

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Sistemas Híbridos modulares adaptados para
redes em expansão**

Miguel João Cruz

VERSÃO PROVISÓRIA

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Domingos Martins Monteiro

Junho de 2010

© Miguel João Cruz, 2010

Resumo

Em muitos países em desenvolvimento, existe a necessidade actual de encontrar soluções originais de engenharia para a expansão das redes eléctricas, cobrindo zonas muito extensas com baixos consumos. Por outro lado assistimos actualmente ao desenvolvimento de tecnologias Smartgrids capazes de potenciar a modularidade, o aproveitamento dos recursos dispersos e a autonomia relativamente à rede eléctrica. Este trabalho terá como objectivo desenvolver engenharia capaz de usar conceitos avançados de smartgrids, aplicados a problemas de electrificação e expansão sustentada de zonas isoladas em países em desenvolvimento. Pretende-se conceptualizar e projectar um sistema de produção fotovoltaico modular. Este sistema será acoplado a acondicionadores (inversores, reguladores) e transformadores de potência adequados ao consumo. Estes sistemas deverão estar adaptados com tecnologias inteligentes e autónomas de forma a estarem preparados para funcionar isolados, em cluster ou ligados à rede eléctrica.

Abstract

In many underdeveloped countries, there's the need of finding original engineering solutions in order to expand electrical grids that would have to cover really extensive areas with low electricity demand. On the other side, nowadays we watch the development of technologies that can lead to the implementation of Smartgrids which can consequently support modularity, exploitation of scattered resources and electrical grid autonomy.

This project has as its primary objective to develop engineering capable of using advanced Smartgrid concepts and apply them to electrification problems and to the sustainable expansion of isolated areas in underdeveloped countries that are currently without electricity supply.

It's intended to conceptualize and to develop the project of a modular photovoltaic production system.

The system will be coupled to invertors/regulators and to power transformers considered adequate to the demand rate. The systems should be adapted with intelligent and autonomous technologies in order for them to work isolated from the grid (islanded) or connected to the national grid.

Agradecimentos

É para mim obrigatório agradecer à minha família. Demonstraram sempre uma total disponibilidade para me apoiar e incentivar a fazer o melhor possível em cada momento.

Aos meus amigos em geral e particularmente a vocês: Gonçalo, Félix e João. Sem as parvoíces do costume não teria sido de todo comportável este semestre.

Um agradecimento muito especial a ti, Antonia por todo o tempo perdido em torno desta dissertação, por todas as opiniões, críticas e comentários e claro por todo o apoio incondicional que sempre deste.

Finalmente um muito obrigado a si professor.

Miguel Cruz

“Põe quanto tu és no mínimo que fazes”

Fernando Pessoa

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivações	2
1.2	Estrutura.....	4
1.3	O conceito SmartGrid.....	5
2	Componentes do sistema	9
2.1	Sistema de Armazenamento de Energia.....	9
2.1.1	Introdução.....	9
2.1.2	Sistemas de armazenamento de energia disponíveis no mercado.....	10
2.1.3	Baterias Electroquímicas.....	11
2.1.4	A capacidade de uma bateria	13
2.1.5	Estado de Carga, State of Charge (SOC)	14
2.1.6	Flywheels.....	16
2.1.7	Baterias Flow	17
2.1.8	Pilhas de Combustível	18
2.1.9	Armazenamento magnético através de supercondutores	19
2.1.10	Supercondensadores.....	20
2.1.11	Comparação das soluções de armazenamento apresentadas.....	21
2.2	Painéis fotovoltaicos.....	24
2.2.1	Introdução.....	24
2.2.2	Princípio de funcionamento	26
2.2.3	Composição de uma célula fotovoltaica	27
2.2.4	Irradiação Solar.....	31
2.2.5	Maximum Power Point Tracker (MPPT)	32
2.2.6	Configurações de ligação	36
2.2.7	Problemas de sombreamento.....	37
2.2.8	Inclinação e distância entre strings de painéis fotovoltaicos para evitar os sombreamentos.....	42
2.3	Inversores.....	43
2.3.1	Introdução.....	43

2.3.2	Tipos de Inversores	45
3	MicroGrids	49
3.1	Introdução	49
3.2	CERTS Microgrid	50
3.2.1	Arquitectura da Microgrid	50
3.2.2	Métodologias de controlo da Microgrid	52
3.2.2.1	Controlo de tensão versus potência reactiva	55
3.2.2.2	Controlo de frequência versus potência activa	56
3.2.2.3	Protecções da micro-rede	58
3.3	Funcionamento dos inversores	58
4	Perfis de Consumo	61
4.1	Introdução	61
4.2	Método de construção	62
4.3	Anexo do Capítulo 4	65
5	Dimensionamento do sistema	71
5.1	Introdução	71
5.2	Contentor e disposição dos componentes do sistema no seu interior	72
5.3	Dados base da simulação no Homer Energy	75
5.4	Bateria Utilizada	79
5.4.1	Hoppecke 16 OpzS 2000	82
5.4.2	Surrete Rolls 2KS33P 5000	82
5.4.3	Análise das baterias e seu comportamento	83
5.4.4	Conclusões	107
5.5	Painéis fotovoltaicos utilizados	108
6	Avaliação Final	111
6.1	Conclusões	111
6.2	Trabalho a desenvolver no futuro	112

Lista de figuras

Figura 1.1 - Mapa onde se encontra delineada a África subsariana	2
Figura 1.2 - Principais vectores de uma SmartGrid	6
Figura 2.1 - Comparação de densidades energéticas (Wh/l) de diferentes tipos de baterias. Fonte: Linden [12].....	12
Figura 2.2 - Energia teórica e energia real das baterias. Fonte: Linden [12].....	13
Figura 2.3 - Relação entre o Número de Ciclos e a Profundidade de Descarga [13]	15
Figura 2.4 - Relação entre a tensão e a Profundidade de Descarga [13]	16
Figura 2.5 - Flywheel desenvolvido pela NASA	17
Figura 2.6 - Diagrama ilustrativo do funcionamento de uma bateria flow	18
Figura 2.7 - Diagrama ilustrativo do funcionamento de uma pilha de combustível.....	18
Figura 2.8 - O maior sistema de armazenamento magnético através de supercondutores	20
Figura 2.9 - Supercondensadores.....	20
Figura 2.10 - Zona de funcionamento de cada tecnologia de armazenamento de energia[14].....	23
Figura 2.11 - Aplicações, vantagens e desvantagens de cada tecnologia de armazenamento de energia [16]	24
Figura 2.12 - a), b), c) células monocristalinas, d) célula policristalina	25
Figura 2.13 - Célula Fotovoltaica.....	26
Figura 2.14 - Circuito equivalente de uma célula solar	28
Figura 2.15 - Influência da temperatura na curva característica de uma célula solar	29
Figura 2.16 - Influência de R_s na curva característica de uma célula solar	30
Figura 2.17 - Influência de R_{SH} na curva característica de uma célula solar	30
Figura 2.18 - Exemplo ilustrativo dos coeficientes de massa de ar	32

Figura 2.19 - Loop de controlo para se obter o MPPT em regime transitório [20]	34
Figura 2.20 - Loop de controlo para se obter o MPPT em regime transitório [20]	35
Figura 2.21 - Diferença entre o método “Hill Climbing” e o método proposto [20]	35
Figura 2.22 - a) Efeito do sombreamento parcial, de uma célula num dos painéis de uma string composta por 3 painéis, no ponto de funcionamento óptimo da string [21].	38
Figura 2.23 - Efeito do número de células sombreadas parcialmente, num único painel num conjunto de painéis de uma string, no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis [21].	39
Figura 2.24 - Efeito do sombreamento parcial de uma única célula por painel, em painéis diferentes, no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis [21].	40
Figura 2.25 - Efeito do sombreamento parcial de uma única célula por painel, em painéis diferentes, no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis [21].	41
Figura 2.26 - Pormenor das distâncias e ângulos considerados no cálculo da distância entre strings de painéis de forma a se evitem problemas de sombreamento [24].	43
Figura 2.27 - Esquema eléctrico simplificado de inversores, inicialmente com comutador e hoje em dia utilizando-se transístores [26]	44
Figura 2.28 - Diferenças entre line-commutated, self commutated e cascade inverters.....	46
Figura 2.29 - Design de ligação de um inversor de backup [27]	47
Figura 3.1 - Estrutura da Micro-Rede.....	52
Figura 3.2 - Estrutura do controlador de micro-fonte	53
Figura 3.3 - Princípio de funcionamento de um pwm.....	54
Figura 3.4 - Droop: Tensão vs potência reactiva.....	55
Figura 3.5 - Droop: Frequência vs potência activa [29]	56
Figura 3.6 - Preço por W médio dos inversores presentes no mercado no último ano	59
Figura 4.1 - Consumos típicos dos diferentes equipamentos eléctricos residenciais e periodicidade diária de utilização.....	62
Figura 4.2 - Diagrama de carga diário do consumo dos diferentes equipamentos eléctricos residenciais	63
Figura 4.3 - Distribuição de probabilidades normal ou de Gauss, com média zero e desvio padrão 0,8 e respectivos consumos individuais de 15 em 15 minutos afectados das respectivas probabilidades de acontecimento	64
Figura 4.4 - Equipamentos e período de ligação.....	66
Figura 4.5 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta base, zero minutos	66
Figura 4.6 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, quinze minutos após o diagrama de carga diário base	67

Figura 4.7 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, trinta minutos após o diagrama de carga diário base	67
Figura 4.8 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, quarenta e cinco minutos após o diagrama de carga diário base	67
Figura 4.9 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, uma hora após o diagrama de carga diário base.....	68
Figura 4.10 - Diagrama de carga diário total, adição dos diagramas acima representados.....	68
Figura 4.11 - Diagrama de carga diário para consumidores de classe alta	68
Figura 4.12 - Diagrama de carga diário para consumidores domésticos de classe média	69
Figura 4.13 - Diagrama de carga diário para consumidores domésticos de classe baixa	69
Figura 5.1 - Organização dos componentes no interior do contentor	74
Figura 5.2 - Recursos solares considerados para o dimensionamento do sistema	77
Figura 5.3 - Temperaturas medias mensais verificadas para o local de implementação.....	77
Figura 5.4 - Parâmetros económicos.....	78
Figura 5.5 - Restrições impostas ao sistema	78
Figura 5.6 - Estrutura do sistema	79
Figura 5.7 - Características técnicas da bateria Hoppecke 16 OPzS 2000.....	82
Figura 5.8 - Características técnicas da bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000	82
Figura 5.9 - a) Aproximação linear da curva do número de ciclos em função da profundidade de descarga para a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000	83
Figura 5.10 - Esboço 3D inicial do perfil das baterias e explanação do espaço reservado para o fácil acesso às baterias e as medidas reais para instalação das baterias Rolls	86
Figura 5.11 - Pormenor da disposição das baterias	89
5.12 - Quadro resumo dos resultados dos testes efectuados (Análise comparativa).....	108
Figura 5.13 - Comparação do preço dos painéis	109
Figura 5.14 - Comparação da eficiência dos painéis	110
Figura 5.15 - Comparação do preço por Watt	110

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Critérios para a escolha da bateria a utilizar.....	21
Tabela 4.1 - Equipamentos existentes para cada classe social	65
Tabela 5.1 - Dimensões do contentor	73
Tabela 5.2 - Dimensões dos painéis de suporte dos painéis fotovoltaicos	75
Tabela 5.3 - Dados da componente fotovoltaica presente no contentor.....	75
Tabela 5.4 - Dimensões das baterias em análise	81
Tabela 5.5 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCA 2 habitações	84
Tabela 5.6 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCA 2 habitações	85
Tabela 5.7 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCA 3 habitações	90
Tabela 5.8 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCA 3 habitações	90
Tabela 5.9 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCM 4 habitações	92
Tabela 5.10 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCM 4 habitações	93
Tabela 5.11 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCM 5 habitações	95
Tabela 5.12 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCM 5 habitações	95
Tabela 5.13 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCM 6 habitações	97
Tabela 5.14 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCM 6 habitações	98

Tabela 5.15 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCB 21 e 22 habitações	100
Tabela 5.16 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCB 21 e 22 habitações	100
Tabela 5.17 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCB 23 e 24 habitações	103
Tabela 5.18 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCB 23 e 24 habitações	104
Tabela 5.19 - Número máximo de habitações alimentadas para cada perfil de consumo	107

Abreviaturas

DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
CERTS	<i>Consortium for Electric Reliability Technology Solutions</i>
NEPAD	<i>New Partnership for Africa's Development</i>
FEMA	<i>Forum of Energy Ministers in Africa</i>
FES	<i>Flywheel Energy Storage</i>
FBES	<i>Flow Batteries</i>
FC-HES	<i>Fuel Cells</i>
SMES	<i>Superconductor Magnetic Energy Storage</i>
DOD	<i>Depth Of Discharge</i>
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
DMFCL	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
AGM	<i>Absorbent Glass Mat technology</i>
CIGS	<i>Copper Indium Gallium Selenium</i>
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i>
AM	<i>Air Mass</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker/ing</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MGCC	<i>MicroGrid Central Controller</i>
LC	<i>Load Controller</i>
MC	<i>Micro- Source Controller</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulator</i>
DCA	<i>Domésticos de Classe Alta</i>
DCM	<i>Domésticos de Classe Média</i>
DCB	<i>Domésticos de Classe Baixa</i>

Capítulo 1

1 Introdução

Esta dissertação foi realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O objectivo primordial deste trabalho foi de facto, encontrar uma solução de engenharia para colmatar as necessidades energéticas em locais isolados, onde é sem dúvida incomportável a alimentação a partir da rede eléctrica. Pretende-se simultaneamente analisar o conceito de SmartGrids, nomeadamente o funcionamento de micro-redes e confrontar uma solução deste tipo, explicitamente fomentadora da produção dispersa, com o sistema convencional actual de produção e transporte de energia.

Face às previsões de consumo futuras, existe realmente uma necessidade de encontrar soluções de engenharia que possibilitem uma futura gestão do sistema eléctrico, mais fácil, mais económica e com maior qualidade de serviço.

Inicialmente previu-se uma aplicação directa da solução encontrada no continente Africano, na medida em que existem áreas extensas que não são providas de energia eléctrica, devido à enorme dificuldade de expansão de linhas até esses mesmos locais, simultaneamente devido à fraca qualidade de serviço do sistema eléctrico, que implora ajuda de soluções alternativas e devido ao enorme potencial da energia solar nesta área geográfica do planeta. No entanto um sistema deste tipo pode ser aplicado numa generalidade de situações onde ainda não existe o abastecimento de energia eléctrica.

A solução projectada, recorre a energia solar fotovoltaica, a sistemas de armazenamento de energia e a um sistema integrado de inversores que permite a formação de micro-redes.

Foi desde o início um pré-requisito, que toda a solução desenvolvida fosse fabricada em países com capacidade empresarial e produtiva para o efeito, estando portanto inerente o seu transporte para o continente Africano. Desde logo, constituiu um desafio, na medida em que teria de ser algo completamente modular, com enorme flexibilidade e facilidade de

instalação, compacto e leve devido aos custos de transporte associados, com níveis de manutenção bastante baixos e com uma duração de vida considerável.

É exactamente na conciliação de todos os requisitos referidos anteriormente que assenta o estudo efectuado, primeiramente a nível tecnológico (escolha de tecnologias, dimensionamento do sistema, optimização de funcionamento, cenários) e numa fase posterior a nível de design.

1.1 Motivações

Nos últimos anos tem-se assistido a inúmeros factores que motivam de facto uma intervenção a nível energético no continente Africano. São factores que embora distintos se traduzem numa problemática comum, a falta de aprovisionamento de energia eléctrica ao consumidor final. O sistema tal como é hoje em dia não permite o abastecimento de electricidade seguro, fiável e sem interrupções às indústrias, assim como aos consumidores domésticos. Não permite o acesso à energia eléctrica a um custo acessível, diversificado, respeitador do clima e sustentável.

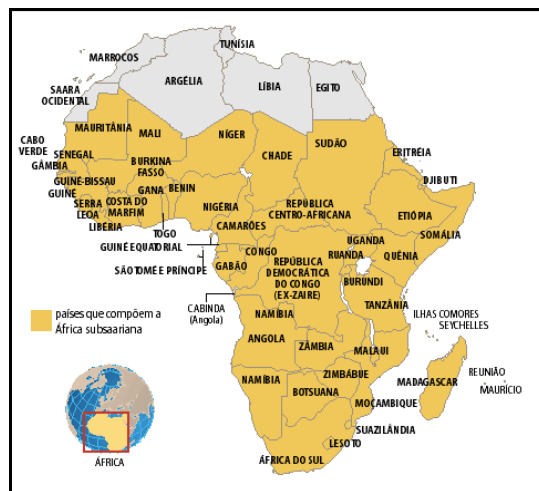


Figura 1.1 - Mapa onde se encontra delineada a África subsariana

Em Abril de 2008, o fundo monetário Internacional reportou que 30 dos 48 países pertencentes à África subsariana sofreram graves crises de abastecimento de electricidade nos últimos anos [1]. Apesar de certos governos terem adoptado tarifas mais apetecíveis, aproximadamente 75% da população da África subsariana não tinha até então acesso à electricidade. Na África Oriental, menos de 3% das populações rurais e 32% dos cidadãos estavam ligadas à rede nacional em 2004.

A África do Sul enfrentou também ela em 2008 crises graves que estrangularam por completo o crescimento económico e que paralisaram cidades. Vastas áreas urbanas sem electricidade durante 2 a 3 horas por dia, interrupções diárias na produtividade industrial, retalhistas impedidos de facturar, consumidores desesperados, hospitais paralisados, trânsito descontrolado (semáforos desligados) fizeram parte dessa nova realidade.

O forte e rápido crescimento do consumo energético (aumento de 50% entre 1994 e 2007) esteve na origem desta problemática, na medida em que potenciou o falhanço na previsão do consumo por parte da empresa de distribuição estatal e do governo. Outros factores que também contribuíram de forma preponderante foram a falta de investimento nos meios de produção (estagnação dos investimentos durante os passados 20 anos), a deficiência na manutenção das 23 centrais existentes, a escassez de técnicos qualificados e margens de reserva insuficiente: 22% em 2002 para 8% em 2008 (margem desejável seria de 15% [2]).

Sendo a África do Sul o país com maior capacidade de fornecimento de energia, este servia de base de sustento para os países vizinhos, Botsuana, Namíbia, Suazilândia e Zimbabué, contribuindo com 5% da sua produção para exportação. Com a crise energética os países vizinhos sofreram uma redução no fornecimento na ordem dos 10%, fazendo com que a escassez de electricidade se alastrasse.

Os únicos a beneficiar com a situação foram os fabricantes e distribuidores de geradores. As vendas de geradores cresceram subitamente para fazer face aos longos períodos sem electricidade.

Em pleno 2010 a África do Sul continua a defrontar-se com os mesmos problemas, dependendo em pleno da sua central nuclear, com o intuito de abastecer sem problemas todas as infra-estruturas ligadas ao Campeonato do Mundo de 2010.

A ministra da energia sul-africana veio assegurar que serão feitos todos os esforços para garantir que haja espaço apropriado para os investimentos do sector privado no regime de geração de energia do país e reforça que existe a necessidade de aprender a usar a energia de uma forma mais eficiente.

Os países europeus já se aperceberam da necessidade de intervenção nesta área em 2007. No dia 8 de Março de 2007 os chefes de estado e de governo dos 27 adoptaram um plano de acção global no domínio da energia para o período de 2007-2009, que previa um diálogo a longo prazo com a União Africana, em cooperação com a NEPAD (Nova Parceria para o desenvolvimento de África) e o FEMA (Fórum dos ministros da Energia em África). Desta forma realiza-se todos os dois anos uma reunião euro-africana de alto nível sobre energia, onde é reforçado o incentivo ao aumento dos investimentos nas infra-estruturas do continente e onde são simultaneamente promovidas as energias renováveis e a eficiência energética.

É de consenso geral que as energias renováveis estão fortemente inexploradas, face às potencialidades existentes, tanto a nível solar, eólico, hídrico e geotérmico [3]. Logo a comunidade europeia insiste na necessidade de executar uma parceria euro-africana para o desenvolvimento das infra-estruturas energéticas, dotada de um envelope financeiro de 5,6 mil milhões de euros para o período 2008-2013.

Nos estados Unidos, Michael Eckhart, presidente do American Council on Renewable Energy, já se apercebeu também que os países em desenvolvimento serão em 2020 o mercado solar com maior potencial [4]. Neste momento apenas 1% da produção mundial de painéis solares foram instalados em países em desenvolvimento. Este é da opinião que o futuro passará pela construção e financiamento de soluções off-grid em locais remotos onde é obrigatória a utilização de baterias para o armazenamento da electricidade produzida pelos painéis fotovoltaicos.

A receptividade por parte de certos governos africanos às energias renováveis é neste momento grande. Um exemplo disso mesmo é Cabo Verde que aposta neste momento em energias renováveis, nomeadamente energia eólica e solar. O governo cabo-verdiano obteve uma linha de crédito junto de Portugal, no valor de 100 milhões de euros para a instalação de duas centrais nas ilhas de Santiago e do Maio, com uma potência instalada de 7,5 Megawatts, que são até ao momento as maiores de África.

Simultaneamente, privados sediados em países Africanos, face à intermitência da energia eléctrica, fazem todos os esforços para consciencializar o investimento em alternativas renováveis. Um exemplo disso mesmo são membros da organização Lighting Africa, envolvidos na temática Solar Solutions Africa cujo objectivo é promover o desenvolvimento do sector energético Africano. Estes afirmam que para além de soluções off-grid para locais remotos onde seria economicamente inviável a construção de novas linhas são também necessárias soluções que permitam a interligação com a rede existente, na medida em que o sistema tal como é hoje em dia, não possui a fiabilidade necessária [5].

1.2 Estrutura

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo realiza-se uma introdução ao estudo efectuado, justificando-se os interesses de estudar um projecto desta natureza e descrevendo-se genericamente a ideia pretendida e as vantagens que se pode ter com o investimento neste tipo de projectos.

No segundo capítulo retratam-se os componentes que constituem o sistema, sendo efectuada uma descrição do seu funcionamento. São portanto descritas as mais importantes tecnologias de armazenamento de energia presentes no mercado e é realizada uma investigação das aplicações específicas para cada tecnologia. Simultaneamente é efectuada

uma comparação das diferentes tecnologias e é verificada qual é a melhor alternativa para aplicar neste projecto. É também descrito todo o princípio de funcionamento de um painel fotovoltaico, tecnologias existentes, metodologias de optimização da potência de saída dos painéis, problemáticas associadas ao seu funcionamento e provocadas por factores externos (sombreamento). Finalmente é descrita a estratégia de funcionamento dos inversores.

No capítulo 3 é definido todo o princípio de funcionamento de uma microgrid e todas as estratégias de controlo necessárias para a sua boa implementação.

No capítulo 4 são definidos os perfis de consumo dos consumidores que foram estudados nesta dissertação. É aqui demonstrada a metodologia de construção dos perfis de consumo.

No capítulo 5 é feito todo o dimensionamento do sistema, são explanadas todas as simulações realizadas, são comparadas alternativas e são retiradas as conclusões acerca da viabilidade das diversas alternativas.

No sexto e último capítulo são retiradas conclusões globais do projecto e são mencionados os trabalhos que podem ser futuramente realizados para se melhorar o sistema, para se garantirem índices de fiabilidade de excelência e para de facto ser possível a implementação real de projectos desta natureza no futuro.

1.3 O conceito SmartGrid

A rede eléctrica é nos dias de hoje a espinha dorsal das civilizações modernas, uma sociedade complexa com recorrentes necessidades energéticas conflituosas - mais energia eléctrica, mas menos consumo de combustíveis fósseis; aumento da fiabilidade mas no entanto redução dos custos; mais segurança no aprovisionamento de energia ao consumidor final, mas redução nos custos de manutenção; efectividade nas novas construções e reconstruções eficientes [6].

