internos do EnergyPlus [81, 82]

## TRNSYS 16

TRNSYS é um programa que permite a simulação de sistemas em regime transiente, incluindo edifícios multi-zona. É utilizado como uma referência mundial na validação de novos conceitos energéticos, desde um simples sistema de águas quentes sanitárias até ao desenvolvimento e simulação de edifícios e seus sistemas, incluindo estratégias de controlo, comportamento dos ocupantes e sistemas alternativos de energia [83].

O seu sucesso baseia-se na sua estrutura modular e aberta. A arquitetura baseada em DLL (“*Dynamic Link Library*”) permite que tanto utilizadores como investigadores possam adicionar novos modelos de componentes utilizando as linguagens de programação mais comuns, tais como C, C++, PASCAL ou FORTRAN. Além disso, TRNSYS pode ser ligado a outras aplicações, durante o pré ou pós-processamento ou mesmo durante a simulação através de chamadas interativas, por exemplo Microsoft Excel e Matlab [83].

Um projeto em TRNSYS é configurado através da ligação gráfica de componentes no *Simulation Studio*, sendo um exemplo representado na Figura 148. A partir desta interface o

projeto é criado através do arrasto dos componentes para a área de trabalho, conectando-os e definindo os principais parâmetros da simulação. Cada tipo de componente é descrito por um modelo matemático. Cada componente é referido como um tipo [83].

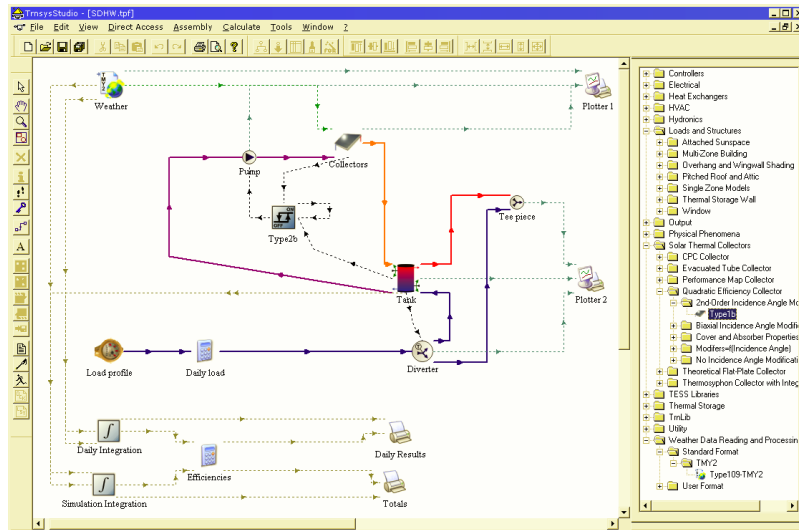


Figura 148 – Simulation Studio do TRNSYS[83]

O *Simulation Studio* inclui também um gestor de *outputs* que permite o controlo das variáveis a serem integradas, impressas ou dispostas graficamente e um gestor de erros que indica os passos da simulação [83].

Por último, existe uma ferramenta denominada TRNBuild, representada na Figura 149, utilizada para inserir os dados referentes a um edifício multi-zona. Tal ferramenta permite a especificação de todos os detalhes da estrutura, assim como todos os parâmetros necessários à simulação do conforto térmico [83].

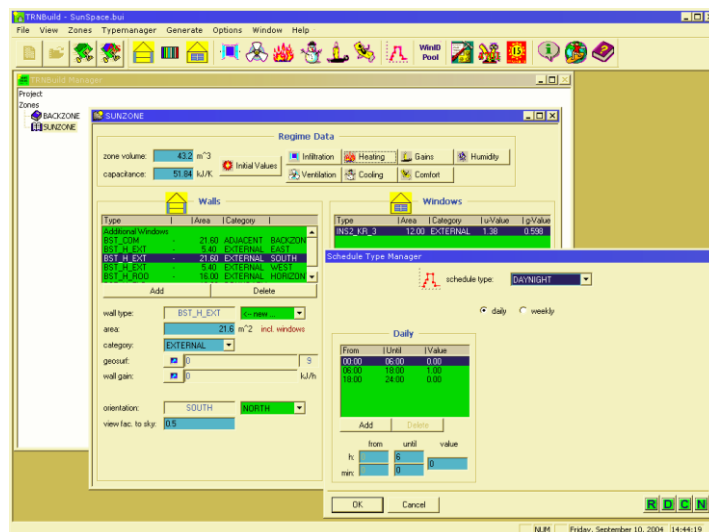


Figura 149 – TRNBuild[83]



## ANEXO G: Parâmetros da simulação

### Simulação do comportamento térmico dos edifícios

Para realizar a simulação dinâmica em TRNSYS do edifício, é necessário assumir certos valores e horários de funcionamento. Tendo em conta que o edifício em estudo é habitacional, T2, composto por 2 quartos (um casal e outro solteiro), um WC e uma divisão conjunta que perfaz a sala e a cozinha, assumir-se-á que vivem 4 pessoas nela, correspondente a um agregado familiar comum em Portugal. Optou-se pela orientação do edifício a sul, conforme representado na Figura 1, pois é a orientação preferencial para reduzir os ganhos solares.

Em relação aos envidraçados considerou-se um vidro simples com um coeficiente de transmissão térmica de  $5,68\text{W/m}^2\text{K}$  e um coeficiente de ganho solar de 0,855, pois estes são valores típicos no que toca a um envidraçado simples normal. Como apenas havia acesso ao comprimento destes (através da planta representada na Figura 1), mas não à sua altura, assumiu-se que esta era 0,9m.

Por último, assumiu-se que o edifício tinha um valor constante de infiltrações de 0,6 renovações por hora, já que é o valor mínimo que assegura a qualidade do ar interior.

#### Ganhos internos

Os ganhos internos de um edifício estão divididos em três vertentes: ocupação e atividade das pessoas, iluminação e equipamentos.

No que toca à iluminação definiu-se a densidade desta por cada divisão, isto é, a potência da iluminação pela área do espaço. Por outro lado, ganhos internos relevantes estão relacionados com a atividade dos ocupantes do edifício, à qual está associado um ganho latente e outro sensível. Assim, na Tabela 26, vem:

Tabela 26 - Ganhos internos devido à iluminação e às pessoas

Divisão	Densidade de iluminação [ $\text{W/m}^2$ ]	Atividade das pessoas [W]
Quarto	5	Sentados a descansar = 100W; Calor latente: 40W; Calor sensível: 60W.
Quarto Casal	5	Sentados a descansar = 100W; Calor latente: 40W; Calor sensível: 60W.
Sala/Cozinha	5	Sentados, trabalho ligeiro = 150W; Calor latente: 75W; Calor sensível: 75W.

No que respeita aos equipamentos, foi necessário definir quais seriam utilizados e os ganhos que se traduzem pela sua utilização. Assim, optou-se pelos equipamentos presentes na Tabela 27, já que eram transversais aos três tipos de edifício em estudo:

Tabela 27 - Ganhos internos devido aos equipamentos

<b>Tipo de Equipamento</b>	<b>Ganhos [W]</b>	<b>Divisão</b>
<b>TV</b>	40W por radiação	Sala/Cozinha
	60W por convecção	
<b>Frigorífico</b>	147W por radiação	Sala/Cozinha
	176W por convecção	
<b>Fogão</b>	293W por radiação	Sala/Cozinha
	879W por convecção	

### Horários de utilização

Aos ganhos internos estão associados horários de utilização diária. Os gráficos de utilização para a sala/cozinha, quarto e quarto de casal estão representados, respetivamente na Figura 150, Figura 151 e Figura 152. Os perfis aqui apresentados foram determinados com base numa avaliação empírica da utilização típica dos equipamentos e ocupação da habitação.