Enquanto o consumo de electricidade aumentou drasticamente, a sua transmissão está stressada e envelhecida. O ponto principal é que face às exigências modernas, está-se simplesmente a exigir da rede algo que no futuro será incomportável [7].

O termo SmartGrid está associado a electricidade com um cérebro. É um conceito que tem em mente um sistema que ouça, processe, memorize, responda e até se auto-regenere de forma a restabelecer eventuais falhas automaticamente e de forma técnico-económica optimizada.

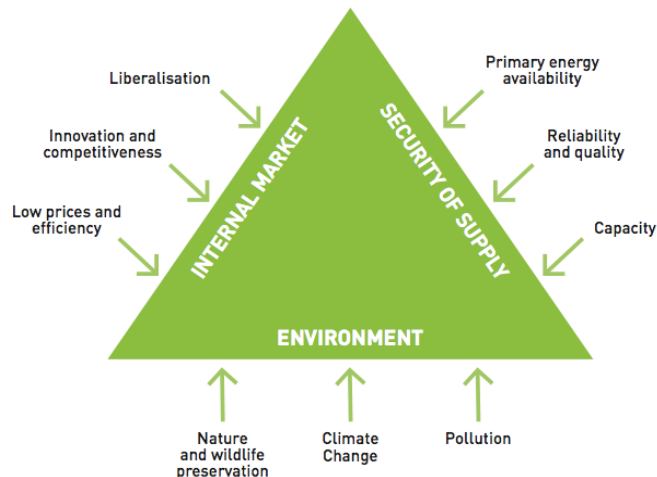


Figura 1.2 - Principais vectores de uma SmartGrid

O objectivo é adicionar inteligência a uma infra-estrutura e redes de distribuição em constante envelhecimento.

A implementação de SmartGrids tornar-se-á ainda mais vital à medida que fazemos a transição para uma economia de restrição do carbono. É de consenso geral que necessitamos de usar as formas de energia de forma mais consciente, mas em particular necessitamos de mudar a dependência nos combustíveis fósseis para as energia renováveis. A SmartGrid tornará o fornecimento de energia mais sustentável em termos ambientais permitindo a integração destas fontes de energia [8].

O conceito de produção dispersa, trás a vantagem de representar produção de energia localizada e próxima do ponto de consumo. Este factor reduz significativamente as perdas associadas ao transporte e evita no caso de soluções off-grid, investimentos em novas linhas de transporte e distribuição [9].

No entanto é também defendido por alguns, que a integração em níveis elevados de energias renováveis, energias intermitentes, na rede, leva ao aparecimento de outras problemáticas a nível de gestão de operações no sistema [10]. Daí que tenham que ser desenvolvidas soluções que não estejam directamente interligadas com a rede de distribuição já existente, mas que comecem a partir de si próprias a formar pequenas redes, designadas de micro-redes, que serão desenhadas para integração deste tipo de energia.

Não é possível eliminar por completo as interrupções de fornecimento de energia, mas a forma como o sistema responde a eventuais incidentes determina de forma directa a quantidade de consumidores que serão afectados e por quanto tempo. Uma SmartGrid permitirá um reconhecimento automático do defeito e reconfigurará os circuitos de forma a direccionar a potência para o máximo de consumidores possíveis. Esta realidade só será

7 O conceito SmartGrid

Possível com um enorme investimento em aparelhagem de medição e controlo equipada com sistemas de comunicação.

O conceito base será adicionar capacidades avançadas de monitorização, análise, controlo e comunicação à rede já existente, de forma que se maximize a potencialidade dos equipamentos, minimizem os custos, optimize a fiabilidade, minimizem as interrupções e se reduza o consumo energético.

O que poderá fomentar o desenvolvimento deste conceito de SmartGrid são de facto projectos “plug and play” que primam pela estandardização e modularização, sendo no limite, personalizados para necessidades individuais. Desta forma uma economia de escala será possível, conduzindo à diminuição dos custos de implementação e contribuindo para a expansão destes sistemas [11].

Capítulo 2

2 Componentes do sistema

2.1 Sistema de Armazenamento de Energia

2.1.1 Introdução

Nos dias correntes, a produção de electricidade é altamente centralizada e encontra-se a uma distância considerável dos consumidores finais. O nivelamento de cargas está, em condições normais de funcionamento do sistema, baseado na previsão diária e sazonal dos consumos. No entanto em caso de produção de energia eléctrica insuficiente para a satisfação total do consumo, está dependente da contribuição de centrais hidroeléctricas ou térmicas. Na verdade, estas centrais já permitem realizar armazenamento de energia, são exemplo as centrais hidroeléctricas com bombagem e a armazenagem de combustíveis fósseis no caso de centrais térmicas.

A produção dispersa de energia eléctrica e a introdução de fontes intermitentes (energia renovável) aumenta a dificuldade de estabilizar a rede, no que diz respeito ao balanço fornecimento/consumo. É então conveniente gerar, transmitir, converter e cada vez mais armazenar energia. No entanto os sistemas de armazenamento de energia representam um impacto brutal, na medida em que requerem equipamentos volumosos e de custo elevado. Contudo o desenvolvimento da electrónica de potência tem vindo a contribuir para o surgimento de novas tecnologias de armazenamento que são, em determinados contextos, viáveis técnica e economicamente.

Podem-se descrever dois motivos principais, que permitem afirmar a existência de uma vantagem económica no armazenamento energético: a transferência de energia e as poupanças na rede eléctrica convencional.

Transferência de energia já que, a energia produzida a um custo baixo nas centrais convencionais em épocas de baixo consumo, pode ser armazenada e utilizada com toda a flexibilidade que se desejar em períodos de picos de consumo, evitando desta forma a produção momentânea de energia a custos elevados ou que existam multas associadas à interruptibilidade de abastecimento.

Poupanças na rede, na medida em que os sistemas são normalmente dimensionados para uma potência de pico do consumo (Potência máxima) e não relativamente a uma média. Ou seja estamos sempre perante um cenário de sobredimensionamento do sistema produtor e consequentemente do sistema de transporte. Isto é, com a utilização de sistemas de armazenamento poderíamos evitar eventuais investimentos em reforço de linhas de transmissão e simultaneamente em equipamentos de geração de energia, já que se contribuía para o nivelamento entre a produção e o consumo e consequentemente para uma previsão mais precisa. Consequentemente assistiríamos a uma compensação local das variações referidas o que tornaria então possível a utilização de redes com designs mais leves.

No caso particular de um sistema de produção de energia eléctrica através de recursos renováveis, onde predomine um modo de funcionamento isolado, o uso de um sistema de armazenamento de energia é indispensável.

Este vai permitir fornecer energia em períodos onde não existem recursos energéticos disponíveis ou suficientes para satisfazer o consumo (durante a noite, ou em períodos de elevada nebulosidade ou incidência solar directa significativamente atenuada). Permite também garantir uma autonomia de funcionamento do sistema aquando de uma potencial falha do sistema produtor.

2.1.2 Sistemas de armazenamento de energia disponíveis no mercado

As tecnologias de armazenamento de energia são classificadas de acordo com a energia, tempo, e resposta transitória necessárias para a sua operação num determinado sistema. Em termos de requisitos energéticos a capacidade de armazenamento de energia pode ser classificada tendo em conta as suas necessidades, ou seja, para sistemas de médio ou longo prazo de abastecimento, ou relativamente à densidade de potência, para necessidades de curta ou muito curta duração.

Num sistema de produção de energia através de energias renováveis, o sistema de armazenamento de energia suplementa a actuação de um gerador diesel, de uma pilha de combustível, de geradores eólicos ou painéis fotovoltaicos garantindo abastecimento

11 Sistema de armazenamento de energia

ininterrupto à carga. Os dois elementos podem trabalhar em cooperação para garantir o fornecimento de energia nos períodos de pico.

Existem diversas técnicas para armazenar energia, algumas delas já bem implementadas no mercado, outras ainda em fase experimental de desenvolvimento ou de recente implementação.

As técnicas de armazenamento podem ser divididas em quatro categorias gerais, de acordo com as suas aplicações: aplicações de baixa potência direccionadas para sistemas em funcionamento isolado; aplicações de média potência direccionadas para sistemas em funcionamento isolado; soluções para conexão à rede onde se pretenda um nivelamento do pico de consumo; aplicações de controlo da qualidade de serviço.

Algumas técnicas de armazenamento:

- 1 - Baterias electroquímicas;
- 2 - Flywheels (Flywheel Energy Storage) (FES);
- 3 - Baterias Flow (Flow Batteries) (FBES);
- 4 - Pilhas de combustível (Fuel Cells) (FC-HES);
- 5 - Armazenamento magnético através de supercondutores (Superconductor magnetic energy storage) (SMES);
- 6 - Supercondensadores;

2.1.3 Baterias Electroquímicas

Pela definição de Linden, baterias são dispositivos que convertem energia química contida no seu material activo, directamente em energia eléctrica. Esta conversão de energia é realizada através de uma reacção electroquímica de redução-oxidação, comumente denominada de REDOX. Nesta reacção verifica-se uma transferência de electrões entre um material reagente (ânodo) e outro material reagente (cátodo) através de um material condutor que completa o circuito eléctrico.

Uma bateria, considerando um modelo simplista, é composta por dois eléctrodos de materiais distintos e um electrólito. No processo de transformação de energia química em energia eléctrica um eléctrodo aumentará o seu número de oxidação (número inteiro que representa o número de electrões que um átomo perde quando existe uma reacção química) e diz-se que oxida. Por outro lado o outro eléctrodo diminuirá o seu número de oxidação e portanto reduz-se. Nesta reacção o redutor oxida-se e o oxidante reduz-se, concluindo-se que o cátodo representa o material que se oxida e o ânodo o material que se reduz.

Para as baterias recarregáveis, verifica-se também o processo inverso, normalmente denominado de electrólise. Ou seja, recorre-se à energia eléctrica para provocar uma reacção química não espontânea que permita a reposição dos materiais inicialmente

existentes nos eléctrodos. Este tipo de baterias são conhecidas como secundárias, sendo as pilhas comuns sem possibilidade de recarga conhecidas como primárias. As principais diferenças entre os dois tipos são nomeadamente o preço e a densidade energética, as primárias possuem uma densidade energética superior e um preço mais reduzido.

As principais unidades de medida envolvidas na classificação da capacidade de uma bateria são:

- **Energia Teórica:** é o valor máximo que um dado sistema electroquímico é capaz de prover, calculado em Wh;
- **Energia Específica:** Este valor define a capacidade electroquímica que um determinado tipo de material possui, é medida em Wh/l.
- **Capacidade Nominal:** Medida em Ah, é o valor utilizado para definir a energia que a bateria é capaz de armazenar.

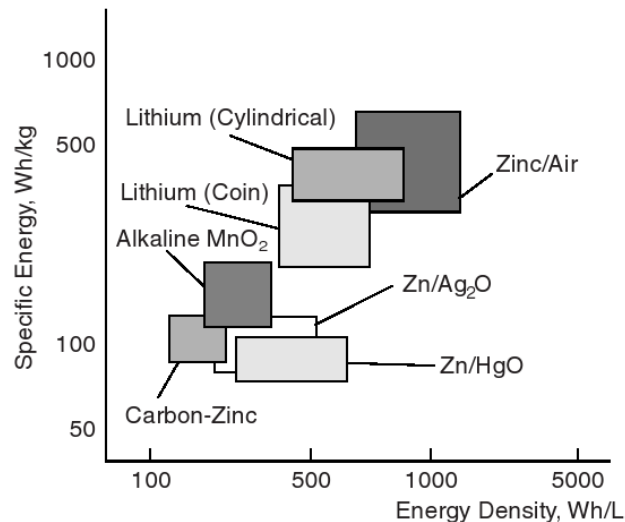


Figura 2.1 - Comparação de densidades energéticas (Wh/l) de diferentes tipos de baterias. Fonte: Linden [12]

É também de salientar que as baterias não aproveitam na totalidade a energia que possuem. Para o comprovar apresenta-se de seguida a energia específica para cada tipo mais comum de baterias.

13 Sistema de armazenamento de energia

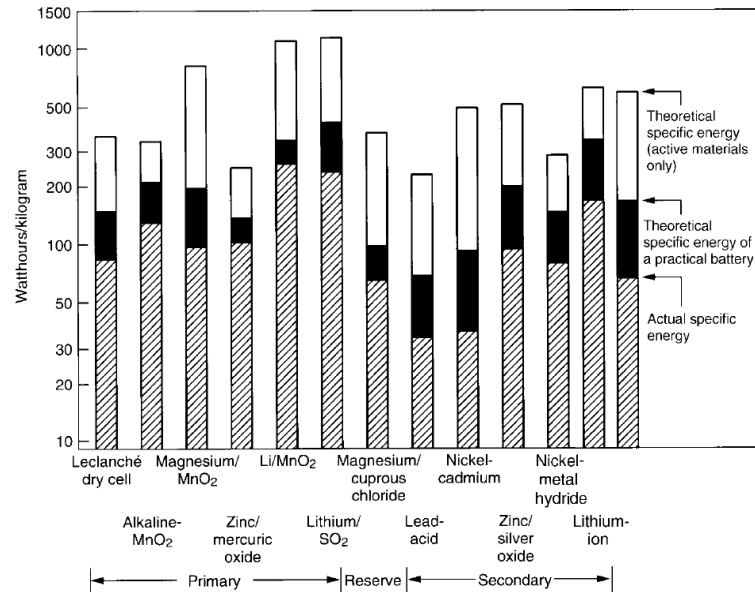


Figura 2.2 - Energia teórica e energia real das baterias. Fonte: Linden [12]

2.1.4 A capacidade de uma bateria

A capacidade de uma bateria de armazenar carga é expressa em ampere-hora (1 Ah = 3600 coulombs). Se uma bateria fornecer um ampere (1 A) de corrente por uma hora, ela tem uma capacidade de 1Ah, num regime de descarga de 1h (C1). Se puder fornecer 1 A por 100 horas, a sua capacidade é de 100 Ah num regime de descarga de 100h (C100). Quanto maior a quantidade de electrólito e maiores os eléctrodos da bateria, maior a capacidade da mesma.

Devido às reacções químicas no interior da bateria, a sua capacidade depende das condições de descarga, tais como, o valor da corrente eléctrica, a sua duração, a tensão nos terminais da bateria, a temperatura, e outras. Os fabricantes usam um método padrão para avaliar as suas baterias. A bateria é descarregada a uma taxa constante de corrente sobre um período de tempo fixo, tal como 10 horas ou 20 horas. Uma bateria de 100 amperes-hora é avaliada assim para fornecer 5 A por 20 horas à temperatura ambiente.

A capacidade de uma bateria varia com a taxa de descarga. Ao descarregar-se uma bateria em taxas baixas (correntes pequenas), a sua capacidade mantém-se elevada, mas à medida que se aumenta a taxa de descarga a capacidade começa a diminuir. Este fenómeno foi explicado pelo cientista alemão W.Peukert em 1897, que desenvolveu a designada Lei de Peukert:

$$C_p = I^k t, \quad (2.1)$$

Onde:

C_p é a capacidade de acordo com Peukert a uma taxa de descarga de 1A, expressa em Ah

I é a corrente de descarga, expressa em A

K é a constante de Peukert, adimensional

t é o tempo de descarga, expresso em horas

Para uma bateria ideal a constante de Peukert tomaria o valor 1, o que afirmaria que a capacidade seria independente do valor da corrente. Para uma bateria de chumbo-ácido sulfúrico o valor típico de k está compreendido entre 1,1 e 1,3. No entanto mesmo este valor de k não é fixo, variando com a idade da bateria, ou seja, este aumenta com o envelhecimento da bateria.

2.1.5 Estado de Carga, State of Charge (SOC)

O estado de carga de uma bateria é expresso em percentagem, quando a bateria se encontra totalmente carregada, então o seu estado de carga é de 100%, quando se encontra totalmente descarregada o seu estado de carga é de 0%. A expressão que permite o cálculo do estado de carga é a seguinte:

$$SOC = \frac{Capacidade_Ah_res\ tan te_bateria}{Capacidade_Ah_Total} , \quad (2.2)$$

Onde:

SOC é o State of Charge, Estado de carga da bateria

Também é possível determinar o estado de carga através de medição de alguns parâmetros em ambiente laboratorial e da tensão aos terminais da bateria, através da seguinte expressão:

$$SOC = \frac{Voc(t) - b}{a} , \quad (2.3)$$

Onde:

SOC é o State of Charge, Estado de carga da bateria

$V_{oc}(t)$ é a tensão em circuito aberto da bateria

a,b são parâmetros mensuráveis em laboratório

O estado de carga (SOC) está directamente relacionado com uma grandeza que é de elevada importância para o estado e duração de vida das baterias em geral. Esta grandeza denomina-se profundidade de descarga ou depth of discharge (DOD). Está comprovado que o tempo de vida útil das baterias diminui com o aumento do DOD. Mais uma vez o DOD é uma grandeza expressa em percentagem, quando a bateria se encontra plenamente descarregada, atingiu-se um DOD de 100% e quando a bateria se encontra à plena carga então o DOD é de 0%.

Como se pode verificar o DOD é o inverso do SOC e pode ser descrito pela seguinte equação:

$$DOD = 1 - SOC$$

Onde:

DOD é a profundidade de descarga das baterias

SOC é o estado de carga das baterias

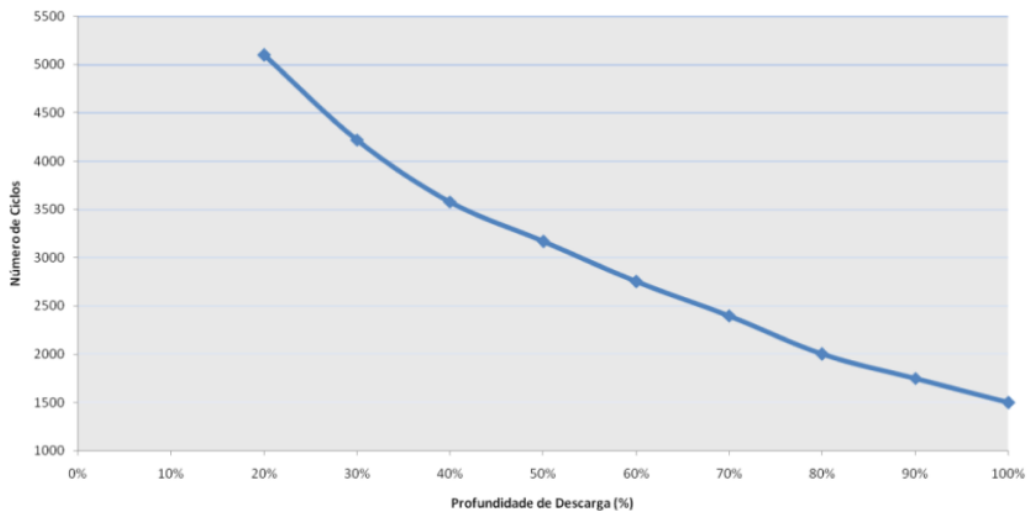


Figura 2.3 - Relação entre o Número de Ciclos e a Profundidade de Descarga [13]

O normalmente recomendado é não ultrapassar uma profundidade de descarga de 80%. Daí que os sistemas de produção fotovoltaica com armazenamento de energia requeiram a utilização de reguladores de carga que não permitam que se ultrapassem os 80% definidos como limite para a profundidade de descarga.

A tensão aos terminais da bateria é também ela influenciada pela profundidade de descarga. Esta decresce linearmente com o aumento da profundidade de descarga da seguinte forma:

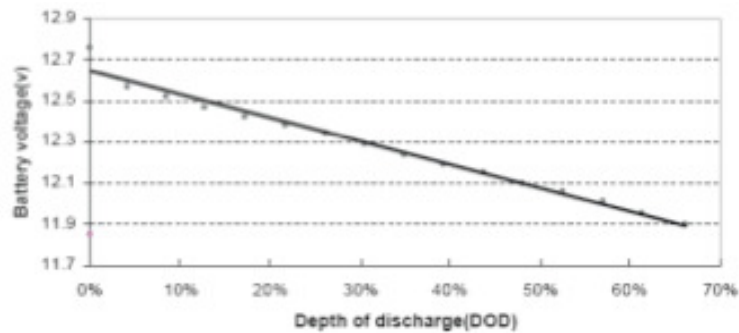


Figura 2.4 - Relação entre a tensão e a Profundidade de Descarga [13]

2.1.6 Flywheels

Os acumuladores de energia flywheel possuem um corpo de massa elevada, conferindo-lhe uma inércia igualmente elevada, que se encontra acoplado a um motor/alternador através de uns suportes magnéticos especiais que reduzem significativamente o atrito aquando da rotação do corpo.

Este equipamento permite armazenar a energia eléctrica produzida em energia mecânica de rotação, ou seja em energia cinética. Quando é necessária a utilização da energia armazenada, basta colocar o motor a funcionar como alternador e está-se instantaneamente a debitar energia para o sistema eléctrico. Para aumentar a eficiência do sistema coloca-se a câmara onde se encontra o corpo a uma pressão baixa (regime de vácuo). Assim consegue-se diminuir o efeito de auto-descarga e consequentemente as perdas do equipamento. O número de ciclos (carga + descarga) é considerado elevado, na ordem dos 10000-100000 ciclos, dependendo do design do equipamento.

As perdas devidas ao atrito provocam uma redução significativa ao longo do tempo da eficiência do sistema, sendo portanto considerado como não recomendável a utilização de flywheels para aplicações que necessitem de armazenamento de longa duração [14].

Estes atingem velocidades de rotação da ordem dos 50000 rpm.



Figura 2.5 - Flywheel desenvolvido pela NASA

2.1.7 Baterias Flow

As baterias flow distinguem-se das baterias convencionais, na medida em que não possuem eléctrodos sólidos. Os eléctrodos são na verdade também eles parte constituinte do electrólito, ou seja, existem neste tipo de baterias dois electrólitos que são misturados numa célula electroquímica, onde se realizam todas as reacções químicas que proporcionam a produção de electricidade.

No entanto estas baterias necessitam de quantidades extra de electrólito para que o fenómeno electroquímico continue sem redução de eficiência. Normalmente essas quantidades extra são armazenadas externamente através de um tanque e são constantemente bombeadas para a célula electroquímica, daí o nome de “flow batteries”. É portanto um tipo especial de bateria recarregável na qual a dissolução de compostos activos no electrólito permite um armazenamento externo dos reagentes e consequentemente um aumento de potência e de densidade de energia.

Desta forma consegue-se ultrapassar a desvantagem que as baterias convencionais possuem aquando das reacções electroquímicas e do subsequente depósito de compostos sólidos nos eléctrodos, que limitam a sua capacidade.

Neste tipo de baterias o brómio é o elemento central, já que em todas as soluções encontradas possuem o brómio como composto activo (ZnBr, NaBr, VBr).

A sua eficiência global é da ordem dos 75%.

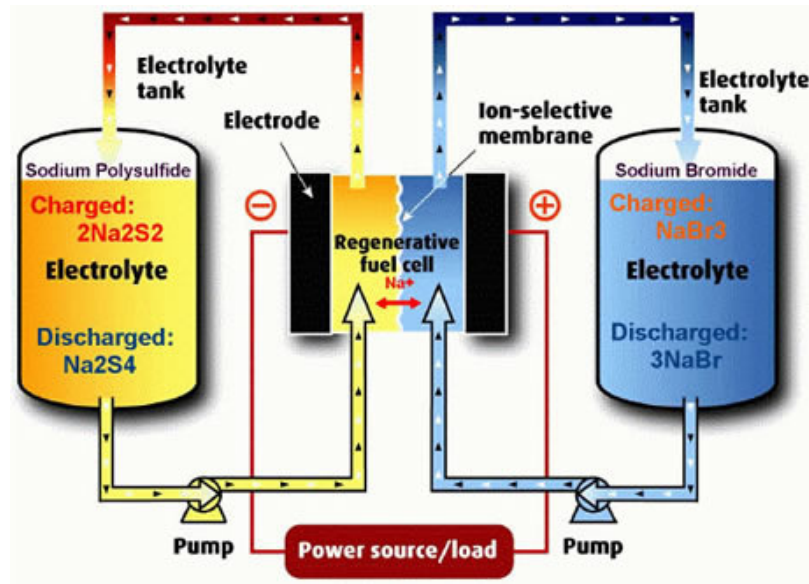


Figura 2.6 - Diagrama ilustrativo do funcionamento de uma bateria flow

2.1.8 Pilhas de Combustível

As pilhas de combustível são também elas equipamentos que permitem a produção e armazenamento de energia eléctrica através de processos químicos. Representam uma forma de produzir hidrogénio através da electrólise da água.

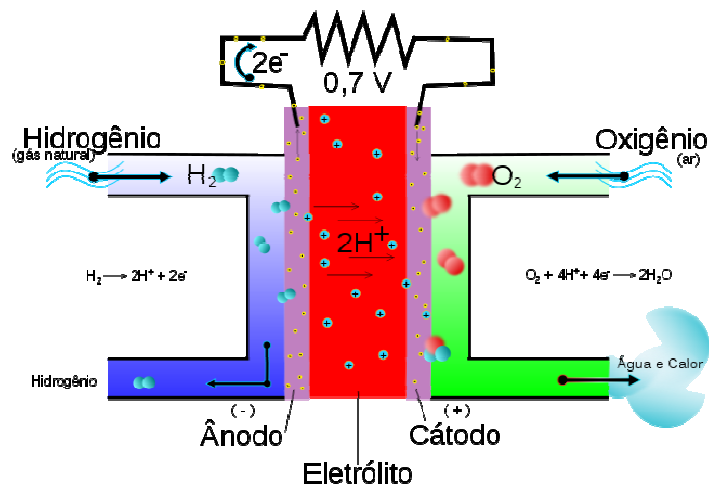


Figura 2.7 - Diagrama ilustrativo do funcionamento de uma pilha de combustível

A membrana electrolítica polimérica (PEM), parte constituinte da pilha de combustível de membrana polimérica (PEMFC) é condutora de protões e separa o ânodo do cátodo. Em cada extremidade da membrana existe um eléctrodo de lâmina de carbono revestido com um catalisador de platina.

No ânodo o hidrogénio flui para o catalisador onde é dissociado em protões e electrões. Os protões são conduzidos através da membrana para o cátodo e os electrões são forçados a percorrer um circuito externo. No cátodo as moléculas de oxigénio reagem com os electrões (provenientes do circuito externo) formando-se água. Neste processo as perdas traduzem-se apenas em vapor de água e calor, o que não representa qualquer ameaça em termos ambientais.

Existem portanto três pormenores associados ao funcionamento das pilhas de combustível: consumo de energia eléctrica em épocas de baixo consumo para a produção de hidrogénio, a reacção entre o hidrogénio e o oxigénio do ar para a produção de energia eléctrica e a existência de um processo de armazenamento do hidrogénio (compressão ou liquefacção) através de um depósito pressurizado (volume entre 10 -2 m3 e 10000 m3) para garantir que existam recursos adequados na altura de necessidade.

Está aqui a principal diferença relativamente às baterias convencionais, na medida em que o composto activo nunca se esgota, existindo um fluxo constante de reagente, à semelhança daquilo que se verifica para as baterias flow.

Existem diversos tipos de pilhas de combustível: Alcalinas (AFC), PEMFC, Metanol (DMFC), Ácido fosfórico (PAFC).

É no entanto um tipo de tecnologia sem eficiência, rondando os 50 %.

2.1.9 Armazenamento magnético através de supercondutores

Esta tecnologia armazena corrente eléctrica DC numa bobina composta por cabos supercondutores, com resistência praticamente nula. Tem a enorme vantagem de possuir uma eficiência global de 95%, de conseguir ter uma profundidade de descarga praticamente de 100% e de terem uma rapidez de resposta elevada, sendo portanto ideais para sistemas de controlo da qualidade de serviço. Por outro lado tem a enorme desvantagem de necessitar de um sistema de refrigeração auxiliar para manter a temperatura na ordem dos 270 graus Célsius negativos, o que representa uma parcela considerável do investimento inicial.

São normalmente instalados enterrados, para colmatar um esforço superior do sistema de refrigeração e consequentemente para reduzir os custos de instalação e funcionamento que são logo à partida elevados.



Figura 2.8 - O maior sistema de armazenamento magnético através de supercondutores

2.1.10 Supercondensadores

Os super-condensadores têm tanto características de condensadores convencionais como de baterias electroquímicas. A diferença reside no facto de não existir qualquer reacção química, o que representa uma vantagem no que diz respeito ao número de ciclos que podem ser realizados. O armazenamento é feito na forma de campo eléctrico, ou seja, existem dois eléctrodos como nos condensadores convencionais, no entanto o dieléctrico é composto por uma solução iónica (electrólito) que permite o armazenamento eléctrico da energia.

Têm a vantagem de serem bastante duráveis, na ordem dos 10 anos, bastante eficientes (95 % de eficiência). No entanto tem a desvantagem de ser ainda uma tecnologia cara e com um fenómeno de auto-descarga deveras elevado, na ordem dos 5% por dia.



Figura 2.9 - Supercondensadores

2.1.11 Comparação das soluções de armazenamento apresentadas

Inicialmente realizou-se uma comparação das soluções existentes no mercado no que diz respeito a baterias electroquímicas. Procedendo-se posteriormente à comparação da melhor bateria electroquímica com as restantes tecnologias de armazenamento de energia mencionadas neste trabalho, chegando-se no final à tecnologia mais apropriada para o sistema fotovoltaico em estudo.

Para que exista uma comparação objectiva e correcta é necessário começar por definir alguns critérios de avaliação numericamente mensuráveis. Os critérios seleccionados foram os seguintes:

- 1 - Energia fornecida em função do peso;
- 2 - Energia fornecida em função do tamanho;
- 3 - Potência em função do peso;
- 4 - Eficiência de carga/descarga;
- 5 - Energia em função do preço;
- 6 - Taxa de auto descarga;
- 7 - Número de ciclos;

Tabela 2.1 - Critérios para a escolha da bateria a utilizar

TIPO/CRITÉRIOS	Energia/Peso (Wh/Kg)	Energia/Tamanho (Wh/L)	Potência/Peso (W/Kg)	Eficiência Carga/Descarga (%)
NiCd	40-60	50-150	150	70-90
Chumbo-Ácido	30-40	60-75	180	50-92
NiMH	30-80	140-300	250-1000	66
NiZn	100	280	900	70
Lithium- Ion	100-250	250-360	250-340	80-90

TIPO/CRITÉRIOS	Energia/Preço (Wh/\$)	Taxa de Auto Desc. (%/mês)	Nº ciclos	Tensão nominal da célula (V)
NiCd	5	10	2000	1,2
Chumbo-Ácido	7-18	3-20	500-800	2,105
NiMH	2,75	30	500-1000	1,2
NiZn	2-3	10-25	400-1000	1,6
Lithium- Ion	1	8-31	1200	3,7

O que se verifica pela análise das tabelas acima expostas é que no que diz respeito ao ratio Energia/Peso, o tipo de bateria que consegue fornecer uma maior quantidade de energia (Wh) é de facto o Lithium-ion. Relativamente ao ratio Energia/Tamanho verifica-se novamente que as baterias de lithium-ion ganham vantagem. Quanto ao ratio Potência/Peso o cenário altera-se, sendo as baterias de níquel-zinco e as NiMH, as mais poderosas. As

baterias de chumbo-ácido, Nicd e lithium são as mais eficientes por ciclo (carga e descarga). As baterias de chumbo-ácido representam uma vantagem brutal no que diz respeito à viabilidade económica, na medida em que são bastante mais baratas que as restantes tecnologias apresentadas. Relativamente à taxa de auto descarga, pormenor bastante importante nos sistemas fotovoltaicos, na medida em que se pretende uma autonomia optimizada em caso de falha de produção, as baterias de chumbo-ácido são também elas a melhor opção. No que diz respeito à durabilidade, ou seja, ao tempo de vida das baterias, verifica-se que as baterias de NiCd levam uma enorme vantagem.

Por muitas vantagens que os tipos de baterias explanadas anteriormente tenham sobre as baterias de chumbo-ácido, o preço é sem dúvida algo que as coloca em explícita desvantagem. Daí que as baterias de chumbo-ácido continuem hoje em dia a ser o tipo de baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos. Outro pormenor de extrema importância para a escolha do tipo de baterias para um sistema solar fotovoltaico é sem dúvida o custo de manutenção. Primeiramente pretende-se um custo baixo de manutenção e simultaneamente uma autonomia de funcionamento que evite a deslocação de profissionais ao local para a realizar. Nesse aspecto, as baterias primordiais de chumbo-ácido poderiam de facto representar uma desvantagem grande, na medida em que necessitavam de uma regular verificação e reposição do nível da água. Hoje em dia, e muito devido ao crescimento dos sistemas solares fotovoltaicos e aos estudos envolventes a estes sistemas, desenvolveram-se baterias que não necessitam de qualquer tipo de manutenção. São as baterias de chumbo-ácido designadas por: do tipo regulado por válvulas (VRLA), que possuem um sistema de recombinação de gases que evita por completo a perda de água. Estas baterias podem ser constituídas por um electrólito absorvido em manta de fibra de vidro (AGM) ou em gel; outra solução é aproveitar as baterias utilizadas nos automóveis e realizar algumas modificações de forma a se adaptarem melhor às necessidades de um sistema solar fotovoltaico. As modificações propostas são a redução da concentração do electrólito, utilização de placas mais grossas, aumentar o volume do electrólito, etc. [15].

No entanto é também necessário realizar uma comparação das baterias de chumbo-ácido com as restantes formas de armazenamento de energia existentes. Primeiramente realizou-se uma análise da potência envolvida no sistema solar fotovoltaico em estudo (aproximadamente 50 KW) e verificou-se que diversas tecnologias poderiam ser de imediato retiradas da análise pelo simples facto de não se enquadrarem de todo com as dimensões pretendidas.

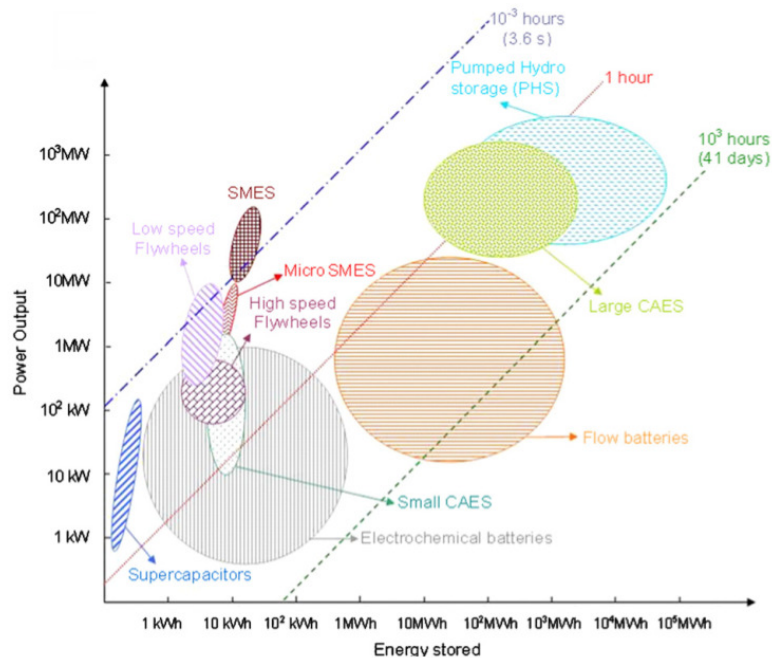


Figura 2.10 - Zona de funcionamento de cada tecnologia de armazenamento de energia[14]

Storage Technologies	Main Advantages (relative)	Disadvantages (Relative)	Power Application	Energy Application
Pumped Storage	High Capacity, Low Cost	Special Site Requirement		●
CAES	High Capacity, Low Cost	Special Site Requirement, Need Gas Fuel		●
Flow Batteries: PSB, VRB, ZnBr	High Capacity, Independent Power and Energy Ratings	Low Energy Density	◐	●
Metal-Air	Very High Energy Density	Electric Charging is Difficult		●
NaS	High Power & Energy Densities, High Efficiency	Production Cost, Safety Concerns (addressed in design)	●	●
Li-ion	High Power & Energy Densities, High Efficiency	High Production Cost, Requires Special Charging Circuit	●	○
Ni-Cd	High Power & Energy Densities, Efficiency		●	◐
Other Advanced Batteries	High Power & Energy Densities, High Efficiency	High Production Cost	●	○
Lead-Acid	Low Capital Cost	Limited Cycle Life when Deeply Discharged	●	○
Flywheels	High Power	Low Energy density	●	○
SMES, DSMES	High Power	Low Energy Density, High Production Cost	●	
E.C. Capacitors	Long Cycle Life, High Efficiency	Low Energy Density	●	◐

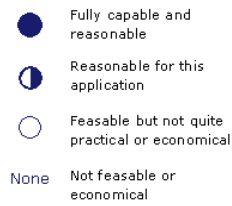


Figura 2.11 - Aplicações, vantagens e desvantagens de cada tecnologia de armazenamento de energia [16]

Considerando uma autonomia de funcionamento de 48 horas, podem-se facilmente excluir certas tecnologias, como: os super-condensadores, na medida em que não atingem os valores de energia armazenada pretendidos, apesar de conseguirem fornecer a potência em jogo.

A tecnologia de flywheels é também ela à partida excluída na medida em que apenas é considerada para potências superiores ao pretendido.

As baterias flow poderiam no limite representar uma solução no entanto a parte do círculo que realmente corresponde ao pretendido (50 KW de potência de saída e aproximadamente 2,5 MWh de energia armazenada) é tão ínfima que será desprezada nesta análise, considerando-se portanto como uma tecnologia a excluir (Ver figura 2.10).

Verifica-se portanto que a solução apropriada são as baterias electroquímicas, e como visto anteriormente, dentro desta categoria, a tipologia mais indicada são as baterias de chumbo-ácido, sendo então este tipo específico de armazenamento de energia que se irá utilizar.

2.2 Painéis fotovoltaicos

2.2.1 Introdução

Os painéis fotovoltaicos são um conjunto de células contendo um material solar fotovoltaico, que converte a radiação solar em corrente eléctrica contínua (DC).

O efeito fotovoltaico consiste no choque de fotões com materiais semicondutores, levando os electrões a um nível energético superior para se criar electricidade. O princípio de funcionamento assemelha-se a um fotodíodo, onde a corrente que atravessa o dispositivo é criada apenas devido à energia da luz.

Existem neste momento diversos tipos de tecnologias das quais se destacam, os painéis monocristalinos, policristalinos, de silício, de telureto de cádmio (composto químico

cristalino formado por cádmio e telúrio) e de Cobre Índio gálio selénio (CIGS - Copper Indium gallium selenium).

A tecnologia que neste momento se destaca a nível de eficiência é a de células fotovoltaicas monocristalinas. Os painéis podem atingir níveis de eficiência de 22%, anunciados pela empresa SunPower.

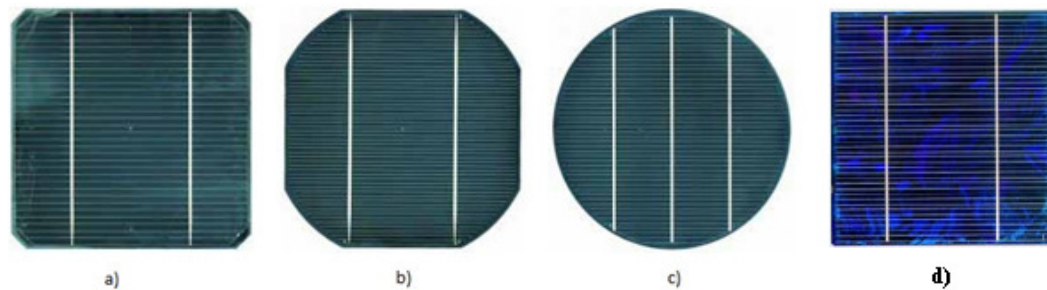


Figura 2.12 - a), b), c) células monocristalinas, d) célula policristalina

As aplicações de painéis fotovoltaicos são extensas e variadas, podendo ser aplicados em situações de ligação à rede eléctrica ou em casos isolados, instalados no solo, em telhados ou em fachadas de edifícios (BIPV - Building Integrated Photovoltaics).

A produção de painéis fotovoltaicos tem aumentado significativamente nos últimos anos, tendo-se verificado um aumento anual de 48% desde 2002. Tornou-se portanto na tecnologia de produção energética com maior taxa de crescimento do mundo.

Devido aos avanços tecnológicos e a esse aumento das proporções de manufactura e sofisticação, o custo dos painéis solares baixaram de uma forma regular desde o seu aparecimento. No entanto continua ainda hoje a ser uma tecnologia que requer um capital para investimento inicial deveras elevado e que requer, num sistema de ligação à rede eléctrica, um período de amortização também ele deveras elevado (na ordem dos 7 anos). Convém no entanto salientar que o período anteriormente referido apenas é possível devido aos incentivos governamentais que se tem verificado numa grande parte dos países desenvolvidos para a utilização deste tipo de tecnologia limpa, não ruidosa, sem necessidade de frequentes acções de manutenção, sem quaisquer emissões de dióxido de carbono e consequentemente sem qualquer impacto nocivo para o meio ambiente.

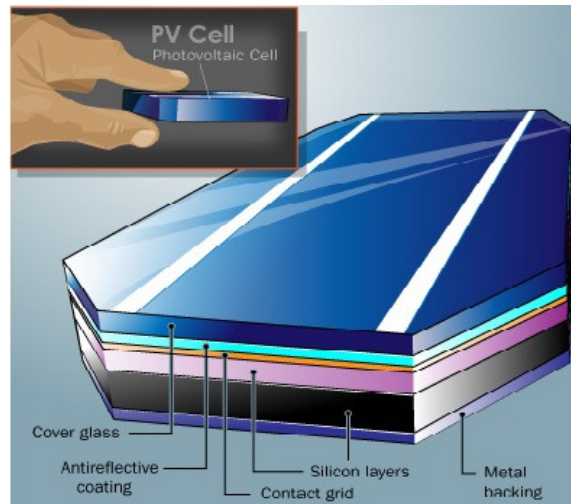


Figura 2.13 - Célula Fotovoltaica

2.2.2 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento é simples, quando um fóton com energia suficiente atinge o material semicondutor podem ocorrer três cenários:

- 1 - O fóton passa directamente através do material (verifica-se normalmente para os fótons de baixa energia);
- 2 - O fóton é reflectido na superfície do material;
- 3 - O fóton é absorvido pelo material e todo o processo descrito anteriormente é verificado (fótons de elevada energia);

No último caso, um electrão, que se encontra na banda de valência e que se encontra preso ao átomo devido a ligações covalentes fortes com átomos vizinhos, é excitado para uma banda superior à de valência, criando-se portanto um electrão móvel (permitindo que este flua pelo material). Devido à composição especial das células solares estes apenas se movem numa única direcção) e na ligação covalente, onde existia o electrão, é formado um espaço vazio carregado positivamente. A presença de um espaço vazio permite aos electrões de átomos vizinhos moverem-se para esse espaço vazio, criando um espaço no local onde se encontravam anteriormente e fazendo com que o próprio espaço vazio se mova também. Se a absorção ocorrer na região de depleção da junção, os elementos carregados, nomeadamente

os electrões e os espaços vazios são atraídos e, os electrões dirigem-se para o cátodo e os espaços vazios para o ânodo, formando-se assim uma corrente eléctrica.

Convém salientar que os fotões que compõem a radiação solar têm praticamente sempre uma energia elevada, maior do que a da banda proibida do material semiconductor e portanto quase sempre se verifica o cenário três.

2.2.3 Composição de uma célula fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica é composta por elementos semicondutores do tipo n e do tipo p com uma elevada superfície que forma uma junção, junção p-n, normalmente de silício. O que na prática se faz é inserir um dopante do tipo n numa wafer composta por elementos do tipo p ou ao contrário. Quando se dá o contacto entre os dois materiais, ocorre um movimento ordenado de electrões do lado do material do tipo n para o lado do material do tipo p, ou seja do lado com excesso de electrões para o lado com falta de electrões. Passa-se exactamente o contrário com os espaços vazios que se deslocam do lado do material do tipo p para o lado do material do tipo n. Este movimento cria um campo eléctrico que promove um fluxo de cargas, ou seja uma corrente. À junção dos dois materiais, onde não existem nem electrões, nem espaços vazios, chamamos de zona de depleção.

A este tipo de separação de cargas eléctricas, positivamente e negativamente carregadas, chama-se de drift. No entanto existe um outro processo de realizar esta separação e que reflecte um princípio de funcionamento ligeiramente diferente. Este processo denomina-se de difusão das cargas de zonas de maior concentração para zonas de menor concentração, ou seja não necessita da criação de um campo eléctrico para realizar a separação. No entanto este processo apenas é utilizado em células solares de terceira geração, também conhecidas como células fotovoltaicas thin-film.

Cada um dos materiais semicondutores, nomeadamente o material do tipo n e o material do tipo p são ligados a contactos metálicos que permitem a sua ligação a uma carga externa.

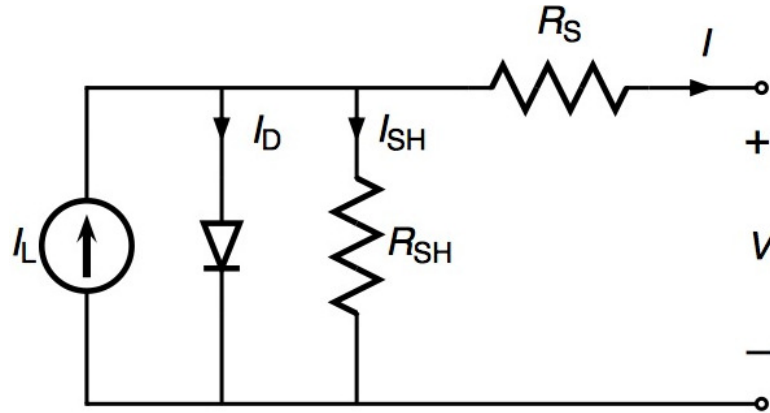


Figura 2.14 - Circuito equivalente de uma célula solar

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (2.4)$$

$$V_j = V + IR_s, \quad (2.5)$$

$$I_{SH} = V_j / R_{SH}, \quad (2.6)$$

$$I = I_L - I_0 \left\{ e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{nkT} \right)} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{SH}}, \quad (2.7)$$

Onde:

I - corrente de saída (A);

I_L - corrente fotovoltaica (A);

I_D - Corrente no díodo (A);

I_{SH} - corrente shunt (A);

V_j - Tensão no díodo (V);

V - Tensão de saída (V);

R_s - Resistência série (Ω);

R_{SH} - Resistência shunt;

q - carga elementar;

n - factor de idealidade do díodo (1 para um díodo ideal);

k - constante de Boltzmann;

T - Temperatura;

Como se pode comprovar através da fórmula X a temperatura vai diminuir o crescimento da exponencial, fazendo com que a corrente de saída aumente. Acontece ainda que a corrente fotovoltaica vai aumentar ligeiramente, devido ao aumento energético provocado pelo aumento da temperatura. No entanto o efeito mais notório devido a variações de temperatura é de facto a variação da tensão em circuito aberto da célula solar. Com aumentos da temperatura verifica-se que a tensão em circuito aberto diminui. No entanto a taxa com que esta tensão varia, está bastante dependente do valor inicial da tensão ser elevado ou baixo. Para células solares com tensão em circuito aberto elevadas o efeito que a temperatura tem na redução do seu valor é bastante menor que para células solares com tensões em circuito aberto baixas.