### Sala/Cozinha:

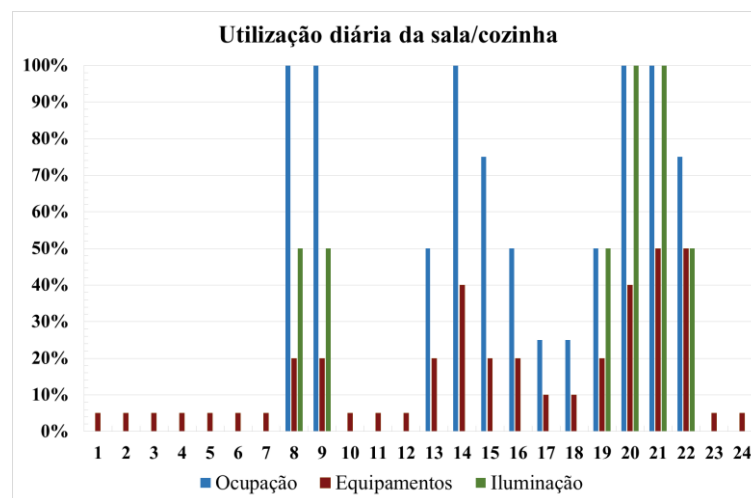


Figura 150 - Utilização diária da sala/cozinha

### Quarto:

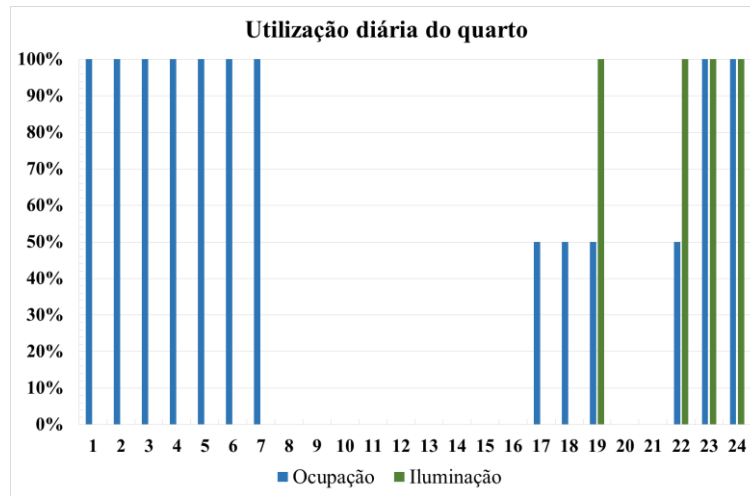


Figura 151 - Utilização diária do quarto

### Quarto de Casal:

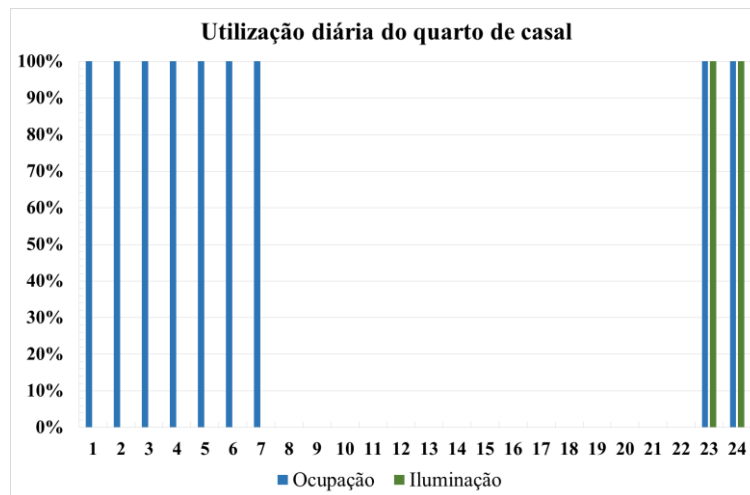


Figura 152 - Utilização diária do quarto de casal

### Simulação de um sistema de AQS

Simulou-se um sistema solar de aquecimento de água sanitárias, constituído por um coletor solar e um depósito de armazenamento. Esta simulação pretende ter apenas um carácter informativo acerca da potencialidade da energia solar em cada cidade, daí que foi considerado apenas um caso hipotético. Assim, supôs-se um sistema solar com circulação forçada, no qual a circulação da água nos coletores faz-se por ação de uma bomba comandada por um termostato diferencial.

Neste sistema a água é distribuída ao utilizador final a 60°C, uma temperatura recorrente na literatura no que toca ao aquecimento de águas domésticas. Se a água proveniente do depósito estiver a uma temperatura inferior é aquecida através de uma resistência, caso a sua temperatura seja superior, ela é misturada com água da rede até atingir a temperatura pretendida.

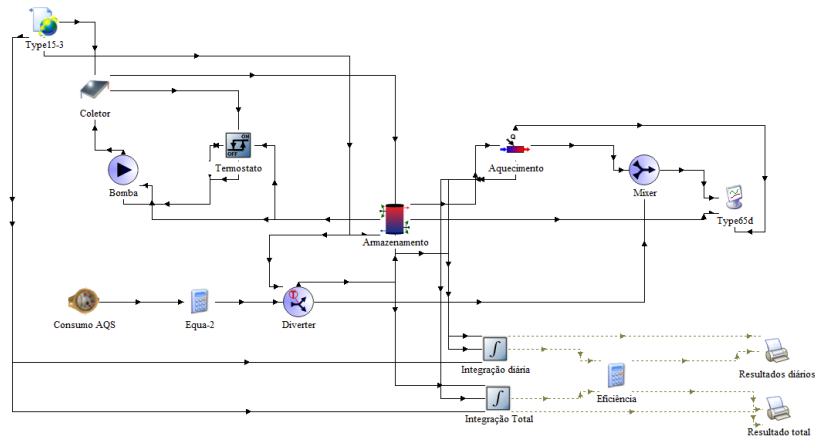


Figura 153 - Simulação de um sistema de AQS através do TRNSYS

Em relação aos coletores solares, assumiu-se que tinham uma área de  $4\text{m}^2$ , pois, como regra prática, considera-se  $1\text{m}^2/\text{pessoa}$  no dimensionamento deste tipo de sistemas. Os coletores são orientados para o Equador de forma a favorecer os ganhos solares. O seu rendimento é dado pela seguinte expressão:  $0,8 - 13 \cdot (T_{in} - T_M) / I_{\beta} - 0,05 \cdot ((T_{in} - T_M)^2) / I_{\beta}$ .

Em relação ao depósito de armazenamento, este tem um volume de  $300\text{l}$ , já que é aconselhável dimensioná-lo entre  $50$  a  $100\text{l}/\text{m}^2$ . Assumiu-se também um diâmetro de  $0,6\text{m}$ , de tal forma que a altura do depósito não fosse muito grande. Como simplificação em termos de simulação foram adotados dois valores: constantes. Por um lado, o coeficiente de perdas do depósito para o exterior de  $2,5\text{kJ}/\text{hr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$  (no sistema internacional, cerca de  $0,7\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ). Por outro lado, a temperatura da água de rede a  $15^\circ\text{C}$ , pois este valor é considerado como um valor médio anual.