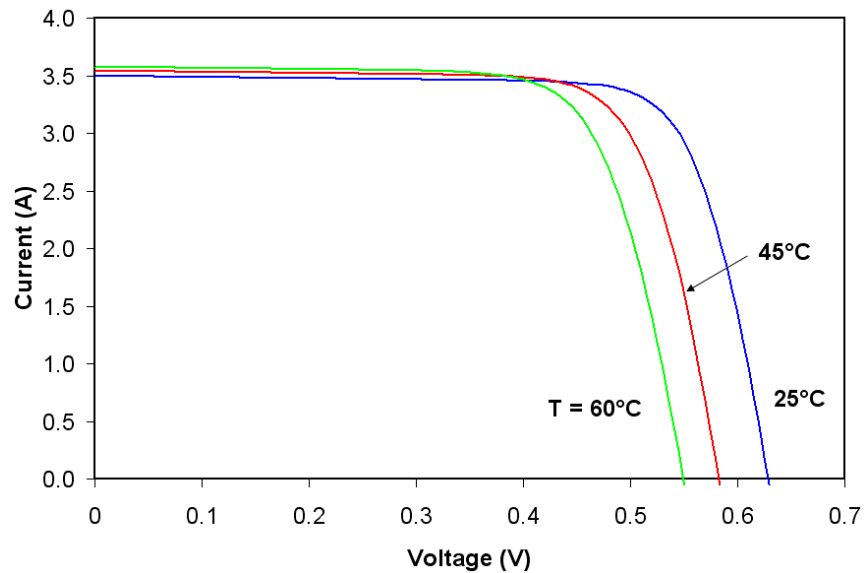


Figura 2.15 - Influência da temperatura na curva característica de uma célula solar

Outro pormenor na construção das células solares é nomeadamente o valor da resistência série apresentada na figura 2.16. Se o valor da resistência for demasiado elevado a queda de tensão entre a tensão gerada pela junção p-n, devido ao campo eléctrico, e a tensão de saída, vai também ela ser elevada. Por outro lado o valor da corrente de curto-circuito será também ele afectado, já que o seu valor irá diminuir com o aumento da resistência. Ou seja o comportamento da célula assemelhar-se-á ao de uma resistência pura.

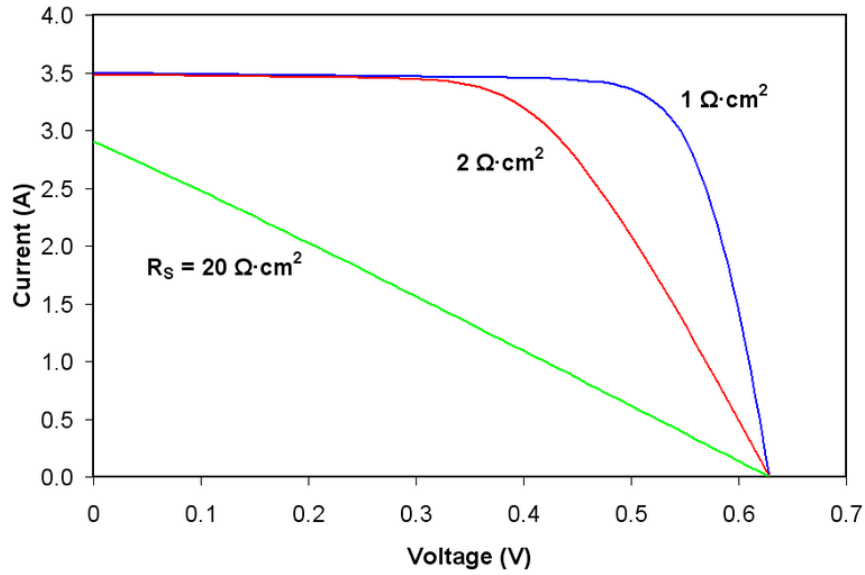


Figura 2.16 - Influência de R_s na curva característica de uma célula solar

Simultaneamente o valor da resistência shunt tem também ele que ser bem considerado. Se este apresentar um valor demasiado baixo, o valor da corrente de saída (I) será fortemente afectado, assim como ocorrerá uma ligeira redução do valor da tensão em circuito aberto.

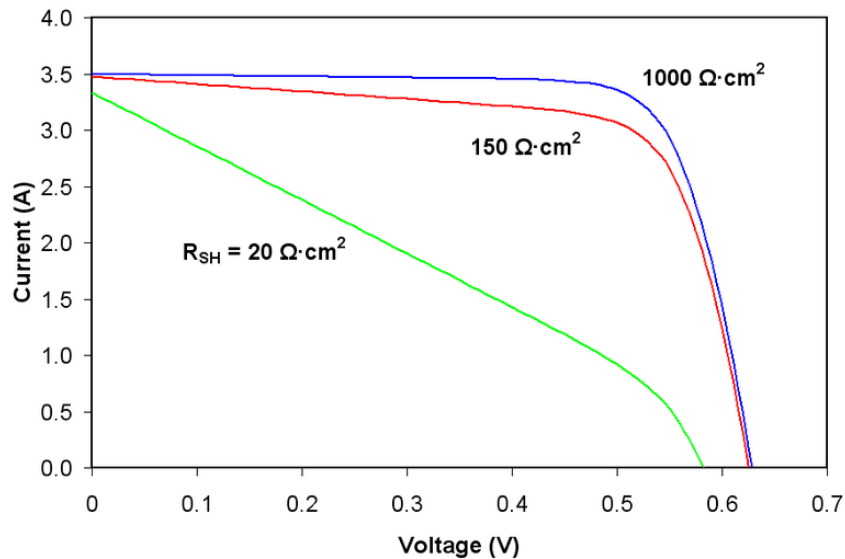


Figura 2.17 - Influência de R_{sh} na curva característica de uma célula solar

2.2.4 Irradiação Solar

Outro detalhe bastante importante é de facto a irradiação solar. É de elevada importância saber, aquando do dimensionamento das células solares, o nível de AM para as quais as mesmas devem ser optimizadas.

AM representa o denominado air mass coefficient, que permite dar uma indicação do espectro da irradiação solar que realmente está presente na superfície das células solares. Devido à atmosfera e aos gases nela presentes, o espectro da irradiação solar é fortemente afectado, quer seja para comprimentos de onda reduzidos ou elevados [17]. Por outro lado o ângulo de incidência solar, vai também ele provocar alterações no espectro da irradiação solar sentida pelas células em determinado momento. Não provoca um efeito directo, já que a intensidade da irradiação do sol mantém-se, mas a distância que a irradiação irá percorrer no interior da atmosfera será consideravelmente superior, devido à obliquidade da incidência. Daí que ao final da tarde o céu tenha um tom cor-de-rosa devido à mudança do espectro da irradiação solar.

A camada de ozono, vai provocar uma diminuição significativa do espectro da irradiação solar no que diz respeito aos baixos comprimentos de onda. São também exemplos de redução de determinados comprimentos de onda, o vapor de água, o oxigénio, o dióxido de carbono e o azoto.

Ocorrendo uma incidência perfeitamente perpendicular da irradiação existem dois níveis de AM, o AM0 e o AM1. O AM0 indica o espectro de irradiação no exterior da atmosfera e portanto é normalmente utilizado em aplicações espaciais, como por exemplo dimensionamento de painéis solares para instalação em satélites. O AM1 indica o espectro da irradiação solar ao nível da água do mar. No entanto a incidência não será na maior parte das situações perpendicular ao local de instalação dos painéis e como tal utiliza-se o AM1.5, que pressupõe um ângulo relativamente ao eixo perpendicular de 48,2 graus.

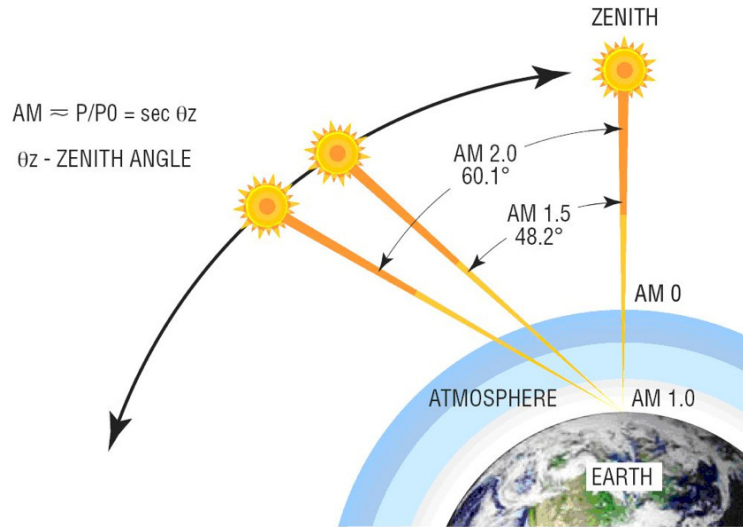


Figura 2.18 - Exemplo ilustrativo dos coeficientes de massa de ar

2.2.5 Maximum Power Point Tracker (MPPT)

É de extrema importância para o sistema que se pretende dimensionar, que as células solares consigam em cada momento devolver à saída a sua potência máxima, ou seja, é necessário na curva característica apresentada na figura 2.15 encontrar a melhor relação entre tensão e corrente. Está comprovado estatisticamente que esse valor se encontra entre 70 a 80% da tensão em circuito aberto e simultaneamente a 90 % da corrente de curto-circuito. No entanto numa aplicação prática pretende-se que exista um mecanismo capaz de potenciar a regulação da potência de saída das células solares para o seu valor máximo. Esse mecanismo designa-se Maximum Power Point Tracker (MPPT). O sistema de regulação não possui quaisquer características mecânicas, que permitam um aproveitamento máximo da incidência solar directa, sendo portanto um sistema puramente electrónico. Este tipo de sistema pode ser implementado tanto para casos onde se pretende um regime de funcionamento isolado como para casos de ligação à rede de distribuição local. No primeiro caso, o dilema que se coloca quanto ao regime óptimo de funcionamento dos painéis, ou seja, na potência óptima que estes podem de facto fornecer, reside no facto de existir uma ligação directa entre os painéis e as baterias. Desta forma a tensão de funcionamento dos painéis é imposta pela tensão das baterias, o que não coincide normalmente com o valor de tensão que permite obter, à saída de cada painel ou conjunto de painéis, a potência máxima. Portanto o sistema de maximum power point tracking vai encontrar a tensão que proporciona a melhor potência de saída. A tensão de funcionamento dos painéis será diferente da tensão das baterias e como tal a corrente de carga das baterias será dada pela seguinte equação:

$$I_{carga_baterias} = \frac{V_{painéis}}{V_{baterias}} * I_{painéis} \quad (2.8)$$

Analisando a equação 2.8 verifica-se que quanto maior a diferença entre as tensões, dos painéis e das baterias, maior será a corrente de carga. Outro factor que provoca um aumento da corrente de carga das baterias é a temperatura do ambiente envolvente. Como já se viu anteriormente a temperatura tem influência na curva característica de uma célula solar e como tal para temperaturas baixas a tensão óptima de funcionamento dos painéis será superior do que para condições de funcionamento standard (25 °C e irradiação 1000W/m²).

Outro factor importante no funcionamento do maximum power point tracker é quando as baterias se encontram carregadas e simultaneamente os recursos solares ultrapassam as necessidades da carga. Nesse caso não faz qualquer sentido manter o ponto de funcionamento dos painéis naquele que conduz à potência máxima de saída. Daí que existam duas possibilidades. O sistema de controlo do maximum power point tracker detecta essa eventualidade e modifica o ponto de funcionamento até que a produção iguale a carga, ou então o ponto de funcionamento correspondente à potência máxima nunca muda e coloca-se uma resistência que terá o intuito de dissipar toda a potência excedente [18].

No caso de ligação à rede de distribuição os painéis podem funcionar sempre no maximum power point na medida em que a rede tem sempre capacidade para absorver essa energia, no caso de as cargas locais não atingirem a potência produzida localmente pelos painéis fotovoltaicos. No caso de falha de abastecimento por parte da rede e se estar na presença de um cenário idêntico, então ter-se-á novamente de recorrer às duas metodologias referidas anteriormente: ou modificar o ponto de funcionamento na curva característica ou utilizar a resistência para dissipar a energia excedente [19].

As dificuldades que jazem por trás de um sistema de maximum power point tracking são notórias em sistemas de controlo baseados em algoritmos “Perturb and Observe” e “Hill Climbing”, na medida em que, por um lado pequenos incrementos conduzem a um resultado óptimo mais fino, no sentido de rigor de optimização, mas por outro lado, aquando da escolha de incrementos elevados, obtém-se uma solução mais rapidamente, tendo portanto de existir um equilíbrio entre rapidez de resposta e precisão. Outro dilema que se coloca são de facto as modificações das condições meteorológicas, nomeadamente da irradiação solar, que conduzirão a uma curva característica de funcionamento do painel ou conjunto de painéis.

Portanto considerando uma curva característica de funcionamento de um determinado painel, o método para se atingir o ponto de funcionamento óptimo em termos de potência de saída do painel é normalmente o “Hill Climbing”, ou seja, começa-se com um valor inicial de tensão U_1 , verifica-se o valor correspondente da corrente e calcula-se a potência de saída. De

seguida incrementa-se o valor da tensão para U_2 e realiza-se exactamente o mesmo procedimento. Verifica-se se o valor da potência P_2 é superior a P_1 , se sim então assume-se o valor de tensão U_2 , se não, então reduz-se o passo entre iterações ($\Delta U = U_n - U_{n-1}$) e repete-se todo o procedimento anunciado. No entanto este método apenas permite encontrar o ponto de funcionamento óptimo, em regime permanente, ou seja, quando não existem alterações na irradiação solar que impliquem uma modificação da curva característica do painel. Daí que tenham sido desenvolvidas tecnologias que perante situações de funcionamento transitório, conseguem atingir o ponto óptimo mais rapidamente, evitando perdas produtivas.

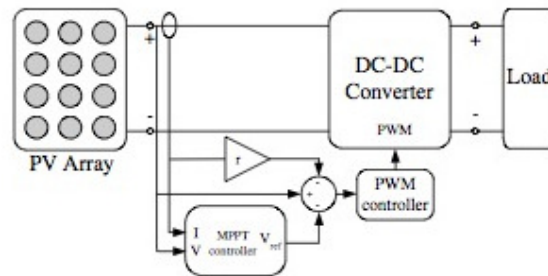


Figura 2.19 - Loop de controlo para se obter o MPPT em regime transitório [20]

Um dos métodos existentes consiste na utilização de um sistema de controlo constituído por um loop de controlo linear, como se pode verificar na figura X. Isto é, o método proposto cria uma recta, representando uma carga virtual. A recta é dada pela seguinte expressão:

$$V - rI - V_{ref} = 0, \quad (2.9)$$

O declive da recta é definido pelo ganho r de um sensor de corrente. V_{ref} serve para realizar uma translação da recta com declive r para a esquerda ou para direita de forma que o verdadeiro ponto óptimo seja encontrado. A razão da sua existência reside no facto de a recta virtual criada, ter apenas a pretensão de acelerar o processo de pesquisa do ponto óptimo e não de intersectar imediatamente todos os pontos óptimos de cada curva característica para diferentes irradiações.

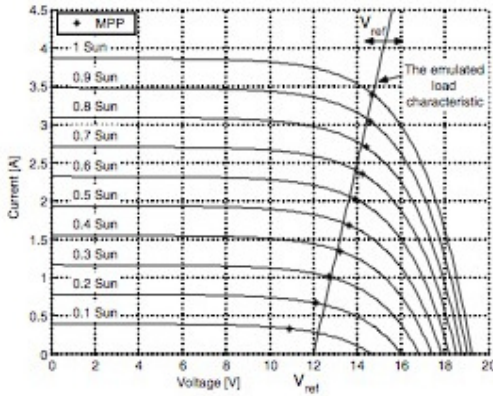


Figura 2.20 - Loop de controlo para se obter o MPPT em regime transitório [20]

Como se pode verificar na figura, a recta não intersecta os pontos óptimos, daí que quando se pesquisa o ponto óptimo para uma curva de determinada irradiação, utilizando-se uma recta com declive r e parâmetro de translação V_{ref} , se atinge um ponto dessa mesma curva que não corresponde ao ponto óptimo, já que para irradiações superiores se têm tensões óptimas superiores. Daí que se tenha que recorrer a um método iterativo para mudar V_{ref} até que o valor de V que corresponde à potência máxima seja atingido.

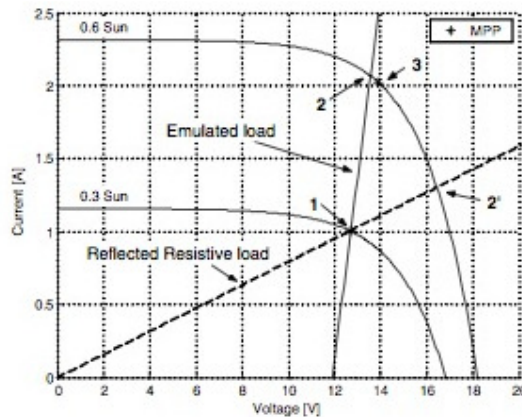


Figura 2.21 - Diferença entre o método “Hill Climbing” e o método proposto [20]

Na figura 2.21, partindo do ponto de funcionamento 1 e mantendo-se a carga resistiva existente anteriormente à mudança da irradiação solar de 0.3 Sun para 0.6 Sun, pode-se verificar que através do método “Hill Climbing” se intersecta a nova curva característica no ponto 2', que se encontra bastante afastado do ponto óptimo, representado pelo ponto 3. Por outro lado através da criação da recta que representa uma carga virtual (Emulated load),

intersecta-se a nova curva característica no ponto 2, restando poucas iterações para mudar o valor de V_{ref} e ajustar V para o ponto 3 e se obter o ponto de funcionamento óptimo.

2.2.6 Configurações de ligação

A combinação entre o painel e o inversor dita como tudo deve ser ligado. Um conjunto de painéis em série é chamado de string. O número de painéis por string é ditado pela gama de tensões de funcionamento do inversor. O número máximo de painéis por string é controlado pela tensão em circuito aberto de cada painel, considerando-se a temperatura de funcionamento mais baixa para o local de instalação (para temperaturas baixas a tensão em circuito aberto aumenta, logo considera-se o pior cenário possível por forma a que o valor máximo estipulado pelo inversor não seja de todo ultrapassado). Contudo um número mínimo de painéis por string tem também de ser considerado e esse valor é fixado pelo valor da tensão correspondente à potência de saída do painel máxima (V_{mp} - max power voltage), tendo em conta a temperatura de funcionamento mais elevada registada no local de instalação (no pior cenário possível e, considerando um funcionamento dos painéis em conjunto com um sistema de power point tracker, a tensão mínima que o sistema atinge é a tensão correspondente à potência máxima de saída dos painéis. No entanto a temperatura considerada no cálculo tem de ser a temperatura mais elevada para o local de instalação dos painéis na medida em que para temperaturas elevadas a curva característica do painel sofre uma translação para a esquerda, o que significa uma diminuição do valor de V_{mp}).

Depois de calculado o número de painéis que compõem uma string, torna-se necessário calcular o número de strings que são necessárias ligar em paralelo de modo a se obter um valor para a corrente de entrada do inversor compatível com as características do mesmo. Ou seja, depois de comprovado que se tem um valor de tensão compreendido entre os valores máximo e mínimo de tensão do inversor, respectivamente, basta verificar qual a potência que o inversor admite, ou consegue fornecer, e daí facilmente se retira o valor indicado para a corrente de entrada do inversor. O que se pretende é maximizar o valor da potência fornecida pelo inversor às cargas, logo tenta-se sempre aproximar ao máximo o valor da potência gerada pelos painéis à potência AC de saída do inversor. Se por ventura o valor da corrente proporcionar um excesso da potência admissível, não existe um problema grave, na medida em que a maioria dos inversores conseguem neste momento suprimir esse excesso através de condensadores. O que está então em questão é pura e simplesmente desperdício energético, já que todo o excesso de potência é desaproveitado e não se traduz em potência AC para alimentação das cargas. Logo para se conseguir calcular qual a potência AC que realmente se tem disponível à saída do inversor, realiza-se o seguinte cálculo, que entra em linha de conta com o número de painéis utilizados, com a potência em condições PTC (Performance Test Conditions, ou seja, coloca-se o equipamento a funcionar no exterior, no

local de instalação, e verifica-se o verdadeiro valor de potência que o conjunto consegue de facto fornecer) e finalmente com a eficiência indicada nas características do inversor.

$$Potência_{AC} = N^{\circ} \text{ painéis} * Potência_{PTC_DC} * eficiência_inversor, \quad (2.10)$$

2.2.7 Problemas de sombreamento

Podem-se considerar dois tipos de sombreamento dos painéis fotovoltaicos, o sombreamento dito suave e o sombreamento severo. O primeiro pode ser constatado aquando de sombreamentos provocados por objectos que não interagem directamente com os painéis, que provocam um sombreamento à distância, como são exemplos as sombras provocadas por chaminés, ramos de árvores,...etc. O segundo consiste num sombreamento directo, provocado por objectos que se encontrem depositados directamente em cima do vidro de protecção do painel.

No caso de um sombreamento parcial é importante saber o comportamento de uma string de painéis fotovoltaicos face à percentagem de irradiação, face ao número de células parcialmente sombreadas no mesmo painel, face ao número de células parcialmente sombreadas em painéis diferentes e perante a existência de díodos de bypass com overlap e sem overlap.

Considerando-se o cenário de existir uma string de painéis composta por n painéis fotovoltaicos e de se verificar o sombreamento parcial de apenas uma célula de um dos painéis, o que se verifica segundo Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, é que a percentagem de irradiação incidente na célula vai alterar o ponto de funcionamento óptimo que corresponde à máxima potencia de saída. Como era previsível quanto maior a irradiação maior a potencia de saída da string de painéis.

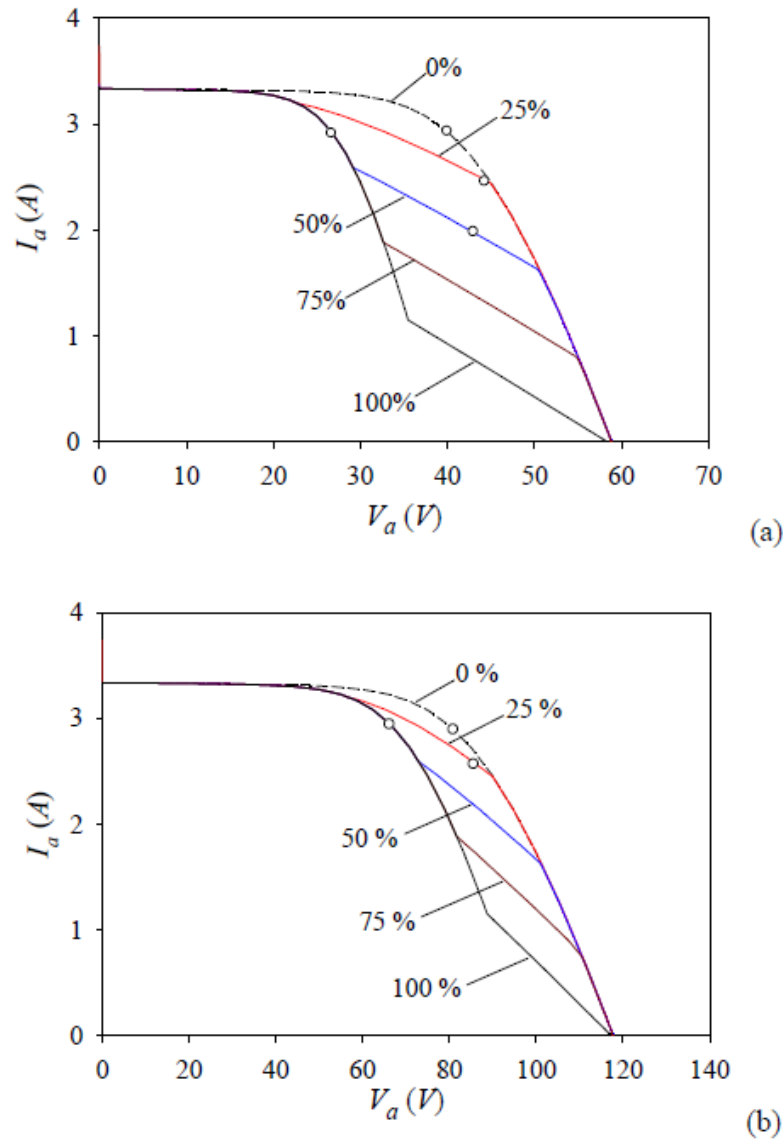


Figura 2.22 - a) Efeito do sombreamento parcial, de uma célula num dos painéis de uma string composta por 3 painéis, no ponto de funcionamento óptimo da string [21].

b) Efeito do sombreamento parcial, de uma célula num dos painéis de uma string composta por 6 painéis, no ponto de funcionamento óptimo da string [21].

Na figura acima representada os círculos representam o ponto de funcionamento óptimo da string de painéis. Estão representadas as curvas para várias percentagens de sombreamento parcial.

Contudo apenas o efeito proporcionado pela diferença de irradiação não é suficiente para se conhecer em detalhe os efeitos gerais do sombreamento parcial. Então torna se necessário analisar em maior detalhe, transpondo outro tipo de testes para este estudo.

Outra etapa é então verificar o efeito do sombreamento parcial, não apenas de uma célula, mas de várias células do mesmo painel. O que se conclui, pelos testes realizados por Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, é que o número de células sombreadas no mesmo painel não tem qualquer influência no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis.

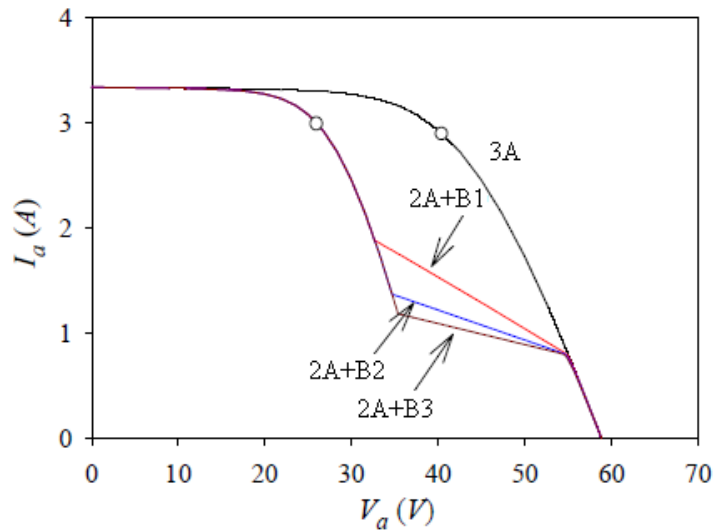


Figura 2.23 - Efeito do número de células sombreadas parcialmente, num único painel num conjunto de painéis de uma string, no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis [21].

Na figura podem-se constatar diferentes curvas para diferentes números de células sombreadas parcialmente. Convém salientar que neste estudo se considerou para as células sombreadas parcialmente uma irradiação de $0,25 \text{ KW/m}^2$ e uma temperatura de célula de 50°C , enquanto, que para as células não sombreadas se considerou a irradiação comumente utilizada de 1 KW/m^2 . De novo os círculos representam o ponto de funcionamento óptimo da string de painéis. O número de painéis, por string, considerado foi três.

O teste com resultados com maior impacto no ponto de funcionamento da string de painéis é no entanto quando se consideram células sombreadas mas em painéis diferentes, ou seja uma célula sombreada no primeiro painel da string, depois duas células sombreadas, uma no primeiro e outra no segundo painel e finalmente três células sombreadas, no primeiro, segundo e terceiro painel. No total de três painéis na string.

Verifica-se um impacto enorme no ponto de funcionamento da string. Com o aumento do número de células sombreadas em painéis diferentes verifica-se uma diminuição significativa da potência de saída do painel.

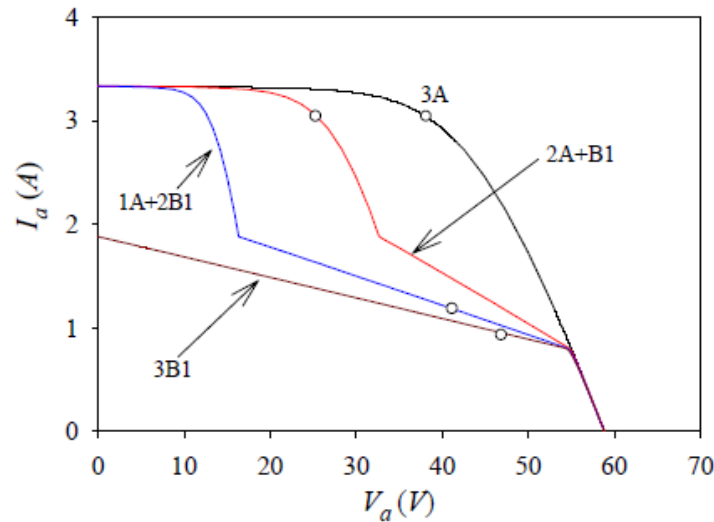


Figura 2.24 - Efeito do sombreamento parcial de uma única célula por painel, em painéis diferentes, no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis [21].

Relativamente à utilização de díodos no circuito dos painéis fotovoltaicos verifica-se que existem dois tipos de ligação possíveis para os díodos. Podem-se utilizar os díodos para realizar o designado “bypass” da corrente eléctrica e/ou então como função do designado “blocking” da corrente. A primeira alternativa visa proporcionar um bom funcionamento das células que compõem os painéis, evitando que as mesmas se deteriorem aquando de um sombreamento parcial. O que está em causa quando se verifica um sombreamento parcial de uma determinada célula é que a corrente de curto-circuito associada a essa célula vai ser menor, do que aquela que existia inicialmente sem qualquer tipo de sombreamento. No entanto estando as células ligadas em série, obrigatoriamente a corrente que atravessa as células será sempre a mesma. Então a corrente que circula pelas células não sombreadas será a mesma que atravessa as células sombreadas, e o que pode eventualmente acontecer, dependendo do nível de sombreamento experienciado pelas células sombreadas, é que essa corrente seja superior à nova corrente de curto-circuito das células sombreadas, dando origem a um aquecimento nas zonas sombreadas e em zonas adjacentes. Provocando portanto um desgaste do material, uma consequente redução do seu tempo de vida e uma redução do rendimento do painel na medida em que como já se viu anteriormente, para temperaturas mais elevadas, o ponto de funcionamento óptimo do painel é alterado, provocando uma redução da potência de saída do painel. Integrando no circuito um diodo de bypass faz com que a quantidade de corrente que excede a corrente de curto circuito da célula seja desviada, evitando os problemas de aquecimento anteriormente referidos. Ou seja quando a corrente de curto-circuito é excedida, a célula cria aos seus terminais uma tensão negativa que proporciona uma potência negativa (uma potência que traduz a energia dissipada e não produzida, daí o sinal negativo) polarizando o diodo positivamente [22].

No entanto, quando se fala em díodos bypass, no contexto de painéis fotovoltaicos torna-se necessário salientar que existem duas formas de efectuar a sua integração no circuito. Uma delas é pura e simplesmente ligar o diódo em paralelo com um conjunto de células (o número de células protegidas por esse diódo é uma escolha do fabricante, sendo que a solução óptima seria colocar um diódo bypass em cada célula. No entanto existem condicionalismos económicos que tem de ser tidos em conta, e portanto tem de ser encontrado um compromisso entre qualidade e preço). A outra forma de ligação é proporcionar ao circuito a existência de overlap de algumas células, ou seja, que certas células estejam protegidas duas vezes. A vantagem da utilização desta alternativa é que quando se verifica um sombreamento de uma célula que se encontre overlapped pelos díodos, a potência de saída do painel é deveras superior à potência de saída que se verifica aquando de um sombreamento parcial, quer de uma célula que se encontre fora da zona de overlapping dos díodos, quer de uma célula que se encontre num painel onde não existam díodos overlapped. Os resultados podem ser comprovados pela figura abaixo representada e são conclusão do estudo proporcionado por Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu [21].

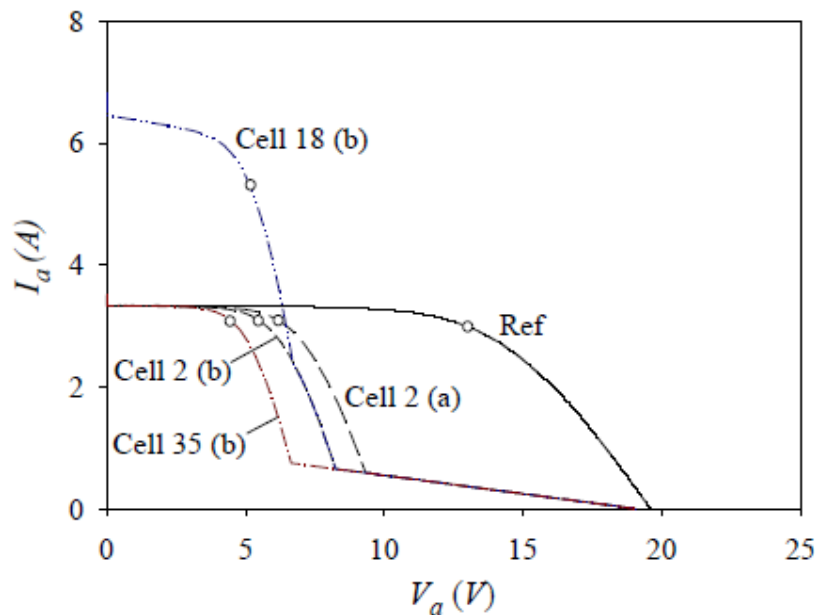


Figura 2.25 - Efeito do sombreamento parcial de uma única célula por painel, em painéis diferentes, no ponto de funcionamento óptimo da string de painéis [21].

Na figura verifica-se o teste para diferentes arquitecturas do circuito formado pelos díodos. Quando se apresenta (a) significa que não existem no circuito díodos bypass overlapped, e (b) quando se testou o rendimento do painel, utilizando-se díodos overlapped. Resumidamente neste teste, foram escolhidas as células 2, 18 e 35 para se verificar o comportamento do painel. O que se verifica é que para a Cell 18 (b) a potência de saída do painel não é tão

afectada pelo sombreamento, mas no entanto quando se olha para a Cell 2 (a) e Cell 2 (b) verifica-se que sem overlapping de díodos o painel fornece uma potência superior.

A segunda alternativa visa proporcionar um bom funcionamento do sistema em geral e não apenas do sistema produtor (sistema fotovoltaico). Num sistema de produção solar com utilização de soluções de armazenamento de energia, existe a necessidade de ter uma atenção especial aos períodos em que o sistema fotovoltaico não está a produzir rigorosamente nada, como é caso de períodos nocturnos, nos quais as baterias podem descarregar a sua energia não só para a carga, mas também para o circuito produtor. Neste caso a utilização de díodos blocking evitará que esse fenómeno aconteça, maximizando a energia entregue à carga em cada momento. O díodo blocking é portanto ligado em série com o circuito onde se deseja evitar a circulação de corrente para os painéis fotovoltaicos.

Outra problemática que o sistema fotovoltaico pode eventualmente enfrentar é de facto o mau funcionamento de determinado painel integrado num conjunto de strings de painéis ligadas em paralelo entre si. Se existir um defeito, um curto-circuito num determinado painel, os restantes painéis vão contribuir para esse curto-circuito, fornecendo corrente que deveria ser entregue ao inversor e/ou às baterias. Ou seja, verificando-se duas desvantagens, o não aproveitamento de toda a corrente produzida e simultaneamente a utilização indevida dessa corrente para alimentar o curto-circuito num dos painéis. Neste caso também são utilizados os díodos blocking, para evitar esse fluxo de corrente em direcção ao curto-circuito. Neste caso os díodos blocking têm um nome específico e denominam-se de isolation diodes.

2.2.8 Inclinação e distância entre strings de painéis fotovoltaicos para evitar os sombreamentos

Para sistemas instalados no hemisfério Norte verifica-se que a direcção mais apropriada para orientação dos painéis, é directamente para Sul, nomeadamente na direcção do equador. Realizando-se modificações à orientação Sul, para Este e para Oeste a irradiação total recebida pelos painéis sofre uma diminuição [23].

Relativamente ao ângulo de inclinação, para um sistema isolado onde também se pretende garantir um bom rendimento no inverno, e não só maximizar a energia produzida no verão, deve-se utilizar um ângulo de 20° [24].

No caso de ser possível modificar o ângulo de inclinação dos painéis, pode-se colocar o painel com uma inclinação exactamente igual à latitude do local de instalação e realizar uma regulação de mais ou menos quinze graus, conforme se está na época de inverno ou de verão, respectivamente [25].

Relativamente à distância entre strings de modo a se evitem ao máximo problemas de sombreamento, este valor pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$d = \frac{b * \text{sen}(180 - \beta - \gamma)}{\text{sen} \gamma}, \quad (2.11)$$

Onde:

d = distância entre strings de painéis (m);

b = largura do painel (m);

β = inclinação do painel (°);

γ = valor mínimo da altura solar tolerável no sombreamento

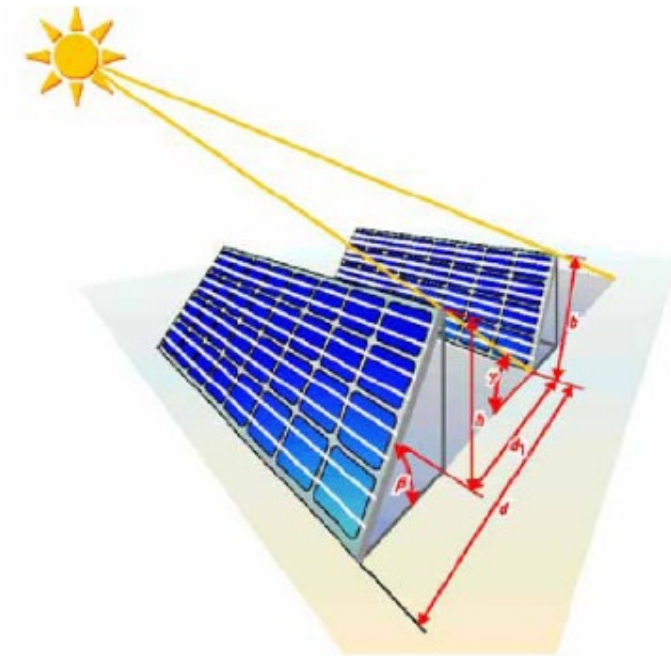


Figura 2.26 - Pormenor das distâncias e ângulos considerados no cálculo da distância entre strings de painéis de forma a se evitem problemas de sombreamento [24]

2.3 Inversores

2.3.1 Introdução

Os inversores são aparelhos eléctricos que convertem um sinal de corrente contínua (DC) num sinal de corrente alternada (AC), com valores de tensão e frequência desejados. São portanto exactamente o oposto de rectificadores. Inicialmente, nos primeiros modelos de inversores tinha-se basicamente um transformador com ponto médio onde entre o ponto médio e as restantes duas linhas se tinha um comutador, que provocava uma circulação da corrente nos

dois sentidos, criando assim uma corrente alternada. A velocidade de comutação deste comutador estipulava a frequência da onda quadrada de saída do transformador e o número de espiras do transformador permitia a regulação da relação de transformação e consequentemente da tensão aos terminais do secundário do mesmo. A onda de saída era de facto quadrada na medida em que o comutador, para uma determinada posição ou se encontrava on ou off. No entanto, utilizando-se um filtro designado por “passa baixo”, conseguia-se obter uma aproximação de uma onda sinusoidal. Consegue-se concluir a afirmação proferida através da análise de Fourier. Sabe-se que uma onda quadrada é o resultado da soma infinita de ondas sinusoidais para diferentes frequências. Ou seja somando-se a componente fundamental da onda (onda com uma frequência f) e todos os seus harmónicos (ondas com frequências múltiplas da fundamental) para um número infinito de frequências, obtém-se uma onda quadrada perfeita. O filtro passa baixo encarregava-se de filtrar o máximo número de harmónicos, restando apenas a componente fundamental e como tal passava-se a ter uma onda sinusoidal à saída do inversor.

Hoje em dia o comutador foi substituído por elementos electrónicos semicondutores, como é o caso dos transístores, que realizam exactamente a mesma função, com algumas vantagens implícitas, nomeadamente a duração de vida dos materiais e conseguindo-se uma onda sinusoidal de saída bastante mais definida, o que garante a alimentação de aparelhagem eléctrica bastante sensível.

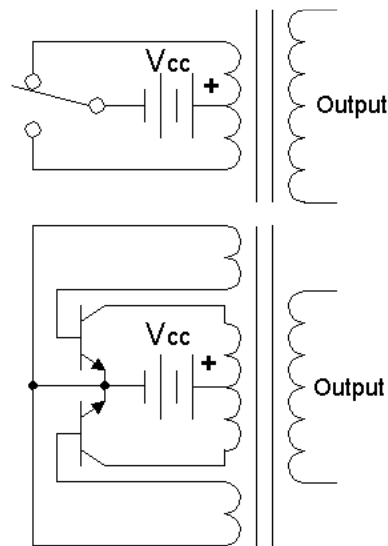


Figura 2.27 - Esquema eléctrico simplificado de inversores, inicialmente com comutador e hoje em dia utilizando-se transístores [26]

A qualidade da onda de saída pode ser medida através do designado “Total Harmonic Distortion” (THD), através da seguinte expressão:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}, \quad (2.12)$$

Onde:

THD = Total Harmonic Distortion (%);

V_n = Tensões dos sinais harmónicos;

V_1 = Tensão do sinal de frequência fundamental;

2.3.2 Tipos de Inversores

Existem três tipos de inversores disponíveis no mercado:

- 1 - Inversores para ligação à rede eléctrica de distribuição (Tie-grid inverters);
- 2 - Inversores para funcionamento isolado (Off-grid inverters);
- 3 - Inversores de ligação a baterias de backup (Backup inverters);

Relativamente aos primeiros, a sua principal e única aplicação é para sistemas cujo propósito seja de ligação directa à rede de distribuição. Um exemplo deste tipo de aplicação são as unidades de micro-geração fotovoltaica, hoje em dia promovidas pelo governo português (e também pelos principais países europeus) através de incentivos tarifários para a produção desse tipo de energia. Os consumidores conseguem através deste tipo de inversores transformar a corrente eléctrica contínua (DC) produzida pelos painéis fotovoltaicos, em corrente eléctrica alternada para alimentação das cargas que se encontram distribuídas pela rede eléctrica nacional. A diferença entre a energia consumida e a energia produzida, corresponde à energia que será de facto paga no final.

O que é realmente relevante salientar é que este tipo de inversores tem a necessidade de possuir internamente um elemento de sincronização, que permita a ligação deste tipo de sistemas à rede eléctrica. A rede eléctrica fornece aos consumidores uma onda sinusoidal com uma determinada tensão e frequência cujos níveis são instantaneamente controlados, com o perigo de mau funcionamento do sistema se tal não se verificar. Logo este tipo de inversores têm de se adaptar à forma de onda da rede e quem realiza essa função é nomeadamente o elemento de sincronização. Outro pormenor cuja relevância é elevada é a função que estes inversores têm de realizar automaticamente o isolamento do sistema fotovoltaico da rede, aquando de um problema de abastecimento por parte da rede. Havendo uma contingência na rede de distribuição local, é obrigatório o isolamento imediato dos

sistemas de produção dispersa utilizando painéis fotovoltaicos, pelos protocolos de segurança standard UL1741, nos Estados Unidos e IEEE 1547, na Europa. Este mecanismo de segurança existe devido a acções de manutenção que sejam necessárias realizar na rede de distribuição. Se for necessário realizar uma acção de manutenção em determinado ponto da rede e para isso se tenha previamente realizado o corte dessa zona da rede na subestação mais próxima, de forma que os trabalhos pudessem ser realizados na ausência de tensão e existirem sistemas de produção dispersa que estejam a debitar corrente eléctrica para a rede nessa mesma zona de actuação dos profissionais, não existe a garantia de ausência de tensão e os profissionais podem ser induzidos em erro, representando portanto um perigo para os mesmos.

Este tipo de inversores é normalmente conhecido como “line commutated”.

O segundo tipo de inversores foi pensado para soluções onde não existe qualquer interacção com a rede eléctrica, privilegiando-se um regime de funcionamento completamente isolado. Ou seja aplicam-se em situações de produção de energia, onde é absolutamente necessária a utilização de elementos de armazenamento de energia. Neste caso não é necessário qualquer elemento de sincronização, o inversor tem a capacidade de gerar uma onda sinusoidal com determinados valores de tensão e frequência, devidamente adaptados às características dos equipamentos existentes no local de implementação.

Este tipo de inversores é normalmente conhecido como auto comutado (self-commutated) ou como cascade inverters, dependendo da metodologia que possuem internamente para gerar o sinal de tensão.

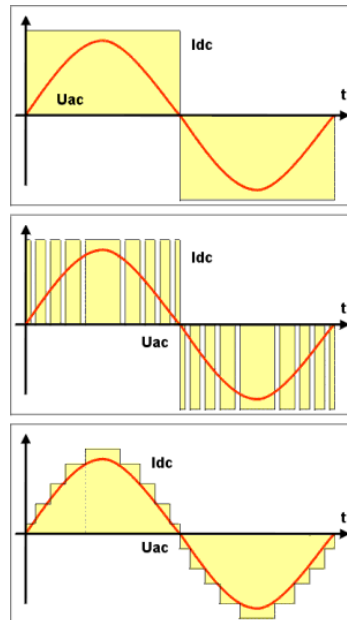


Figura 2.28 - Diferenças entre line-commutated, self commutated e cascade inverters

O terceiro tipo de inversor contempla uma situação em que se pretenda ter um pouco das duas situações referidas anteriormente. Consegue-se utilizando este tipo de inversores produzir para a rede eléctrica e aquando de uma anomalia na rede, o sistema continua a produzir energia para alimentação interna. Por exemplo numa habitação, quando existe uma falha de abastecimento de energia da rede o sistema fotovoltaico instalado no telhado pode colmatar essa deficiência e alimentar internamente essa habitação. Mas para isso é também necessário, um conjunto de baterias para se conseguirem colmatar os períodos nocturnos. Estes inversores têm internamente um sistema de regulação de carga das baterias e como tal são directamente ligados a estas. Convém salientar que estes inversores não têm a capacidade de funcionarem sozinhos e não permitem por si só o funcionamento do sistema simultaneamente em regime isolado e ligado à rede de distribuição local. Daí que seja necessário um inversor Tie-Grid para realizar a ligação à rede eléctrica e simultaneamente um dispositivo que detecte uma ausência de alimentação por parte da rede e consiga realizar a comutação para um regime de funcionamento isolado. Desta forma o inversor Tie-Grid é ligado directamente aos painéis fotovoltaicos, na parte DC e a parte AC é ligada directamente ao dispositivo de comutação automático. O princípio de ligação de um sistema deste género pode ser analisado na figura seguinte, onde 1, representa o inversor Tie-grid, 2, representa o dispositivo de comutação automático e 3, representa o inversor de backup.