Em relação ao caudal de água, é comum considerar valores na ordem dos  $15$  a  $20\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$ . Dessa forma, assumiu-se que o caudal de água nos coletores é  $0,08\text{kg}/\text{s}$ , quando a bomba é ativada. Atribuiu-se uma potência ao aquecedor auxiliar de  $3000\text{W}$ , de tal forma que fosse possível distribuir água a  $60^\circ\text{C}$ , mesmo quando a temperatura de armazenamento não atingisse esta temperatura.

Por último, assumiu-se um consumo diário de  $200\text{l}$ , pois em média diária cada pessoa gasta diariamente  $50$ - $100\text{l}$  de água quente. O perfil de utilização considerado encontra-se representado na Figura 154, baseado numa avaliação empírica, tendo em conta os horários que coincidem com as principais refeições diárias.

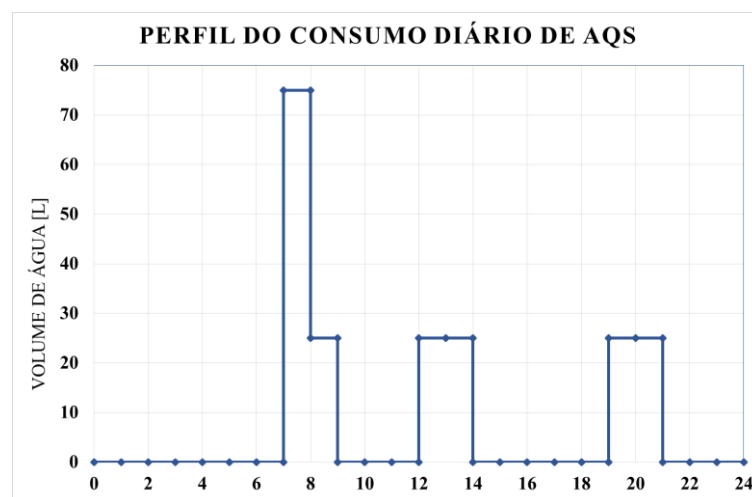


Figura 154 - Perfil do consumo diário de AQS

## ANEXO H: Cálculo da quantidade de ar insuflado no edifício modular no caso II e III

Ao longo deste projeto foi necessário realizar um estudo acerca da diferença do ar insuflado no edifício modular através da ventilação natural e mecânica. Este anexo surge no contexto de justificar as diferenças entre as necessidades energéticas obtidas nos dois casos, como se pode constatar no capítulo “5.1 Análise do comportamento do edifício modular nos diferentes climas”.

Assim, para cada cidade específica, será analisada a diferença existente entre as necessidades e a sua correlação com o ar insuflado.

### Bogotá

Em Bogotá, relativamente ao caso I (sem ventilação), verificou-se no caso II e III, respetivamente, um aumento nas necessidades de aquecimento de 1,2% e 101,9% e uma diminuição de 61,2% e 67,3% nas necessidades de arrefecimento.

Ao observar-se a Figura 155 constata-se que, durante um ano típico, os valores de insuflação de ar da ventilação natural são muito superiores aos da ventilação mecânica para os critérios estabelecidos. Observa-se também que ambos seguem o mesmo padrão, apresentando mínimos e máximos coincidentes a nível temporal.

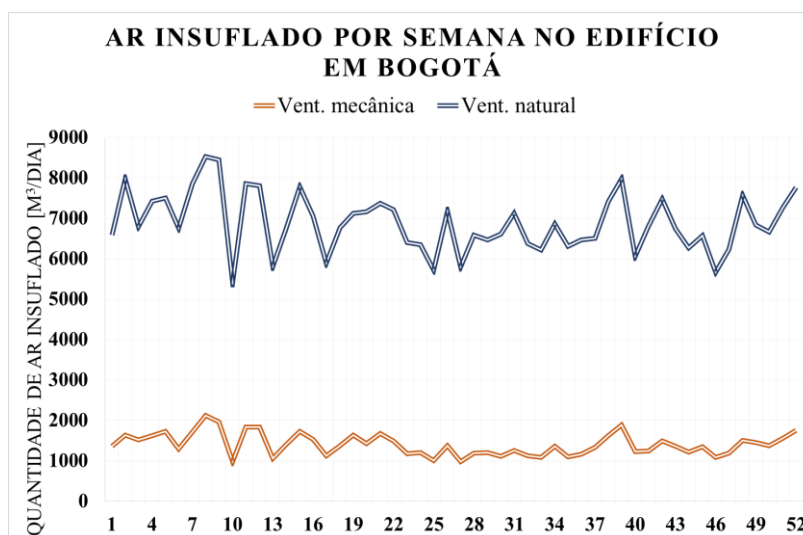


Figura 155 - Ar insuflado no edifício modular em Bogotá por semana

Relembrando que o clima em Bogotá é caracterizado por temperaturas consideradas relativamente frias, em que a temperatura média mensal é constante ao longo do ano rondando os 13°C, pode-se concluir que:

- A ventilação é um método eficaz para reduzir as necessidades de arrefecimento, já que existe a possibilidade de recorrer a *free cooling* durante o ano inteiro;
- Ao recorrer-se à ventilação natural apenas existe a possibilidade de regular as aberturas e não a quantidade de ar insuflado. Aliando este facto ao clima de Bogotá, pode-se

inferir que ao longo do ano existem situações em que a taxa de renovação é excessiva, levando a um decréscimo acentuado da temperatura interior. Consecutivamente, para manter o conforto térmico é necessário aquecimento, razão pela qual existe um aumento significativo das necessidades de aquecimento em relação ao caso I;

- c. A possibilidade de controlar a quantidade de ar insuflado através da ventilação mecânica traduz-se numa vantagem de gerir melhor o conforto térmico dos ocupantes;
- d. Neste clima, as necessidades de aquecimento suplantam as de arrefecimento, daí que a ventilação natural no geral tenha um efeito prejudicial no comportamento do edifício.

Em suma, a melhor opção para Bogotá passa pelo controlo da quantidade de ar insuflado através da ventilação mecânica

## Caracas

Relativamente a Caracas, observando a Figura 156, verifica-se que similarmente ao caso anterior, a ventilação natural introduz uma maior quantidade de ar exterior no edifício no decurso das 52 semanas anuais. Esta diferença leva a que no caso II e III, respetivamente, haja um aumento nas necessidades de aquecimento de 2,7% e 31,5% e uma diminuição de 19,8% e 32,9% quanto às necessidades de arrefecimento.

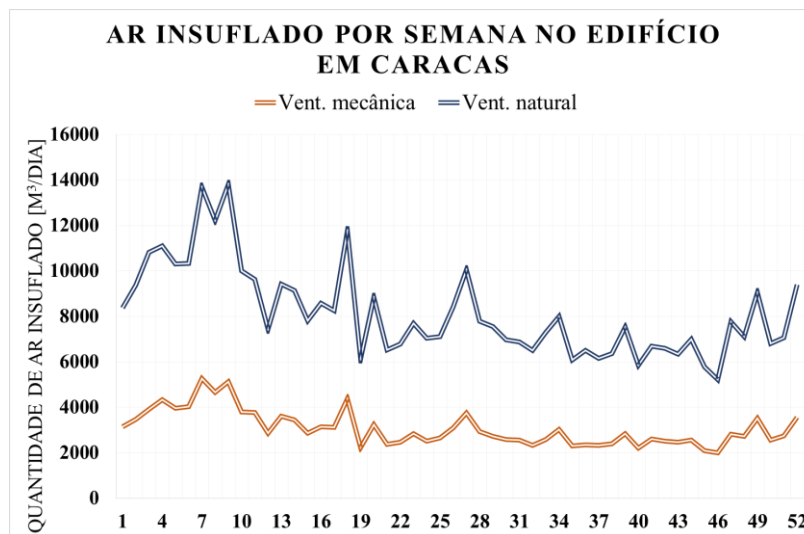


Figura 156 - Ar insuflado no edifício modular em Caracas por semana

Relembrando que nesta cidade o clima é caracterizado por temperaturas elevadas, geralmente superiores à temperatura de conforto ideal no interior do edifício. Este clima gera necessidades de aquecimento desprezáveis quando comparado com as de arrefecimento.