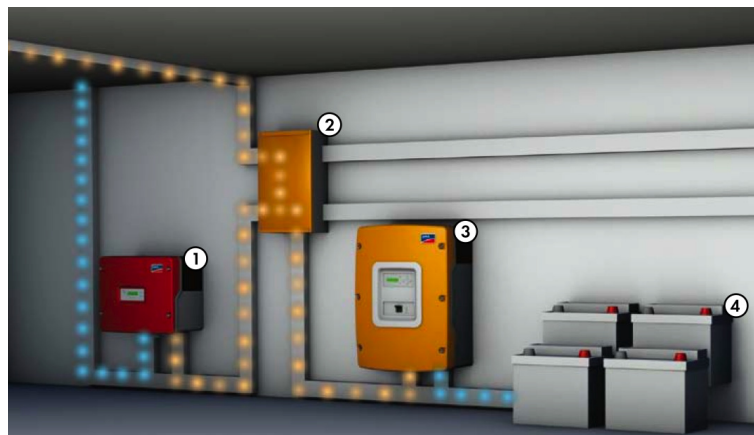


Figura 2.29 - Design de ligação de um inversor de backup [27]

O sistema de inversores pretendido para este projecto é analisado posteriormente no capítulo 3, na medida em que é necessária uma melhor explicação do ambiente de aplicação dos inversores, nomeadamente no seio de uma lógica de micro-rede.

Capítulo 3

3 MicroGrids

3.1 Introdução

Desafios evolucionários na regulação e operação das redes de transporte e distribuição convencionais e simultaneamente a emergência de pequenos sistemas de produção de energia e das tecnologias a estas associadas abriram novas oportunidades para a produção local de electricidade. Tanto por parte de soluções inovadoras implementadas e geridas no terreno por determinadas empresas como também pelos consumidores finais que podem neste momento, eles próprios produzir a sua energia ou até mesmo vendê-la à rede eléctrica já estabelecida. Neste contexto a utilização de recursos energéticos dispersos geograficamente (DER - Distributed Energy Resources) emergiram como uma opção promissora para colmatar as necessidades energéticas dos consumidores no que diz respeito à fiabilidade e qualidade de aprovisionamento energético.

Foi então que surgiu o conceito de microgrid, uma forma expedita de agregar as tecnologias existentes de produção dispersa de energia e integrá-las no que se pode denominar de uma rede estruturada e controlada. O objectivo primordial é encontrar, por um lado, uma solução para os sistemas que inevitavelmente terão de funcionar em regime isolado, e por outro, uma solução para integrar as energias intermitentes na rede eléctrica já existente, existindo um funcionamento cooperativo. Os desafios existentes para os dois tipos de funcionamento são elevados e serão descritos com maior detalhe posteriormente.

Encontram-se vários modelos de microgrids propostos, no entanto devido á sua facilidade de implementação e flexibilidade disponibilizada, foi analisada e considerada neste estudo a proposta da CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) [28].

3.2 CERTS Microgrid

A característica vital da micro-rede proposta pela CERTS é de facto funcionar como uma entidade auto-controlada única. Esta ideia está assente na utilização de electrónica de potência avançada que controla a interface entre as micro-fontes (elementos de produção de energia eléctrica como painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, células de combustível, turbinas a gás, etc...) e o sistema AC que as rodeia (cargas).

Este tipo de micro-rede permite um funcionamento em cooperação com a rede eléctrica, para casos onde a qualidade de serviço e a ininterruptibilidade de funcionamento são fundamentais e simultaneamente permite um funcionamento em regime isolado. O estudo realizado pela CERTS considera o funcionamento em regime isolado, aquando de uma falha do sistema eléctrico estabelecido. Sendo portanto restabelecido o funcionamento em cooperação, quando o defeito, ou a fraca qualidade de serviço da rede terminarem. No entanto para o caso em estudo neste trabalho, o pretendido é estudar a formação de micro-redes tanto para casos onde será realizado um acoplamento da micro-rede à rede de distribuição local, como para casos onde é incomportável a expansão de linhas de transporte/distribuição e como tal é inevitável o funcionamento em regime isolado. Portanto, todos os pormenores de funcionamento do sistema CERTS em regime isolado foram tidos em conta para o dimensionamento do caso em estudo, quando este é integrado num local onde apenas o funcionamento em regime isolado é possível.

O cenário em que a micro-rede está acoplada à rede de distribuição local, apenas trás vantagens para a exploração da rede de distribuição, nomeadamente, descongestionamento de linhas e redução no investimento em novas unidades de geração de energia e para o consumidor final, melhorando nomeadamente a capacidade de resposta às mudanças da carga e o suporte à tensão, devido à gestão local do funcionamento do sistema. O padrão de troca de energia entre a micro-rede e a rede de distribuição é determinado por restrições de natureza económica, prevalecendo a utilização da energia economicamente mais favorável.

3.2.1 Arquitectura da Microgrid

A micro-rede é considerada, a partir do ponto de acoplagem com a rede de distribuição, uma carga comum. Daí que possua uma arquitectura pensada para uma solução de fácil implementação e com um modelo de organização deveras simples, proporcionando desta forma, uma solução plug and play.

Neste exemplo ilustrativo são apresentados três ramos: O Ramo A, o Ramo B e o Ramo C. Convém salientar que se tentou neste exemplo ilustrativo explicar um conjunto de situações

diversas, reflectindo-se assim por um lado uma panóplia de possibilidades que convém serem estudadas e por outro a flexibilidade que este modelo organizacional pode proporcionar.

É de salientar que as cargas alimentadas pelo Ramo A e B, em termos de ininterruptibilidade de serviço, são bastante mais críticas que as alimentadas pelo Ramo C, na medida em que são cargas sensíveis e não cargas tradicionais.

Pode-se verificar que a rede é composta por um conjunto de micro-fontes. No caso concreto deste estudo as micro-fontes serão constituídas por um sistema fotovoltaico com a possibilidade de armazenamento de energia através de baterias electroquímicas de chumbo-ácido.

No entanto, o pormenor mais importante desta estrutura, que se destaca pelas suas funcionalidades de controlo e protecção, é de facto o conjunto controlador de micro-fontes + disjuntor. É esta disposição apresentada na figura que permite um controlo individualizado de cada micro-fonte e que evita a necessidade de investimento em sistemas de comunicação avançados, com tempos de resposta baixos. Cada controlador de tensão e potência próximo de cada micro-fonte fornece sinais de controlo para a fonte, regulando o trânsito de potência e a tensão de bus para os níveis prescritos pelo gestor de energia. Desta forma à medida que as cargas a jusante mudam, a potência da micro-fonte local é aumentada ou diminuída para manter o trânsito de potências total no nível despachado.

Para tal basta ao gestor de energia definir um conjunto de set points para a tensão e potência das micro-fontes.

Durante períodos onde persistam perturbações na rede de distribuição, os Ramos A e B podem isolar-se da rede através do dispositivo de separação, evitando que as cargas sensíveis sejam afectadas. Pode no entanto verificar-se o caso em que, apesar de existirem perturbações na rede, não faz sentido isolar a micro-rede. Nomeadamente se não existir potência suficiente das micro-fontes para alimentarem a totalidade das cargas sensíveis.

O Ramo C, apenas constituído por cargas tradicionais, terá uma prioridade de aprovisionamento obviamente menor que o Ramo A e B. Daí que em caso de perturbações na rede de distribuição este Ramo não seja isolado do defeito e se mantenha o mesmo regime de funcionamento que prevalecia anteriormente à perturbação.

Resumindo os componentes chave deste sistema são:

- 1 - Controladores de micro-fonte;
- 2 - Gestor de energia;
- 3 - Protecções;

As protecções constituem um enorme desafio aquando do funcionamento isolado das micro-redes, pormenor que será visto em detalhe, posteriormente neste trabalho.

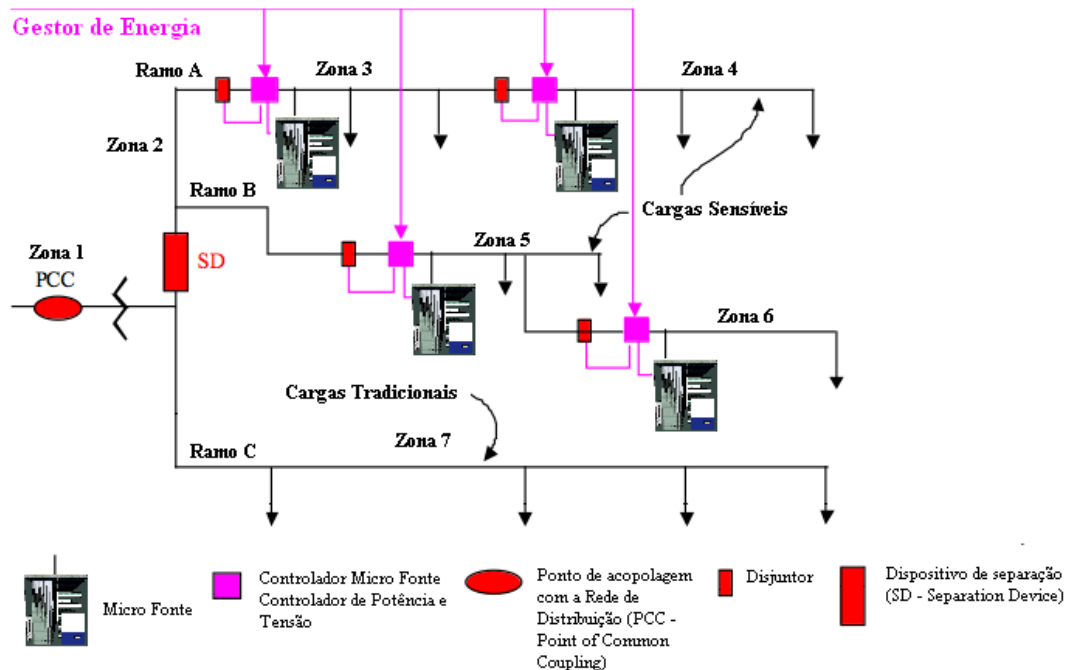


Figura 3.1 - Estrutura da Micro-Rede

3.2.2 Metodologias de controlo da Microgrid

Os controladores associados a cada micro-fonte têm de permitir que novas micro-fontes sejam ligadas à micro-rede sem que seja necessária a modificação da aparelhagem já existente, de forma que mantenham os níveis de flexibilidade desejados.

Têm que permitir uma rápida conexão ou desconexão da rede de distribuição, assim como um controlo independente dos valores da potência activa e reactiva, dos valores da tensão em cada micro-fonte e tem que permitir uma adaptação da potência fornecida pelas micro-fontes aos trânsitos de potência que serão impostos pelas cargas.

Não é necessário qualquer tipo de comunicação entre micro-fontes, cada controlador tem a capacidade de responder com eficiência a mudanças de carga sem necessitar de dados de outras fontes ou locais. Contudo convém salientar que existem outras opiniões que defendem que tem de existir um sistema de comunicações entre os controladores existentes no sistema. No entanto a arquitectura proposta para a micro-rede é também ela ligeiramente diferente. Nesse caso não existe um gestor de energia, mas em sua substituição existe um Controlador Central, que se encontra ligado em série com o ponto de acoplagem com a rede. A este controlador chama-se de Microgrid Central Controller (MGCC). Existem também controladores em cada microfonte, idênticos aos utilizados no modelo da CERTS e também controladores nas cargas (Load Controllers). Contudo é também afirmado que o sistema de comunicações

entre os controladores é uma preocupação ínfima, na medida em que apenas existe para permitir uma circulação de valores de set point comunicados pelo MGCC [29]. Concluindo-se portanto que este sistema de comunicações enunciado, representa no modelo da CERTS as linhas cor de rosa da figura 3.1, estando as duas opções enunciadas em sintonia.

Os controladores deverão proporcionar à micro-rede os seguintes tópicos:

- 1 - Requisitos de controlo e protecção para cada micro-fonte;
- 2 - Controlo de Tensão;
- 3 - Controlo do trânsito de potência;
- 4 - Distribuição ponderada das cargas pelas micro-fontes (despacho);
- 5 - Estabilidade;

Os controladores permitem de facto proporcionar à rede os tópicos acima referidos devido a um conjunto de medidas de controlo:

- 1 - Controlo de potência activa e reactiva independente;
- 2 - Controlo de tensão versus potência reactiva;
- 3 - Controlo de frequência versus potência activa (Partilha de carga em modo de funcionamento isolado);

O conjunto de controlos pode ser agregado num diagrama de blocos, que esclarece o princípio de funcionamento do controlador em geral.

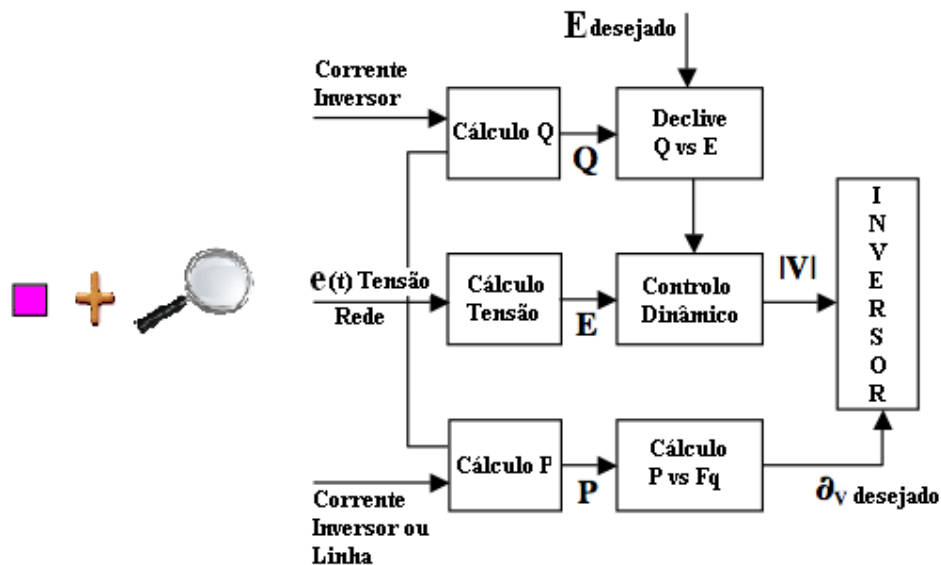


Figura 3.2 - Estrutura do controlador de micro-fonte

Os blocos à esquerda calculam os valores reais da potência reactiva, da potência activa e da tensão, respectivamente. No centro encontram-se os denominados droops, ou seja, inclinação entre potência reactiva e a tensão desejada e inclinação entre potência activa e frequência. São realizados em blocos separados.

O controlo gera os sinais desejados do módulo da tensão, assim como o seu ângulo, aos terminais do inversor. Um gerador de impulsos, composto por um pwm (pulse width modulator) é responsável pela injeção de impulsos onde é possível a regulação do valor médio da tensão para os valores indicados pelo controlo. O pulse width modulator é uma ferramenta bastante útil para se realizar a regulação do valor médio de um sinal. O princípio de funcionamento assenta na geração de uma onda triangular que será comparada com um sinal contínuo. Quando a onda triangular apresenta valores superiores ao sinal contínuo, então o impulso tem o valor lógico 1, quando a onda triangular apresenta valores inferiores ao sinal contínuo, o impulso tem o valor lógico 0 e assim sucessivamente.

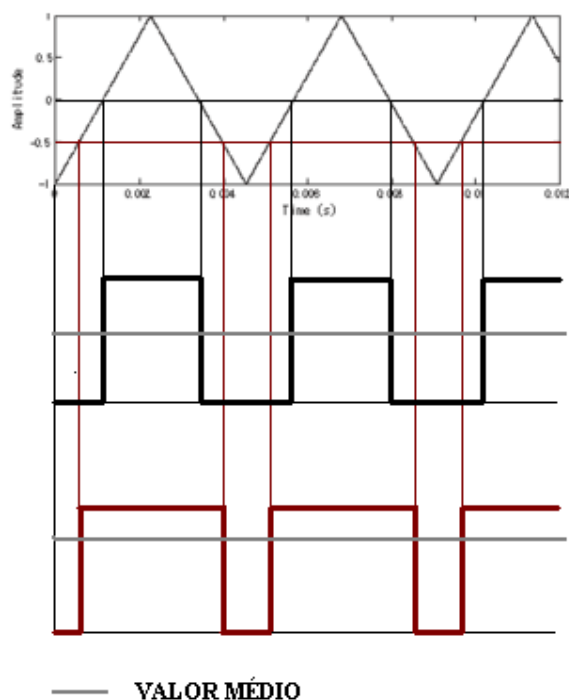


Figura 3.3 - Princípio de funcionamento de um pwm

Este sinal é enviado ao inversor, que colocará na saída, uma tensão igual à desejada.

É de salientar que a regulação da potência activa vai interferir no valor do ângulo da tensão e que a regulação da potência reactiva interferirá no valor do módulo da tensão através das seguintes expressões:

$$P = (3/2) * (VE / X) * \sin(\delta p), \quad (3.1)$$

$$Q = (3/2) * (V / X) * (V - E \cos(\delta p)), \quad (3.2)$$

$$\delta p = \delta V - \delta E, \quad (3.3)$$

Onde:

P - Potência activa gerada;

Q - Potência reactiva gerada;

δp - Ângulo formado entre a Tensão e a Tensão desejada;

3.2.2.1 Controlo de tensão versus potência reactiva

A integração, na micro-rede, de um número elevado de micro-fontes, não seria possível sem controlos básicos de potência activa e reactiva. A regulação da tensão é necessária para garantir fiabilidade e estabilidade locais. Sem nenhum controlo de tensão local as micro-fontes teriam oscilações de tensão e/ou de potência reactiva. O controlo de tensão permite também garantir que correntes de circulação entre micro-fontes sejam evitadas.

Esta problemática requer uma regulação de tensão versus potência reactiva, através de um controlador droop. O princípio de funcionamento do droop assenta na redução da tensão quando a corrente se torna mais capacitiva e no aumento da tensão quando esta se torna mais indutiva.

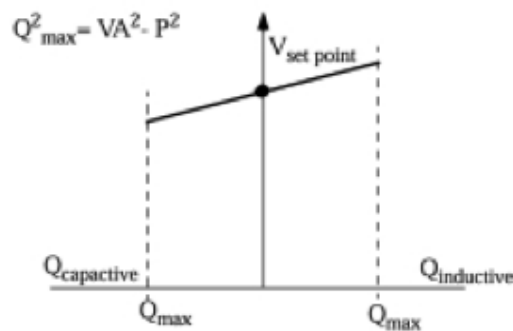


Figura 3.4 - Droop: Tensão vs potência reactiva

Onde na expressão explanada na figura acima representado, VA significa a potência aparente limite do inversor e P a potência limite do conjunto dos painéis fotovoltaicos.

3.2.2.2 Controlo de frequência versus potência activa

Quando o sistema está em modo de funcionamento isolado, um pormenor fulcral para o bom funcionamento do sistema é a existência de um valor de frequência o mais constante e estável possível. Esta regulação da frequência terá de ser realizada também ela individualmente em cada micro-fonte, para que todas as micro-fontes se consigam adaptar a novos pontos de funcionamento do sistema, ou seja, a novos regimes de cargas. Quando a micro-rede se encontra ligada à rede de distribuição, podem ocorrer dois cenários. Nesse momento a micro-rede está a importar energia da rede e como tal as cargas estão a receber simultaneamente corrente da rede e das micro-fontes da micro-rede. Ou então a micro-rede tem energia em excesso e está simultaneamente a alimentar as suas cargas e a exportar a energia excedente para a rede. Momentos imediatamente anteriores ao isolamento da micro-rede, da rede de distribuição, o ponto de funcionamento inicial, em termos de potência e frequência, é o mesmo. No entanto, no momento em que se dá o isolamento, o comportamento em termos de frequência e potência são diferentes consoante a micro-rede estivesse a importar energia da rede ou a exportar para a rede. O que acontece é que os ângulos das tensões alteram-se, provocando uma alteração da potência activa gerada e consequentemente da frequência de funcionamento local.

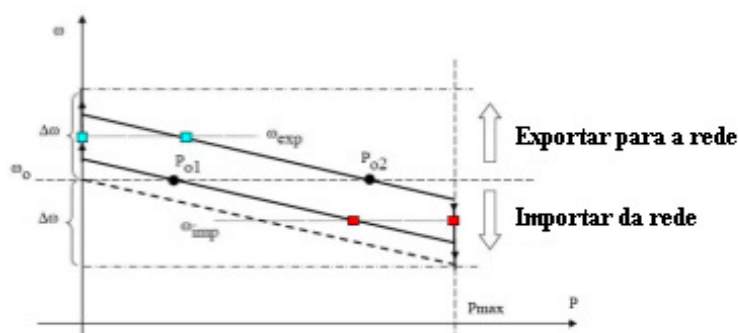


Figura 3.5 - Droop: Frequência vs potência activa [29]

Como podemos observar na figura acima representada, estão representadas duas micro-fontes, através dos seus pontos de funcionamento iniciais (P_{01}, w_0) e (P_{02}, w_0). Quando a micro-rede se isola da rede de distribuição e se encontrava previamente a importar energia da rede, o que se verifica é um aumento da potência gerada pelas micro-fontes e um conseqüente decréscimo da frequência de funcionamento. No entanto, no caso de as micro-fontes serem do mesmo tipo, ou seja, no caso de o preço de produção de cada Kwh de energia ser idêntico, não existe qualquer tipo de vantagem em atribuir o maior aumento de potência a uma determinada micro-fonte (despacho económico). No caso de a micro-rede se encontrar previamente a exportar energia para a rede, passa-se exactamente o inverso, existindo um decréscimo de potência, provocando um aumento da frequência. Sendo que a frequência não deverá exceder 1% de variação para um bom funcionamento do sistema, têm que ser delineados limites para a variação de frequência (Δw). O que se verifica é que para o novo valor de frequência, a micro-fonte 2 atingiria a sua potência máxima, no caso de prévia importação, o mesmo se passando para a micro-fonte 1 (atingindo-se o mínimo) para o caso prévio de exportação.

É necessário salientar que o cenário considerado na figura, corresponde a um regime de funcionamento permanente, existindo um declive fixo na zona de operação entre os limites de potência e um declive vertical quando estes limites são excedidos. Aquando de uma dinâmica de funcionamento ocorrerão desvios desta curva característica.

$$m = -\Delta\omega / P_{\max} , \quad (3.4)$$

$$\omega_i = \omega_0 - m(P_{0i} - P_i) , \quad (3.5)$$

Onde:

m = Declive segundo o qual o ponto de funcionamento do sistema varia;

$\Delta\omega$ = Variação da frequência;

$P_{\max}$ = Variação da potência desde zero até $P_{\max}$;

ω_i = Frequência para o ponto de funcionamento i ;

ω_0 = Frequência inicial;

P_{0i} = Potência inicial, para o ponto de funcionamento i ;

P_i = Potência correspondente ao ponto de funcionamento i ;

É necessário salientar que enquanto o sistema se encontrar em funcionamento cooperativo com a rede de distribuição local não existe uma necessidade de controlo do valor da frequência e da tensão na medida em que estes valores estão estipulados e são previamente regulados pelos alternadores síncronos presentes nas centrais de produção de

energia convencionais. No entanto quando o sistema funciona isoladamente é obrigatória a utilização de um sistema de controlo de frequência e de tensão para além do controlo PQ já referido anteriormente. Existem duas estratégias possíveis para realizar este controlo de frequência e de tensão. Pode-se utilizar um inversor principal que se encarregará de definir o sinal de referência para a tensão e frequência e que será o sinal que terá de ser seguido pelos restantes inversores presentes na micro-rede (Single Master Operation). A outra alternativa é utilizarem-se diversos inversores que definirão simultaneamente o mesmo sinal de referência para a tensão e para frequência (Multi Master Operation) [29].

3.2.2.3 Protecções da micro-rede

A problemática associada às protecções existe devido à forma como os disjuntores convencionais detectam os defeitos, nomeadamente sobrecargas ou curto-circuitos. Quando a micro-rede se encontra conectada à rede, esta tem a capacidade de contribuir para um determinado curto-circuito existente na micro-rede e como tal atingir-se-ão valores de corrente suficientes para que estas sejam detectadas como correntes de curto-circuito por parte do disjuntor e consequentemente ocorra a abertura do circuito defeituoso.

No entanto quando a micro-rede se encontra em regime isolado, a contribuição de corrente para o curto-circuito não existe da mesma forma e como tal existirá uma diferença bastante ténue entre correntes de curto-circuito e sobrecargas. Como tal utilizando-se aparelhagem de protecção convencional (normalmente disjuntores de classe C, disparam entre 5 e 10 vezes a corrente nominal), corre-se o risco de o defeito demorar bastante tempo a ser detectado como tal. Daí que talvez disjuntores da classe B (disparam entre 3 a 5 vezes a corrente nominal) possam resolver a situação.

3.3 Funcionamento dos inversores

Neste projecto pretende-se um sistema de inversores que permita por um lado gerar autonomamente um sinal de referência que todos os restantes inversores presentes na micro-rede terão obrigatoriamente de acompanhar e por outro, aquando de uma ligação da micro-rede à rede eléctrica local, onde é necessário que exista um inversor central, denominado de master, que permita reconhecer a onda do sinal da rede e o transmita aos restantes inversores presentes na micro-rede. Na estrutura definida por Peças Lopes et al. Este inversor encontra-se no interior do MGCC [29].

Não se tendo escolhido um modelo específico, não se sabe exactamente o preço do sistema de inversores. No entanto foi realizada uma análise de preços.

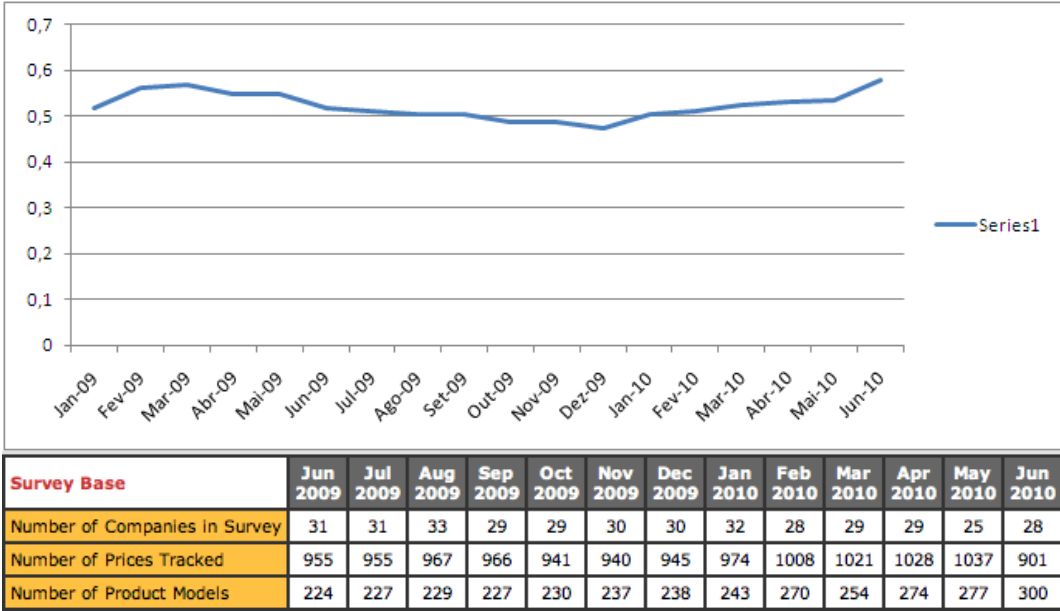


Figura 3.6 - Preço por W médio dos inversores presentes no mercado no último ano

Logo, tendo em conta que a potência em jogo para o(s) inversor(es) do sistema [20,40] KW, e considerando um preço de 600 € por KW, tem-se um custo em inversores [12000,24000] €.

Capítulo 4

4 Perfis de Consumo

4.1 Introdução

O objectivo primordial para o dimensionamento do sistema, é de facto, que exista a certeza de que o mesmo se adapte a condições distintas de funcionamento e simultaneamente garanta um nível óptimo de desempenho em cada uma dessas circunstâncias.

Para submeter o sistema a diferentes condições de funcionamento foi necessária a criação de cenários de consumo, os quais são comumente denominados de perfis de consumo.

Foram considerados três principais tipos de consumidores, designadamente, consumidores domésticos de classe alta (DCA), consumidores domésticos de classe média (DCM) e finalmente consumidores domésticos de classe baixa (DCB). A razão pela qual foram escolhidos os cenários acima referidos deve-se ao facto de se pretender testar o sistema para consumos onde o pico do diagrama de cargas se verifique por um lado durante o dia, por outro durante a noite e para casos onde a potência consumida esteja um pouco repartida durante as 24 horas que compõem o dia. O comportamento do sistema a nível de armazenamento de energia nas baterias será diferente para cada um dos cenários considerados, daí o interesse do seu estudo.

Convém também mencionar que para cada um dos cenários, foi realizada uma distinção entre dias de semana e fins-de-semana na medida em que, os comportamentos a nível de consumo são distintos. Para os consumidores domésticos em particular foi considerado que o seu comportamento habitual é idêntico para dias de semana e de fim-de-semana e como tal os consumos são ditos iguais.

4.2 Método de construção

Todos os cenários de consumo foram construídos com o intuito de os aproximar ao máximo daquilo que se verifica na realidade. Para os consumidores domésticos foram recolhidos dados acerca do consumo típico da maioria dos equipamentos que podem estar presentes numa habitação residencial, assim como a sua periodicidade média de funcionamento por dia [30].

Appliance	Power use (watts)	Ave hrs/day in use	Appliance	Power use (watts)	Ave hrs/day in use
Lighting			Refrigeration		
Incandescent bulb (40W)	40	5	Freezer (chest)	105	4
Incandescent bulb (60W)	60	5	Fridge with freezer	158	5
Incandescent bulb (100W)	100	5	Fridge – no freezer	250	2
CFL (12W)	12	5	Home maintenance		
CFL (18W)	18	5	Dishwasher	2 500	0,9
CFL (20W)	20	5	Vacuum cleaner	1 000	0,5
Security (120W)	120	0,3	Laundry		
Cooking			Iron	980	0,4
Coffee machine	670	0,5	Iron (steam)	1 235	0,8
Electric stove	3 000	2	Washing machine	3 000	0,75/load
Frying pan	1 250	0,4	Tumble dryer	3 300	0,5/load
Hotplate – large	2 400	0,3	Music, entertainment, home office equipment and other		
Hotplate – small	1 275	0,2	Burglar alarm	10	24
Kettle	1 900	0,3	Cell phone charger	9	2
Microwave oven	1 230	0,8	Compact disc player	9	0,4
Toaster	1 010	0,3	Computer	134	1,5
Snackwich	1 200	0,3	Cordless phone	2	15
Food processor	166	0,2	Fax machine	45	13,6
Geyser			Hair drier	647	0,1
Geyser (electric)	2600	4,4	Radio	12	3
Geyser (solar with electric backup)	2600	1,7	M-Net decoder	28	12,1

Figura 4.1 - Consumos típicos dos diferentes equipamentos eléctricos residenciais e periodicidade diária de utilização

Os dados recolhidos dizem respeito a África do Sul, nomeadamente à cidade do Cabo, na medida em que o continente alvo para a implementação deste projecto é o continente Africano e a facilidade de obtenção dos dados para a África do Sul foi bastante superior.

Para complementar esta informação sentiu-se a necessidade de conhecer o período durante o dia em que os equipamentos eléctricos estão normalmente ligados, não era suficiente conhecer apenas o número de horas diárias em que os equipamentos se encontravam a funcionar.

A recolha destes dados para o continente Africano não foi realizada na medida em que não foi encontrada qualquer informação, no entanto foram utilizados dados portugueses, ligeiramente alterados para a realidade Africana [31].

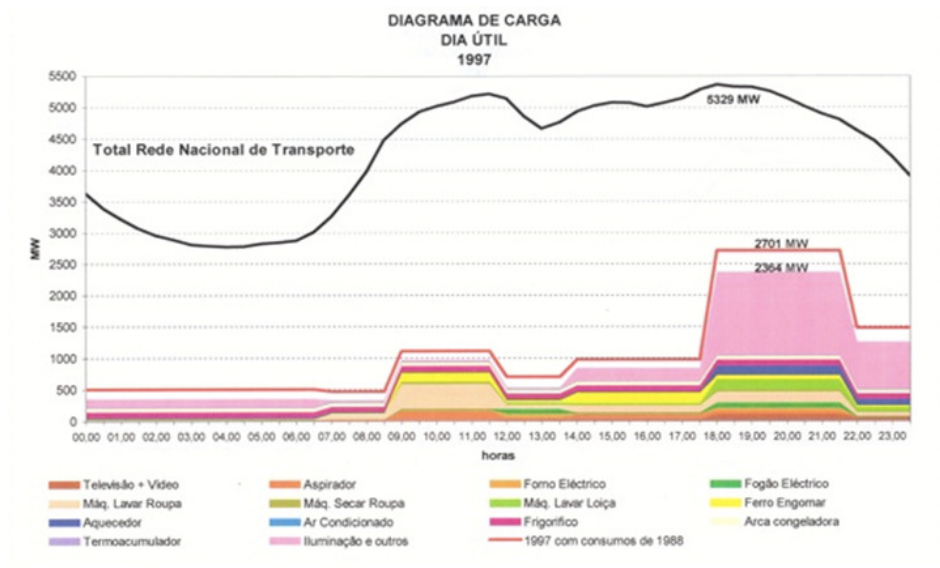


Figura 4.2 - Diagrama de carga diário do consumo dos diferentes equipamentos eléctricos residenciais

Contudo, apenas com esta informação não seria possível construir um diagrama de cargas horário compatível com a realidade. Cada habitação teria o mesmo comportamento a nível de consumos o que não se enquadra de todo com o que se verifica na prática. Para colmatar esta deficiência recorreu-se a uma metodologia que permitiu diferenciar o consumo de determinados consumidores, isto é, apesar de o comportamento a nível de consumos ser bastante idêntico na maioria das residências, o que não é verdade é que o momento em que são ligados os aparelhos seja o mesmo. A residência A começa a preparar o jantar às 20 horas, mas a residência B apenas o faz às 20:30. Daí que tenha sido utilizado um diagrama de cargas diário, o qual se considerou como o com maior probabilidade de acontecer e se tenha recorrido a uma translação deste mesmo diagrama de cargas em intervalos de 15 minutos e onde para cada 15 minutos foi atribuída uma determinada probabilidade desse diagrama de cargas se verificar. Estas probabilidades não foram consideradas aleatoriamente, tendo-se portanto recorrido a uma função de distribuição de probabilidades normal ou de Gauss.

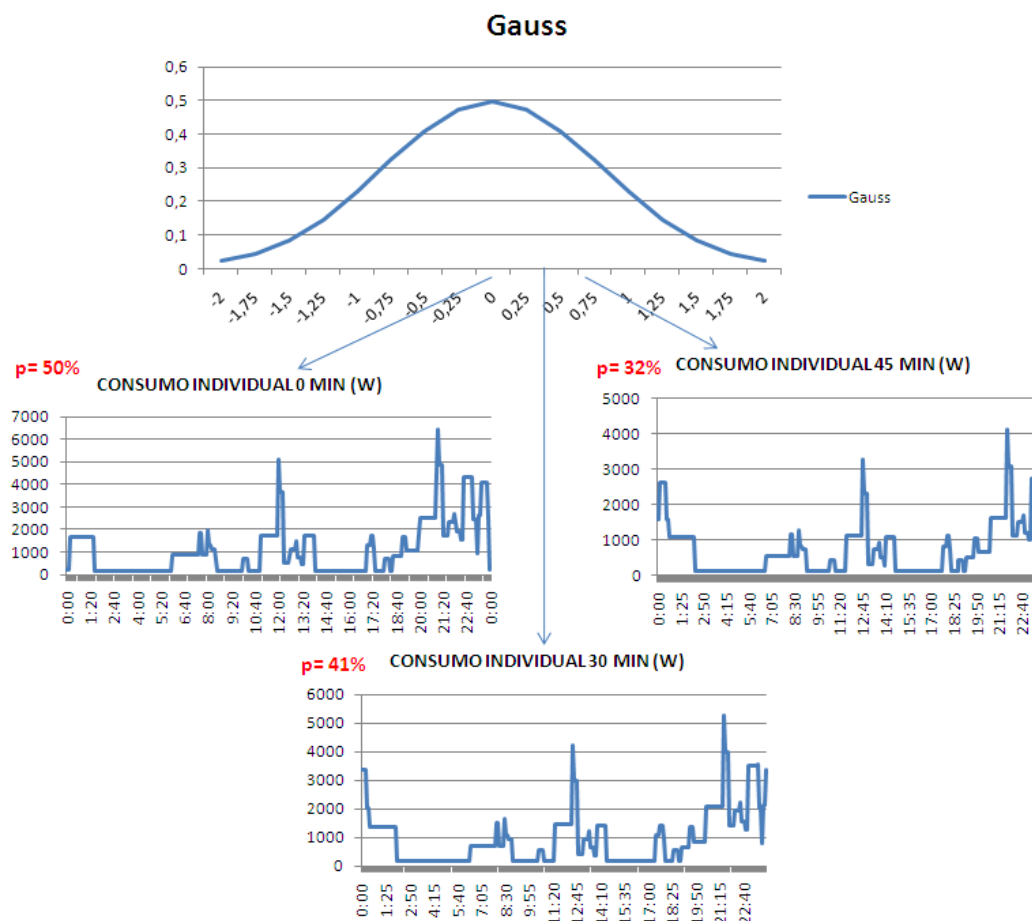


Figura 4.3 - Distribuição de probabilidades normal ou de Gauss, com média zero e desvio padrão 0,8 e respectivos consumos individuais de 15 em 15 minutos afectados das respectivas probabilidades de acontecimento

De forma que sejam mais compreensíveis os cenários considerados, para as diferentes classes sociais são apresentadas as suas características, ou seja, os tipos de equipamentos considerados para cada uma destas e as suas respectivas quantidades. Todos os resultados são apresentados no anexo A.

É de salientar que os diagramas foram originalmente construídos para intervalos de 15 minutos na medida em que a periodicidade diária de alguns equipamentos eram desta ordem de grandeza. No final são considerados diagramas de carga horários, já que é desta forma que o software Homer Energy admite os dados de entrada. Com esta redução da escala temporal tem-se a desvantagem de existir perda de informação, que foi aglomerada recorrendo-se à média verificada nessa hora.

4.3 Anexo do Capítulo 4

Tabela 4.1 - Equipamentos existentes para cada classe social

	DCA	DCM	DCB
Aplicação	Quantidade CA	Quantidade CM	Quantidade CB
Iluminação			
Lâmpada incandescente (40W)	9	5	4
Lâmpada incandescente (60W)	9	5	2
Lâmpada incandescente (100W)	10	5	1
Lâmpada fluorescente (36 W)	4	2	0
Equipamentos cozinha			
Máquina de café	1	1	0
Forno eléctrico	1	0	0
Disco de fogão - Grande	1	1	0
Disco de fogão - Pequeno	3	2	1
Micro-ondas	1	1	0
Torradeira	1	1	0
Cháleira	1	0	0
Refrigeração			
Arca Congeladora	1	0	0
Frigirífico com congelador	1	1	0
Frigorífico sem congelador	0	0	1
Manutenção da casa			
Máquina de lavar loiça	1	1	0
Aspirador	1	1	0
Roupa			
Ferro de engomar	0	1	0
Ferro de engomar a vapor	1	0	0
Máquina de lavar Roupa	1	1	0
Máquina de Secar	1	0	0
Música, entretenimento, equipamento de escritório e outros			
Carregador de telemóvel	1	1	0
Leitor de música compacto	1	1	0
Computador	1	1	0
Fax	1	0	0
Alarme contra assaltos	1	0	0
Secador de cabelo	3	1	0
Radio	3	2	1
Telefone sem fios	3	1	0
Televisão + dvd	3	1	0
Aquecimento	2	1	0
Ar condicionado	2	0	0

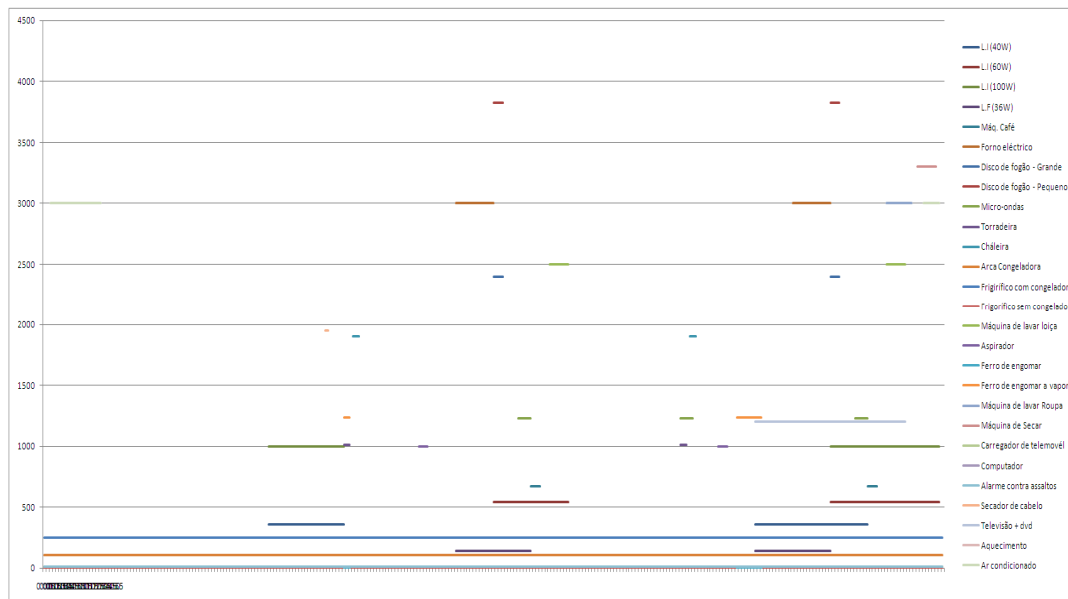


Figura 4.4 - Equipamentos e período de ligação

De forma que seja mais perceptível o método de construção dos perfis, apresentam-se de seguida todos os consumos individualizados realizados não em intervalos de 1 hora, mas em intervalos de 15 min. É de salientar que os resultados apresentados dizem respeito apenas aos consumidores de classe alta, na medida em que o método realizado para os consumidores das restantes classes sociais é exactamente igual:

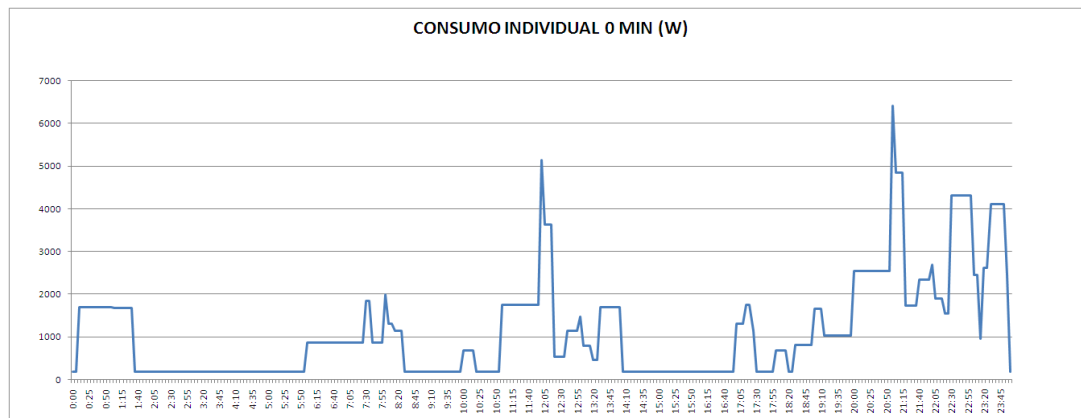


Figura 4.5 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta base, zero minutos

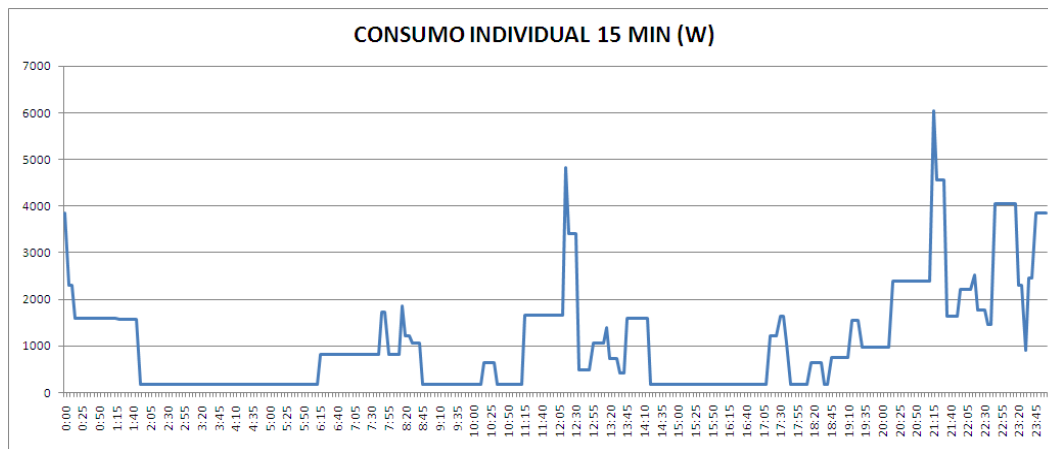


Figura 4.6 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, quinze minutos após o diagrama de carga diário base

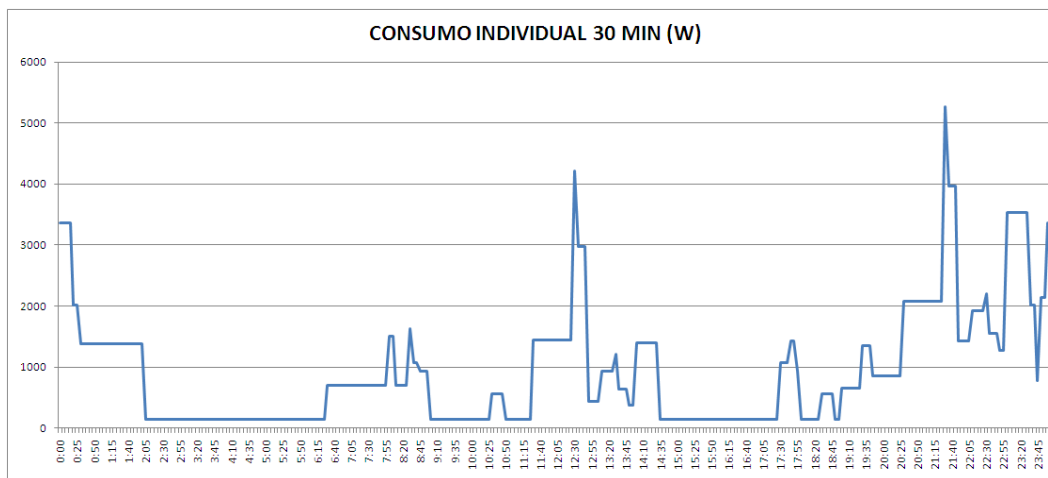


Figura 4.7 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, trinta minutos após o diagrama de carga diário base