Por essa razão, o facto da ventilação natural ter maiores taxas de renovação de ar e permitir uma redução de cerca de um terço das necessidades de arrefecimento comparativamente ao caso I é mais vantajoso do que a ventilação mecânica, mesmo que implique um aumento na ordem dos 30% das necessidades de aquecimento. Pode-se inferir que a melhor opção em Caracas é a ventilação natural.

## Lima

Observando a Figura 157, pode-se comprovar que, tal como nas cidades anteriores, a ventilação natural introduz maior quantidade de ar no edifício ao longo de um ano. Porém, pode-se verificar também um padrão existente, pois existem claramente duas fases distintas. Uma entre as 22 e 43 semanas, correspondente aos valores mínimos de insuflação (época de aquecimento) e outra fase dividida no período entre o início do ano e as 22 semanas e entre as 43 semanas e o final do ano, na qual se encontram os valores máximos de insuflação (época de arrefecimento).

Além disso, em Lima, o caso II e III, respetivamente, provocaram um aumento nas necessidades de aquecimento de 1,9% e 169,5% e uma diminuição de 43,0% e 49,4% nas necessidades de arrefecimento.

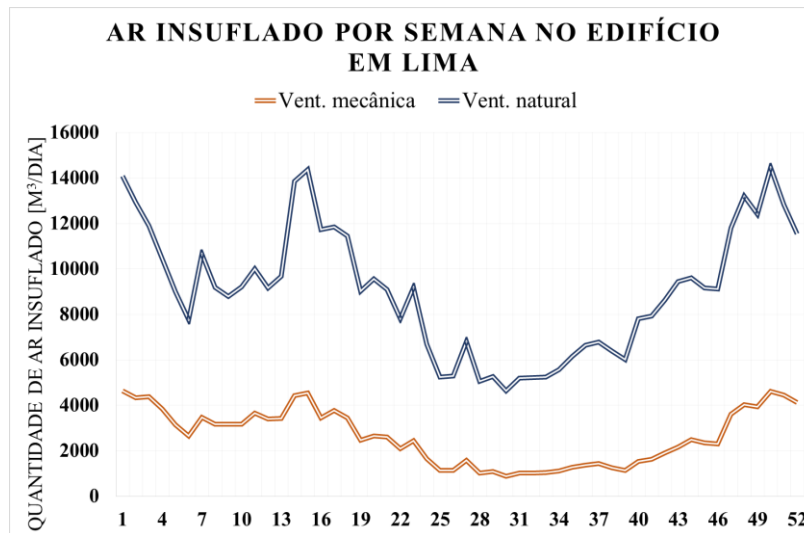


Figura 157 - Ar insuflado no edifício modular em Lima por semana

Assim, tendo em conta os casos anteriores, a solução ideal em Lima passa por um compromisso entre a natural e mecânica. Durante a época de aquecimento, utilizar-se-ia a mecânica sempre que necessário pois é possível controlar a quantidade de ar introduzido no edifício. Durante a época de arrefecimento, recorrer-se-ia à natural, pois não consome energia e permite obter maiores taxas de ventilação.

## Porto, Coimbra e Lisboa

As três cidades portuguesas têm um clima bastante semelhante, daí que as diferenças entre o ar insuflado nestas quer no caso II (ventilação mecânica) quer no caso III (ventilação natural) não sejam significativas, tal como se verifica na Figura 158, Figura 159 e Figura 160.

Tal como nos casos anteriores, a quantidade de ar insuflado por semana através da ventilação mecânica é inferior em comparação da natural. Devido à proximidade de comportamento entre o clima português e Lima, a solução a adotar deve ser a mesma nos dois casos.

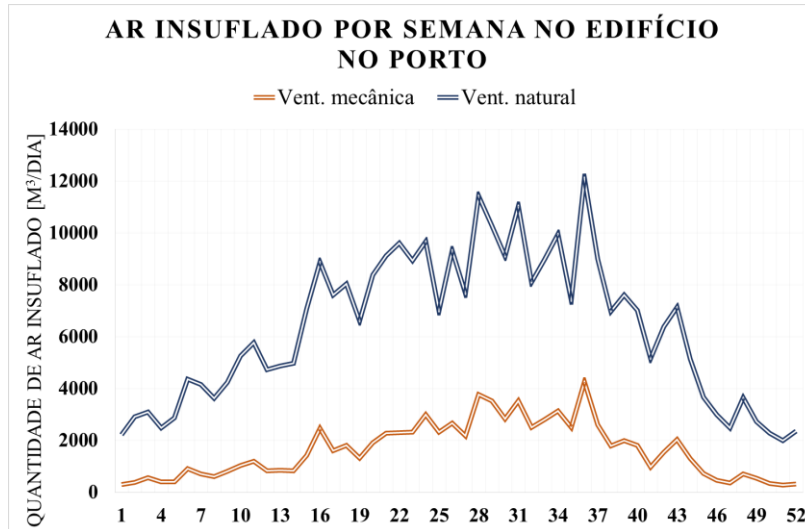


Figura 158 - Ar insuflado no edifício modular no Porto por semana

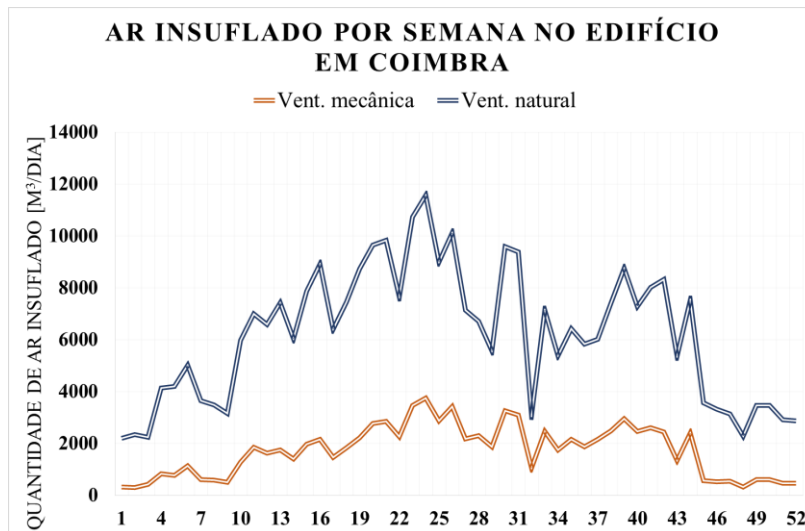


Figura 159 - Ar insuflado no edifício modular em Coimbra por semana

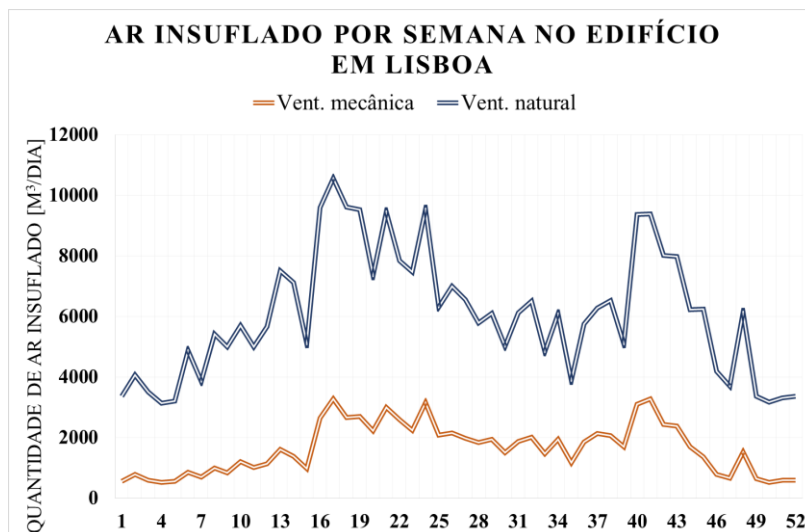


Figura 160 - Ar insuflado no edifício modular em Lisboa por semana

## ANEXO I: Ferramentas de avaliação e certificação da sustentabilidade de um edifício

### LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*)

Este sistema de classificação foi concebido pelo *U. S. Green Building Council* e é, atualmente, o instrumento de avaliação ambiental dos edifícios mais amplamente reconhecida, sendo utilizado em 41 países.[84] Esta ferramenta pode ser utilizada em diferentes projetos e conta, atualmente, com cinco sistemas distintos adaptados a casos específicos. Os projetos podem ser avaliados em qualquer fase desde o planeamento conceptual até à construção. [85]

Um dos primeiros sistemas a ser desenvolvido foi “*Design do Edifício + Construção*” aplicado a edifícios novos ou sujeitos a uma grande remodelação. Existe também a classificação “*Design Interior + Construção*” aplicado a projetos que visam apenas o interior do edifício. Para a remodelação de edifícios já existentes com pouca ou nenhuma construção envolvida, a certificação adequada denomina-se “*Operações de remodelação do edifício + Manutenção*”. Para projetos urbanísticos quer de desenvolvimento quer de reabilitação que contenham edifícios residenciais, não-residenciais ou uma mistura existe o “*Desenvolvimento da Comunidade*”. Por último, existe o sistema dedicado a residências unifamiliares ou multifamiliares até seis andares designado por “*Habitações*”. [85]

É necessário realçar que dentro destes sistemas, existem subsistemas relacionados com o tipo de projeto para que seja possível, no final, a sua comparação. Para tal, a avaliação baseia-se num sistema de pontos, fundamentado numa grande variedade de disciplinas, tais como arquitetura, *design* interior e construção. [85]

A mais recente versão da certificação para novos edifícios utiliza um sistema de pontos divididos ao longo de sete categorias: locais sustentáveis (26 pontos), eficiência na utilização de água (10 pontos), energia e atmosfera (35 pontos), materiais e recursos (14 pontos), qualidade do ar interior (15 pontos), inovação em *design* (6 pontos) e prioridade regional (4 pontos). A pontuação máxima é de 110. [84, 85]

Os pontos são atribuídos de acordo com os critérios específicos de desempenho ou funcionalidade presentes em cada categoria. No final, os pontos são somados e comparados com uma escala de classificação para obtenção de uma nota final, que pode ser: certificado (40-49 pontos), prata (50-59 pontos), ouro (60-79 pontos) ou platina (>80 pontos). [84, 85]

Nas tabelas seguintes, são apresentados os critérios em cada categoria para um projeto “*Design do Edifício + Construção*”.

Tabela 28 – Categoria LEED: Inovação e processos de design

INOVAÇÃO E PROCESSOS DE DESIGN (6 pontos)	
Critérios	Pontos
Inovação no Design, Informação sobre medidas inovadoras incorporadas no projeto e quais os seus benefícios sustentáveis.	1 a 5
Professional acreditado pela LEED responsável no projeto	1

Tabela 29 – Categoria LEED: Locais sustentáveis

<b>LOCAIS SUSTENTÁVEIS (26 pontos)</b>	
<b>Critérios</b>	<b>Pontos</b>
<b>Erosão e Controlo da Sedimentação</b>	Requisito
<b>Seleção do local</b>	1
<b>Desenvolvimento Urbano (Cálculo da evolução da densidade tanto para a área do projeto como para a sua área envolvente.)</b>	5
<b>Desenvolvimento de locais ambientalmente contaminados por atividades outrora aí existentes (<i>Brownfield site</i> é a classificação atribuída pela EPA a este tipo de locais.)</b>	1
<b>Transporte alternativo: acessos a transportes públicos</b>	6
<b>Transporte alternativo: Infraestruturas específicas para bicicletas e troca de roupa/equipamento</b>	1
<b>Transporte Alternativo: estações alternativas para abastecimento de combustíveis</b>	3
<b>Transporte Alternativo: capacidade do parque de estacionamento</b>	2
<b>Redução dos distúrbios provocados pela construção do projeto no local, sobretudo zonas verdes - proteção e Recuperação de Espaços Abertos</b>	1
<b>Redução dos distúrbios provocados pela construção do projeto no local - desenvolvimento da Pegada Ecológica do edifício</b>	1
<b>Gestão de situações de tempestade, com chuva forte: controlo de quantidade</b>	1
<b>Gestão de situações de tempestade, com chuva forte: controlo de qualidade</b>	1
<b>Paisagem e Design exterior para reduzir zonas localizadas de calor: superfícies exteriores</b>	1
<b>Paisagem e Design exterior para reduzir zonas localizadas de calor: cobertura</b>	1
<b>Redução da poluição luminosa</b>	1

Tabela 30 - Categoria LEED: Eficiência na utilização da água

<b>EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA (10 pontos)</b>	
<b>Critérios</b>	<b>Pontos</b>
<b>Eficiência na utilização de Água, Redução em 20% (elevada eficiência do equipamento de irrigação e redução do consumo de água potável para irrigação)</b>	Requisito
<b>Eficiência na utilização de água - não utilizar água potável (e.g. utilizar um sistema de captura de água da chuva) ou não efetuar irrigação</b>	2 a 4
<b>Tecnologias inovadoras de tratamento, no local, dos efluentes do edifício.</b>	2
<b>Redução na utilização de água</b>	2 a 4

Tabela 31 - Categoria LEED: Créditos de prioridade regional

<b>CRÉDITOS DE PRIORIDADE REGIONAL (4 pontos)</b>	
<b>Critérios</b>	<b>Pontos</b>
Prioridade regional	1 a 4

Tabela 32 - Categoria LEED: Energia e Atmosfera

<b>ENERGIA E ATMOSFERA (35 pontos)</b>	
<b>Critérios</b>	<b>Pontos</b>
Instruções fundamentais dos sistemas do edifício.	Requisito
Desempenho energético mínimo (de acordo com a regulamentação).	Requisito
Redução de CFC's no equipamento do sistema de ar condicionado e ventilação.	Requisito
Desempenho energético otimizado – redução das necessidades relativamente às normas ASHRAE/IESNA 90.1-1999, secção 11	1 a 19
Utilização de energias renováveis no local	1 a 7
Comissionamento reforçado	2
Degradação da Camada do Ozono	2
Medição e Verificação	3
Energia Verde (fontes de energia renováveis)	2

Tabela 33 - Categoria LEED: Materiais e Recursos

<b>MATERIAIS E RECURSOS (14 pontos)</b>	
<b>Critérios</b>	<b>Pontos</b>
Recolha e Armazenamento de Materiais Recicláveis	Requisito
Reutilização do Edifício: manutenção das linhas gerais de estrutura do edifício	1 a 3
Reutilização do Edifício: manutenção de 100% das linhas gerais de estrutura do edifício e de 50% de outros componentes, como o interior das paredes, coberturas do chão e teto.	1
Gestão dos resíduos de construção para reciclagem ou recuperação	1 a 2
Reutilização de recursos	1 a 2
Conteúdo reciclado dos materiais - os materiais de construção deverão ter o conteúdo reciclado exigido	1 a 2
Materiais Locais / Regionais	1 a 2
Materiais rapidamente renováveis	1
Madeira certificada	1

Tabela 34 - Categoria LEED: Qualidade do Ar Interior

<b>QUALIDADE DO AR INTERIOR (15 pontos)</b>	
<b>Critérios</b>	<b>Pontos</b>
<b>Desempenho mínimo da Qualidade do Ar Interior (relativamente às normas ASHRAE 62-1999)</b>	Requisito
<b>Controlo interior do fumo do tabaco (locais onde é proibido o consumo do tabaco e, nos locais específicos para fumadores, assegurar que o sistema de ventilação é independente das áreas de não fumadores)</b>	Requisito
<b>Monitorização do Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	1
<b>Eficiência da ventilação</b>	1
<b>Plano de Gestão da Qualidade do Ar Interior, durante a construção</b>	1
<b>Plano de Gestão da Qualidade do Ar Interior, após a construção</b>	1
<b>Materiais de baixa emissão de COV's: Adesivos e Selantes</b>	1
<b>Materiais de baixa emissão de COV's: Tintas</b>	1
<b>Materiais de baixa emissão de COV's: Tapetes</b>	1
<b>Materiais de baixa composição em resina de ureia-formaldeído - materiais com madeira na sua composição</b>	1
<b>Capacidade de controlar os sistemas relativos à iluminação</b>	1
<b>Capacidade de controlar os sistemas relativos ao conforto térmico</b>	1
<b>Conforto Térmico, de acordo com ASHRAE 55-1992</b>	1
<b>Conforto Térmico: sistema de monitorização permanente da temperatura e da humidade</b>	1
<b>Iluminação Natural e Vistas: Iluminação natural em 75% dos espaços</b>	1
<b>Iluminação Natural e Vistas: 90% dos espaços têm acesso a vistas</b>	1

## **BREEAM**

Este foi o primeiro método de avaliação ambiental dos edifícios, lançado pelo *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology* (BREEAM) no Reino Unido. Esta classificação está estruturada hierarquicamente em Temas, Categorias e Critérios.

No topo de hierarquia, existem 10 temas distintos: gestão (22 pontos), saúde e bem-estar (14 pontos), energia (30 pontos), transportes (9 pontos), água (9 pontos), materiais (12 pontos), resíduos (7 pontos), ecologia e uso do solo (12 pontos), poluição (13 pontos) e inovação (10 pontos). O segundo nível inclui 69 categorias e o terceiro nível abrange 114 critérios.[84]

Pontos são concedidos para os diferentes aspetos da avaliação e são somados para produzir uma pontuação total em cada categoria e, em seguida, uma pontuação global, bem como uma percentagem da pontuação máxima obtida em cada categoria. Este último é utilizado para determinar a classificação do edifício, que pode ser: positivo (> 39%), boa (> 45%), muito boa

(> 55%), excelente (> 70%) e extraordinária (> 85%). Deve-se realçar que existe um mínimo de pontos em cada categoria para que se possa obter uma classificação. [84]

### **SB Tool (*Sustainable Building Tool*)**

Esta avaliação cobre uma ampla gama de questões sustentáveis, não só ao nível ambiental, como também ao nível social e económico. O SB Tool é baseado na filosofia de que um sistema de classificação deve estar adaptado às condições locais antes de se concluir acerca dos resultados. Assim, este método permite uma calibração regional dos critérios, com recurso a apropriados pesos e referências, que reflitam a importância de cada um localmente. Pretende-se, assim, que a metodologia e critérios de avaliação possam ser empregues em regiões distintas. [86].

Com este objetivo foi desenvolvida uma estrutura genérica para classificação do desempenho sustentável de edifícios, com a expectativa de que as organizações locais possam desenvolver o seu próprio sistema de classificação SB Tool, conforme a região e tipos de construção. [86]

A estrutura é baseada em critérios adaptáveis, sendo possível modificar a extensão da avaliação que se pretende realizar. Existem quatro opções das quais o utilizador pode optar:

- Versão do programador: Contém todos os critérios que foram desenvolvidos ou estão em desenvolvimento;
- Versão máxima: Contém todos os critérios que foram totalmente desenvolvidos com *benchmarks* e podem ser utilizados nas avaliações;
- Versão média: Abrange os critérios mais importantes da avaliação, mantendo-se razoavelmente viável;
- Versão mínima: Contém os critérios mínimos para cobrir todos os aspetos fundamentais. Pode ser considerada como uma versão limitada, mas que oferece uma avaliação rápida e menos complexa.

A avaliação do edifício pode ser realizada em quatro fases distintas do seu ciclo de vida. Na fase de pré-projecto é relevante a seleção do local e as suas características. No SB Tool, esta é uma avaliação separada das restantes e assume-se que não existe informação disponível acerca do projeto subsequente. Em seguida, existe a fase de projeto, na qual é estimada a performance do edifício, utilizando documentos e informação do mesmo. Na fase de construção é realizada uma apreciação sobre o processo de construção e, por último, a fase de operação foca-se na real performance do edifício, a qual só deve ser realizada após dois anos de utilização [86].

Para o sistema cobrir estas quatro fases distintas, a avaliação foi dividida em dois módulos distintos: A e B. O primeiro considera apenas a localização e características do local e os serviços disponíveis e deve ser analisado na fase de pré-projecto. Neste define-se também os pesos e referências locais, assim como os fatores específicos do edifício, tais como o tipo de ocupação, se se trata de uma renovação ou de um edifício novo, entre outros.

O módulo B apenas deve ser realizado na fase de Projeto, Construção ou Operação e avalia o edifício em sete parâmetros classificados de A a G: Infraestrutura, Design Urbano e Desenvolvimento e Regeneração do local (A), Consumo de energia e recursos (B), Carga Ambiental (C), Qualidade do Ar Interior (D); Qualidade do Serviço (E), Aspetos culturais, sociais e percetivos (F) e Custo e aspeto económico (G) [86]. O módulo contém a informação relativa à descrição das múltiplas características do projeto e origina, como resultado, a performance energética do edifício, tendo em conta os pesos e referências definidos anteriormente no ficheiro A.

O SB Tool inclui também, no ficheiro B, uma secção denominada processo de projeto integrado (IDP). Esta secção está relacionada com orientações úteis para os projetistas apenas com um fim informativo[86].

## LiderA

O LiderA é um sistema voluntário de apoio ao desenvolvimento de soluções e avaliação da sustentabilidade da construção que atribui, em caso de desempenho comprovado, uma certificação energética [87].

O sistema assenta num conjunto de seis princípios de bom desempenho ambiental, compostos por 22 áreas como representado na Figura 161. A avaliação da sustentabilidade do edifício é realizada através de 43 critérios [87].

Na Tabela 35 estão descritos todos os critérios presentes na certificação e qual é a área a que correspondem.

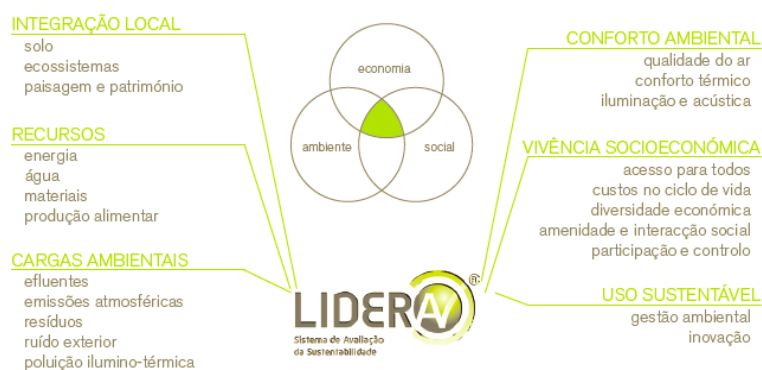


Figura 161 - Organização dos critérios da certificação LiderA [87]

Tabela 35 - Critérios da certificação LiderA [87]

Princípio	Área	Valor	Critérios
Integração local	Solo	7%	Valorização territorial Otimização ambiental da implantação
	Ecossistemas naturais	5%	Valorização ecológica Interligação de habitats
	Paisagem e património	2%	Integração paisagística Proteção e valorização do património
Recursos	Energia	17%	Eficiência nos consumos e certificação energética Desenho passivo Intensidade em carbono
	Água	8%	Consumo de água potável

			Gestão das águas potáveis
			Durabilidade
	Materiais	5%	Materiais locais
			Materiais de baixo impacte
	Produção alimentar	2%	Produção local de alimentos
<b>Cargas ambientais</b>			Tratamento de águas residuais
	Efluentes	3%	Caudal de reutilização de águas usadas
	Emissões atmosféricas	2%	Caudal de emissões atmosféricas
			Produção de resíduos
	Resíduos	3%	Gestão de resíduos perigosos
			Valorização dos resíduos
	Ruído exterior	3%	Fontes de ruído para o exterior
	Poluição ilumino-térmica	1%	Poluição ilumino-térmica
<b>Conforto ambiental</b>	Qualidade do ar	5%	Níveis de qualidade do ar
	Conforto térmico	5%	Conforto térmico
	Iluminação e acústica	5%	Níveis de iluminação Conforto sonoro
			Acesso aos transportes públicos
	Acesso para todos	5%	Mobilidade de baixo impacte Soluções inclusivas
			Flexibilidade – adaptabilidade aos usos
	Diversidade económica	4%	Dinâmica económica Trabalho local
<b>Vivência socioeconómica</b>	Amenidades e interação social	4%	Amenidades locais Interação com a comunidade
			Capacidade de controlo
			Condições de participação e governação
	Participação e controlo	4%	Controlo de riscos naturais ( <i>safety</i> ) Controlo das ameaças humanas ( <i>security</i> )
	Custos no ciclo de vida	2%	Custos no ciclo de vida

<b>Uso sustentável</b>	Gestão ambiental	6%	Condições de utilização ambiental
			Sistema de gestão ambiental
	Inovação	2%	Inovações

Em cada critério, as soluções ou desempenho (projetado ou implementado) são verificados tendo em conta o valor de referência.

- Se for igual a referência, o critério tem classificação E
- Se melhora em 25%, a classificação é C
- Se melhora em 50%, a classificação é B
- Se melhora em 75%, a classificação é A+
- Se melhora em 90%, a classificação é A++

Agrupando os valores de cada critério, obtém-se o desempenho em cada área. Ponderando o valor de cada área, obtém-se o desempenho em cada princípio e, através do mesmo sistema de ponderação, encontra-se a classe de sustentabilidade do edifício.

### SCE (Sistema de Certificação Energética)

O Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios (SCE) é um dos pilares fundamentais da nova legislação portuguesa, baseado na legislativa europeia relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD).[88]


Estão abrangidos pelo SCE os edifícios novos ou sujeitos a grande intervenção. No caso dos certificados SCE de edifícios de habitação, a classe energética é determinada através do rácio de classe energética ( $R_{NT}$ ), calculado através da razão entre o valor das necessidades nominais anuais de energia primária e o valor limite regulamentar das mesmas. [88]

A escala de classificação é composta por 8 classes, correspondendo a cada classe um intervalo de valores de  $R_{NT}$ , de acordo com a Tabela 36.[89]

Tabela 36 - Classe Energética segundo a legislação portuguesa[89]

CLASSE ENERGÉTICA	VALOR DE $R_{NT}$
A+	$R_{NT} \leq 0,25$
A	$0,26 \leq R_{NT} \leq 0,50$
B	$0,51 \leq R_{NT} \leq 0,75$
B-	$0,76 \leq R_{NT} \leq 1,00$
C	$1,01 \leq R_{NT} \leq 1,50$
D	$1,51 \leq R_{NT} \leq 2,00$
E	$2,01 \leq R_{NT} \leq 2,50$
F	$R_{NT} \geq 2,51$

Os certificados emitidos utilizam o mesmo modelo de base, quer em formato quer em conteúdo. A página inicial desse pode ser observado na Figura 162.[90]



**Certificação Energética  
e Ar Interior  
EDIFÍCIOS**

**(tipo de certificado)**  
Edifício de Habitação

**SCE1234567890**  
Válido até 2020/2020

(foto do imóvel)

IDENTIFICAÇÃO POSTAL

---

IDENTIFICAÇÃO PREDIAL/FISCAL

---




INFORMAÇÃO ADICIONAL

---

Este certificado apresenta a classificação energética deste edifício ou fração. Esta classificação é calculada comparando o desempenho energético deste edifício nas condições atuais, com o desempenho que este obteria nas condições mínimas (com base em valores de referência) a que estão obrigados os edifícios novos. Obtenha mais informação sobre a certificação energética no site da ADENE em [www.adene.pt](http://www.adene.pt).

**INDICADORES DE DESEMPENHO**

Definem a classe energética do edifício e a eficiência na utilização de energia incluindo o contributo de fontes renováveis. São apresentados comparativamente a um valor de referência e calculados em condições padrão.

	Aquecimento Ambiente	
	Arrefecimento Ambiente	
	Água Quente Sanitária	

**CLASSE ENERGÉTICA**

Mais eficiente

<b>A+</b>	0% a 25%
<b>A</b>	26% a 50%
<b>B</b>	51% a 75%
<b>B-</b>	76% a 100%
<b>C</b>	101% a 150%
<b>D</b>	151% a 200%
<b>E</b>	201% a 250%
<b>F</b>	Mais de 251%



Menos eficiente

**ENERGIA RENOVÁVEL**


Contributo de energia renovável no consumo de energia deste edifício.

**EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>**

Emissões de CO<sub>2</sub> estimadas devido ao consumo de energia.





Entidade Gestora



AGÊNCIA PARA A ENERGIA

Entidade Fiscalizadora



**Direção Geral  
de Energia e Geologia**

Figura 162 - Modelo do Certificado Energético[90]



## ANEXO J: Análise do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*)

Devido ao significativo impacto ambiental do setor da construção, são consideradas diferentes medidas para realizar uma avaliação ambiental. Uma das ferramentas mais utilizadas é o *Life Cycle Assessment*, não só pelo facto de um edifício ter um elevado período de funcionamento, como também devido à sua versatilidade, complexidade estrutural e material.[91]

Este tipo de análise proporciona um quadro completo dos impactos ambientais e das suas fontes, desde a sua construção até à sua remodelação/demolição. Com este tipo de pesquisa é possível definir as questões-chave, tais como os materiais de construção e a tecnologia de produção, gestão de resíduos, entre outros. [91].

Tabela 37 - Fontes de informação para as diferentes fases do ciclo de vida [92]

Fase do ciclo de vida	Atividade	Possíveis fontes de informação
Fase de produção	Produção do material de construção	Informação energética dos materiais através da literatura, tabelas, análise de processos. Quantidade estimada a partir dos desenhos dos edifícios, listagem de materiais.
	Transporte	Distância média para o transporte do material.
	Construção do edifício, incluindo remodelação	Utilização da energia através da visita do local.
Fase de utilização	Utilização de eletricidade e combustíveis para aquecimento, águas sanitárias e iluminação	<i>Software</i> de simulação, tal como EnergyPlus, TRNSYS. Fatura anual de eletricidade.
Fase de demolição	Demolição do edifício	Dados obtidos por medição no local.
	Transporte	Distância média para o transporte do material.
	Reciclagem	Dados obtidos por medição específica.

Os resultados obtidos nas diferentes definições de análise de ciclo de vida devem ser interpretados quer no contexto do projeto do edifício (como a adoção particular de materiais ou soluções tecnológicas) quer nas condições nacionais, regionais e locais. O mesmo edifício utilizado em diferentes países ou mesmo em regiões diferentes pode ter consequências ambientais distintas, devido à diferente estrutura de produção de energia e tecnologia de gestão de resíduos [91].

### Análise do ciclo de energia:

É uma aproximação que considera todos os *inputs* de energia num edifício durante o seu ciclo de vida, fazendo-se uma distinção em cada fase, tal como descrito na Tabela 37 e graficamente explicito na Figura 163 [92].

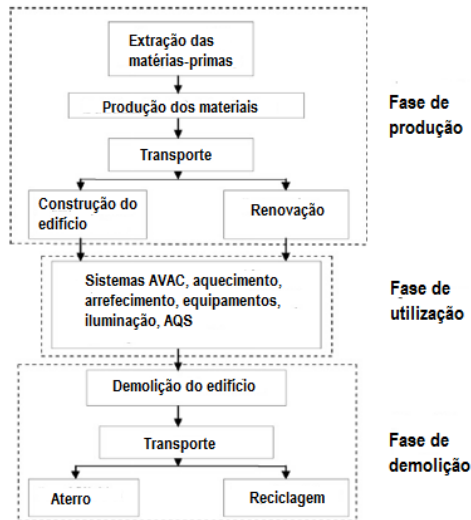


Figura 163 - Análise do ciclo de energia [92]

A energia utilizada na fase da produção (ou energia incorporada) é o conteúdo energético em todos os materiais utilizados quer no edifício quer nas instalações técnicas, assim como a energia necessária para a construção do edifício. O conteúdo energético dos materiais refere-se à energia utilizada para adquirir as matérias-primas, fabricação de componentes e transporte dos mesmos [92].

A energia operacional (pertencente à fase de utilização) corresponde à energia necessária para o dia-a-dia do edifício e a manutenção das condições de conforto. Assim, pode-se considerar toda a energia do sistema de climatização, águas quentes sanitárias, iluminação e equipamentos. Esta energia varia de acordo com o nível de conforto exigido, condições climáticas e horários de operação. Por último, no final da vida útil do edifício, é necessária energia para demolir o edifício e transportar os resíduos para aterros ou reciclagem - energia de demolição [92].

Casos de estudo concluíram que a energia operacional tem uma contribuição de 80-90% no ciclo de energia do edifício, seguida da energia incorporada com 10-20%, sendo a demolição praticamente insignificante. Assim, parece claro que reduzir a energia consumida na fase de utilização do edifício é o aspeto mais importante a considerar no projeto de um edifício. Contudo, não se deve ignorar a potencialidade de redução de energia na fase de construção.

Conclui-se que as medidas de redução da necessidade energética dos edifícios não só devem ser referentes à energia operacional, mas também à energia incorporada. A escolha de materiais com um conteúdo energético baixo (provenientes de reciclagem, localmente disponíveis ou com baixa necessidade energética na produção) é uma opção vantajosa, sob o ponto de vista energético [92]. Em suma, estudos sobre os ciclos de vida de energia são desejáveis, pois identificam quais as fases com maiores necessidades energéticas e permitem avaliar estratégias para a redução da demanda energética dos edifícios. No entanto, para uma análise mais ampla, recorre-se, geralmente, ao ciclo de vida [92].

### **Análise do ciclo de vida:**

Este processo quantifica e avalia o fluxo energético e material de um sistema. Subsequentemente, os impactos globais ou regionais são calculados, o que permite fazer uma avaliação do impacto de cada processo e fases de um edifício [92].

Na indústria da construção, os materiais utilizados são muito variados e a gama de critérios ambientais relevantes é, potencialmente, enorme. Além disso, devido ao carácter único dos edifícios, os processos de produção dos materiais de construção não são padronizados como acontece na grande parte da produção de bens, o que gera uma quantidade de informação limitada acerca dos impactos ambientais quer dos materiais quer do processo de construção e demolição. Estes fatores são uma limitação para a aplicação deste método [92].

### **Análise de custos:**

Este tipo de análise avalia o custo total de um edifício durante o seu ciclo de vida, incluindo os custos de investimento, manutenção, operacionais e o valor residual no fim de vida. Atualmente, os construtores estão apenas empenhados na diminuição dos custos iniciais, o que pode prejudicar as restantes fases do ciclo de vida. Por exemplo, a utilização de menor isolamento resulta num custo inicial menor, mas implica maior necessidade energética e, consequentemente, um aumento dos custos ao longo da fase de utilização [93].

Se os custos forem analisados numa perspetiva equilibrada do ciclo de vida, é compreensível que a aplicação de medidas sustentáveis sem o sacrifício da componente económica é uma realidade alcançável. Porém, é necessário um elevado investimento inicial para assegurar que os custos de operação e manutenção sejam reduzidos. Como o construtor não é usualmente o utilizador final, este não tem vantagem em aplicar tais medidas, pois aumentaria o seu investimento para reduzir o custo de outros [93].

A grande vantagem deste método é permitir a seleção das alternativas com o melhor rácio custo-benefício ao longo de todo o ciclo de vida do edifício. No entanto, a sua aplicabilidade é bastante limitada, já que existe uma enorme dificuldade em obter uma quantidade apropriada de dados e informação, assim como é difícil prever, durante um longo período de tempo, fatores como manutenções, operações futuras no edifício ou mesmo o seu valor residual [93].

### **Análise do ciclo de vida de um ZEB:**

No caso específico dos edifícios eficientes, a redução na energia operacional é, geralmente, acompanhada por um aumento na energia incorporada devido à necessidade energética de alguns materiais utilizados (por exemplo, maior espessura de isolamento) [94]. Este método realiza uma análise à energia operacional e incorporada nos materiais e sistemas do edifício, afirmando que estas devem igualar ou ser menores do que a energia transformada pelos sistemas de fontes renováveis do edifício durante o ciclo de vida [95].

Neste tipo de análise é necessário selecionar o indicador no qual se baseará o método. Geralmente, recorre-se à energia primária já que permite a diferenciação entre eletricidade e combustíveis fósseis e inclui a eficiência do fornecimento de eletricidade, água quente, entre outros. Todavia, os conceitos de exergia ou emergia podem ser mais adequados, pois são fundamentados em princípios teóricos termodinâmicos. A maior vantagem deste processo é permitir aos projetistas uma análise comparativa do peso das decisões no ciclo de vida do edifício, tal como a envolvente do edifício ou sistemas de fontes de energia renováveis [95].