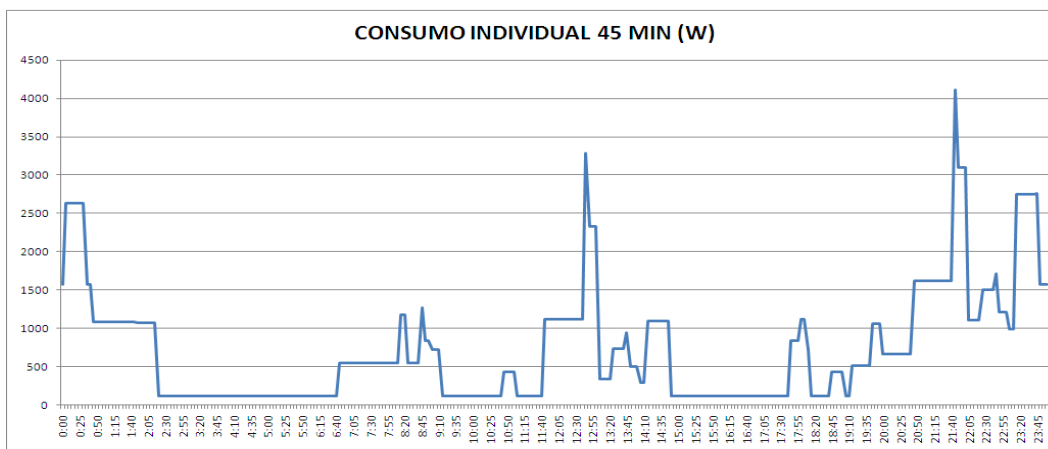


Figura 4.8 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, quarenta e cinco minutos após o diagrama de carga diário base

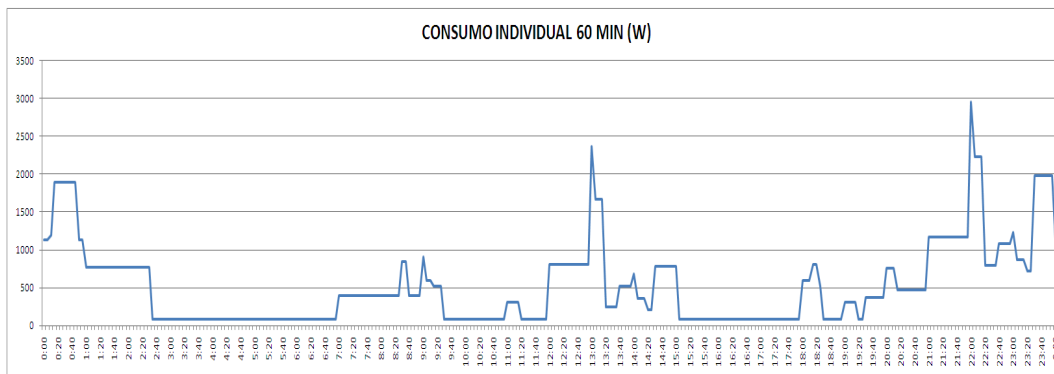


Figura 4.9 - Diagrama de carga diário individual para consumidores de classe alta, uma hora após o diagrama de carga diário base

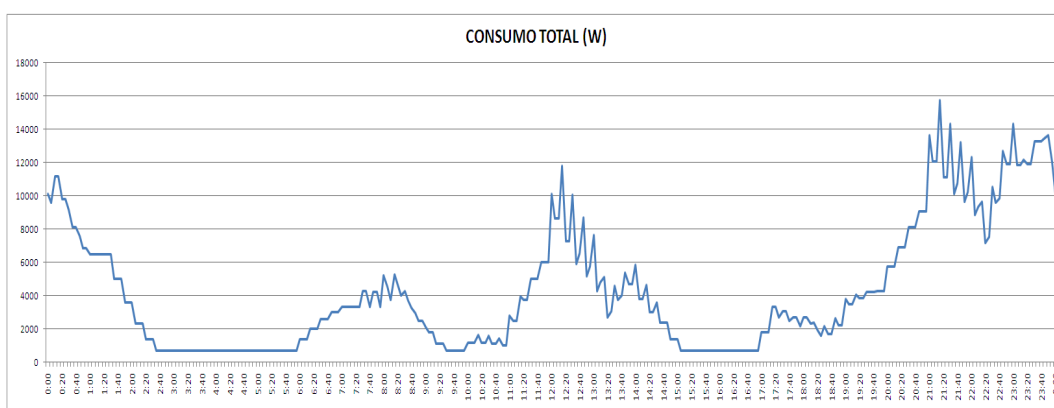


Figura 4.10 - Diagrama de carga diário total, adição dos diagramas acima representados

Tendo-se obtido os seguintes resultados:

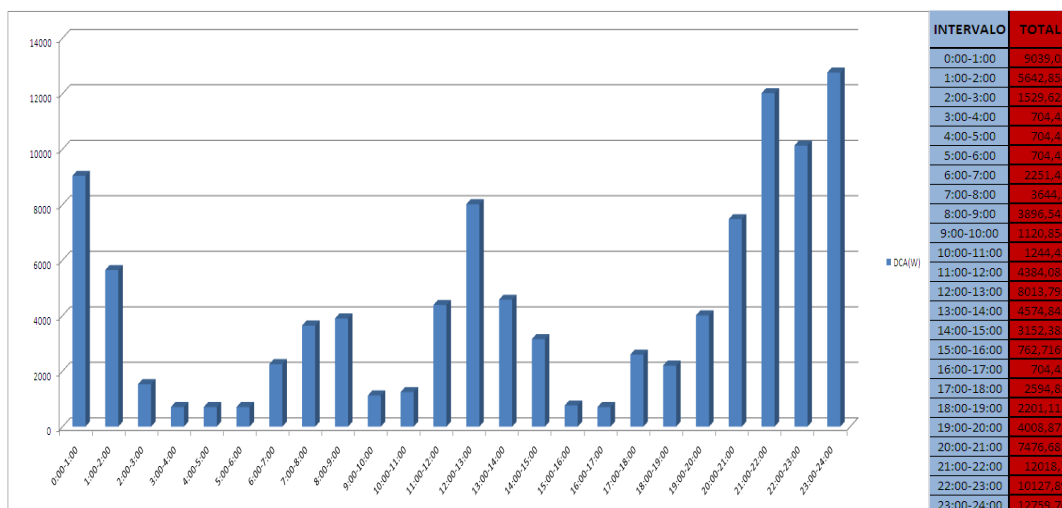


Figura 4.11 - Diagrama de carga diário para consumidores de classe alta

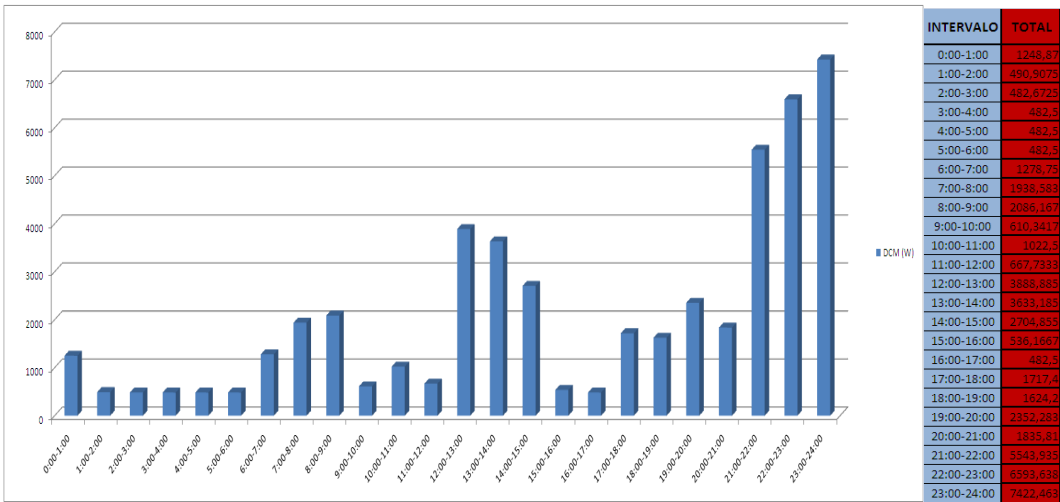


Figura 4.12 - Diagrama de carga diário para consumidores domésticos de classe média

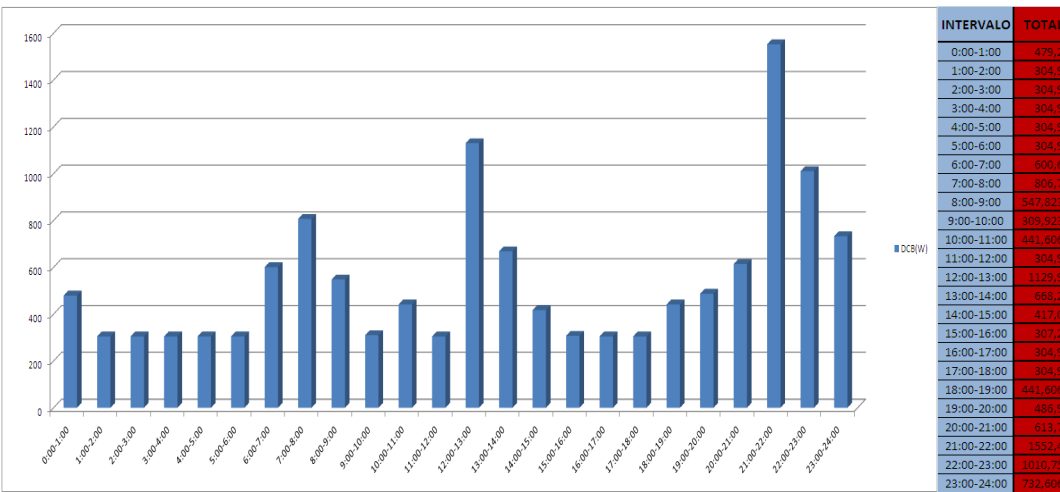


Figura 4.13 - Diagrama de carga diário para consumidores domésticos de classe baixa

Capítulo 5

5 Dimensionamento do sistema

5.1 Introdução

O pretendido com este trabalho é encontrar uma solução fotovoltaica, principalmente para integração no continente africano de forma a suprimir a escassez energética existente em locais isolados. A solução desenhada passa pela utilização de um contentor de transporte e transforma-lo num sistema produtor facilmente transportável, com elevada facilidade de instalação no local de destino e sem esforços incómodos a nível de manutenção. Pretende-se com este estudo, atingir uma solução que esteja otimizada a nível tecnológico para o propósito referido, que garanta uma autonomia de serviço, aquando de falha do sistema produtor, ou para suprimir os períodos nocturnos, também ela o mais elevada possível, que garanta níveis de fiabilidade que compense a sua instalações em locais não isolados onde a fiabilidade da rede não é satisfatória e finalmente que garanta um bom valor para o tempo de vida do sistema.

As dificuldades associadas ao seu dimensionamento são o de cumprir as limitações de espaço proporcionadas pelas dimensões do contentor e simultaneamente garantir uma maximização da potência fotovoltaica instalada, garantir uma capacidade de armazenamento adequada à potência fotovoltaica considerada e garantir um bom funcionamento do sistema aquando da sua integração num regime de micro-rede.

O público alvo deste sistema são de facto os consumidores domésticos, daí que no capítulo anterior se tenham definido os perfis de consumo para este tipo de consumidores.

Toda a simulação do sistema, que permitiu atingir os valores para o seu dimensionamento final, foi efectuada no software Homer Energy. Foi portanto uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento deste projecto, podendo-se facilmente desenhar o sistema pretendido e estipular os dados concretos para as baterias a utilizar, a quantidade de

potência fotovoltaica que o sistema possui, as potências de inversores que se deseja considerar...etc.

Todos os resultados apurados através do software Homer Energy são apresentados posteriormente neste trabalho.

5.2 Contentor e disposição dos componentes do sistema no seu interior

O objectivo da utilização de um contentor de transporte para integrar todos os componentes constituintes do sistema é realmente aproveitar uma metodologia de transporte implementada no mercado à bastante tempo, já com regras de utilização implementadas e bem definidas que possa simultaneamente transportar e alojar todo o sistema fotovoltaico desenvolvido. Teve-se sempre em mente uma solução que pudesse ser facilmente produzida e montada em território europeu, na medida em que existem todas as condições para se poder desenvolver um projecto como este e depois transportada, praticamente já montada, para o continente africano. No entanto a solução não pode ser entregue ao cliente totalmente montada e operacional, na medida em que é necessária a instalação dos painéis fotovoltaicos no local de destino e sua consequente ligação. Daí que faça todo o sentido aproveitar um mecanismo de transporte que possa simultaneamente desempenhar uma função de habitáculo para os componentes do sistema.

O contentor contemplado neste estudo denomina-se de “dry box”. Trata-se de um recipiente de metal, de grandes dimensões, destinado ao acondicionamento e transporte de carga em navios, comboios, camiões...etc. É uma forma de transporte bastante segura na medida em que é dotado de dispositivos de segurança previsto por legislações internacionais. A ideia de conceber um método de transporte que conseguisse acomodar no seu interior os produtos que se pretendiam transportar, nasceu em 1937 e foi desenvolvida pelo americano Malcom MC Lean. A primeira viagem internacional foi concretizada a 5 de Maio de 1966 em Roterdão, Holanda e desde então que se afirmou como a técnica de transporte preferencial.

É um tipo de contentor utilizado para transportar cargas secas, equipado com duas portas ventiladas, uma em cada extremidade e nalguns casos equipada com um sistema de ventilação eléctrico se a carga assim o exigir. Particularmente, no caso em estudo um sistema de ventilação eléctrico pode ser integrado, permitindo uma temperatura de funcionamento das baterias mais baixa (tem de se ter em consideração que são atingidas temperaturas na ordem dos 40°C no continente Africano). Neste caso os ventiladores são equipados com deflectores que evitam a penetração de sólidos e líquidos no interior do contentor.

73 Contentor e disposição dos componentes do sistema no seu interior

As dimensões estabelecidas para um contentor do tipo “dry box” são: 6,058 metros de comprimento, 2,438 metros de largura e 2,591 metros de altura e 5,900 metros de comprimento, 2,352 metros de largura e 2,395 metros de altura ($\text{Volume} = 5,900 \times 2,352 \times 2,395 = 33,23 \text{ m}^3$), para as medidas exteriores e interiores, respectivamente. Relativamente ao peso do contentor, este apresenta o valor de 30 toneladas.

Foram pensadas duas arquitecturas diferentes para a disposição dos componentes do sistema no interior do contentor. Inicialmente pensou-se em colocar uma prateleira horizontal que dividisse o contentor em duas metades iguais. Na parte superior colocar-se-iam os painéis fotovoltaicos, de forma que todo o volume fosse preenchido e na parte inferior seriam colocadas as baterias, o inversor e os elementos de controlo para integração do contentor numa micro-rede. No entanto existiam vários problemas associados a este design. Primeiro a prateleira horizontal teria de ser bastante resistente para suportar todo o peso dos painéis, fazendo com que o peso final do contentor aumentasse substancialmente. Outro problema seria a dificuldade de acesso, por parte das pessoas, às baterias. Apesar de o sistema não necessitar de manutenção bastante regular, na eventualidade da ocorrência de um defeito no circuito das baterias é necessário que estas estejam acessíveis.

Então pensou-se numa alternativa que utiliza uma divisão vertical virtual, que divide verticalmente a meio o contentor. Numa das metades são colocadas as baterias numa disposição que garante o seu fácil acesso. A disposição das baterias será de tal forma que seja possível criar um espaço intermédio que permita colocar facilmente uma ferramenta de aperto de parafusos, um busca-pólos...etc. É também possível manejar com relativa facilidade os cabos/barramentos de ligação, na eventualidade de existir essa necessidade.

No entanto dependendo do tipo de bateria a utilizar a disposição das mesmas será distinta de forma a se conseguir otimizar o espaço preenchido e a garantir o espaço de acesso referido anteriormente.

Falar-se-á então mais detalhadamente da disposição das baterias, no subcapítulo 5.4 “Bateria escolhida”.

Na outra metade são colocados os painéis verticalmente aproveitando toda a altura do contentor, maximizando assim a potência fotovoltaica do sistema. Aquando da chegada do contentor ao destino, procede-se ao retirar dos painéis do seu interior, criando-se simultaneamente um espaço de circulação para as pessoas, que permitirá também ele um fácil acesso às baterias, ao inversor e aos elementos de controlo de tensão e frequência necessários para a integração do contentor numa micro-rede.

Tabela 5.1 - Dimensões do contentor

Tipo de contentor	Dimensões internas			Peso(Kg)	Volume(m3)
	Largura(mm)	Comprimento(mm)	Altura(mm)		
Dry Box	2.352	5.900	2.395	30000	33,234936

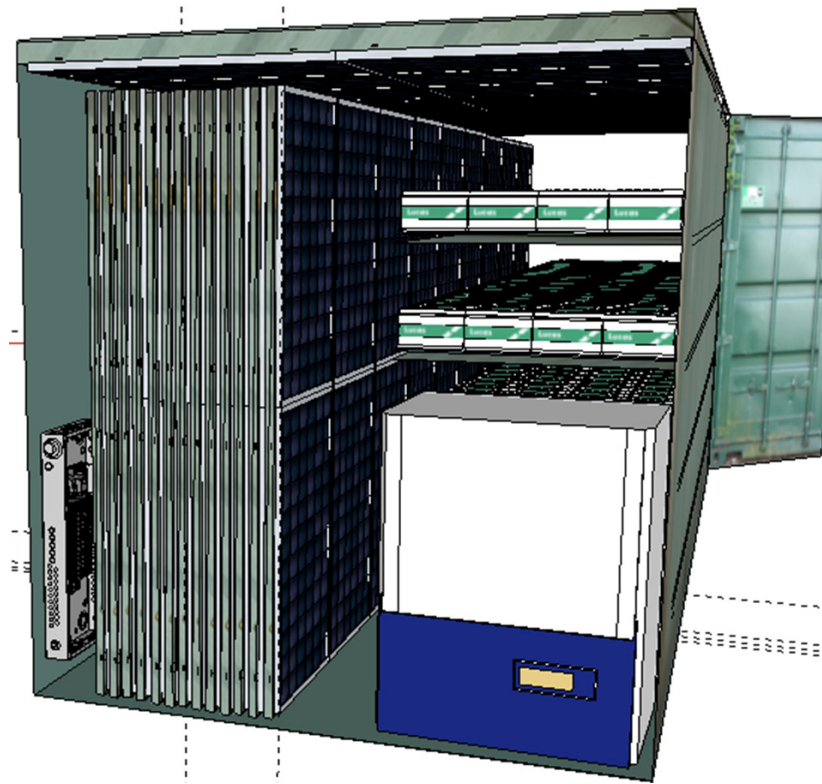


Figura 5.1 - Organização dos componentes no interior do contentor

Tendo em conta a disposição indicada na figura, tem-se aproximadamente metade do volume interno do contentor para os painéis e metade para a instalação de baterias, inversor e elementos de controlo. Ou seja para cada um deles tem-se um volume disponível de ($\text{Volume} = (5,900 \times 2,352 \times 2,395) / 2 = 16.615 \text{ m}^3$).

Convém referir que os painéis fotovoltaicos não são colocados individualmente no interior do contentor. Foram considerados painéis de suporte para a sua colocação. Os painéis de suporte têm as seguintes medidas, 5,700 metros de comprimento, 2,195 metros de largura e 6 centímetros de espessura, que com os quatro cm de espessura dos painéis fotovoltaicos perfaz um total de 10 cm. Logo o volume ocupado por cada painel é de ($\text{Volume} = 5,700 \times 2,195 \times 0,1 = 1,25 \text{ m}^3$). Desta forma o número máximo de painéis que se consegue colocar em metade do contentor é de aproximadamente treze. No entanto apenas uma folga de vinte centímetros no comprimento e na largura do painel não é considerada suficiente e como tal, considerar-se-ão para este estudo onze painéis.

A consideração dos painéis de suporte prevê garantir uma maior comodidade de instalação no local. Tendo em conta que os componentes são previamente instalados no contentor, isto é, numa fase anterior ao transporte, e que todo o sistema está já

dimensionado antes da saída de fábrica, os painéis podem desde logo ser ligados, tendo em conta o número de strings que são necessárias ligar em paralelo e o número de painéis que constituem cada string. Estando as ligações adaptadas ao tipo de inversor também ele dimensionado. Desta forma é apenas necessário retirar os painéis de suporte já com os painéis fotovoltaicos instalados e ligados entre si e colocá-los em maciços de betão. Para clarificar o método de colocação nos maciços, podem-se examinar as figuras do Anexo A.

Tabela 5.2 - Dimensões dos painéis de suporte dos painéis fotovoltaicos

Largura(mm)	Comprimento(mm)	Espessura(mm)	Volume(m3)	Peso(kg)
2.195	5.700	60	0,75069	1951,794

Convém salientar que foram considerados painéis de alumínio, na medida em que o alumínio consegue proporcionar um peso do painel inferior à maioria dos restantes metais. O peso do alumínio está compreendido entre 2500 e 2700 Kg/ m³, daí que se tenha considerado neste estudo um valor de 2600 Kg/ m³.

Cada painel fotovoltaico ocupará aproximadamente 0.7 m², ou seja, as características de cada painel serão as seguintes: 1,2 metros de comprimento, 60 centímetros de largura e 4 centímetros de espessura. Logo em cada painel considerado, conseguem-se instalar 18 painéis fotovoltaicos ($\text{Número_painéis_PV} = \text{Área_painel} / \text{Área_painel_PV} = 12,5115 / 0,7 = 18$).

Considerando um painel com uma potência de 225 W, no total conseguir-se-iam acomodar no contentor 198 painéis fotovoltaicos, perfazendo uma potência total de aproximadamente 44,55 KW.

Tabela 5.3 - Dados da componente fotovoltaica presente no contentor

Grandezas	Valores	Unidades
Número de Paineis	11	
Área de cada painel	12,5115	m2
Área de cada painel FV	0,7	m2
Número de paineis FV / painel	18	
Nº Total de paineis FV	198	
Área total de paineis	137,6265	m2
Potência de cada painel	225	W
Potência Total	44550	W

5.3 Dados base da simulação no Homer Energy

Como já foi referido, o software que permitiu a simulação do comportamento do sistema, a nível técnico e a nível económico, foi o Homer Energy [32]

Para que o algoritmo consiga chegar a resultados satisfatórios tem que se modelizar o sistema o mais próximo possível da realidade, entrando em linha de conta com as condições envolventes ao local de instalação e com as restrições que possam existir para o seu funcionamento. Por outro lado também se pretende realizar uma análise económica que permita auxiliar uma decisão entre diferentes tipos de componentes a utilizar. Estando portanto adjacente a inserção de parâmetros económicos, como o tempo de análise do projecto e a taxa de juro anual efectiva.

Sendo que o local alvo, de implementação deste projecto é o continente Africano, utilizaram-se os dados pré-definidos pelo software, para um meridiano correspondente à África central, com uma latitude de 30°33' Sul e uma longitude de 22°56' Este, correspondente à África do Sul. O software realiza uma pesquisa online actualizada do nível de irradiação para qualquer local do planeta [33]. A partir dos valores de irradiação o software consegue calcular o índice de clareza, ou seja, mede a quantidade de irradiação que atinge directamente a atmosfera, que consegue de facto passar e atingir a superfície da terra.

O índice de clareza é dado pela seguinte expressão:

$$K_T = \frac{H_{\text{médio}}}{H_{e,\text{médio}}}, \quad (5.1)$$

Onde:

K_T = índice de claridade [0,1];

$H_{\text{médio}}$ = Irradiação por metro quadrado, por dia média na superfície terrestre (KWh/m²/dia);

$H_{e,\text{médio}}$ = Irradiação por metro quadrado, por dia média, verificada numa superfície horizontal situada no topo da atmosfera (KWh/m²/dia), designada por Irradiação extraterrestre horizontal;

Ou seja para valores na ordem dos 0,25, verificam-se meses bastante nublados, enquanto que para valores próximos de 1 se verificam meses solarengos com ausência de nuvens.

No entanto torna-se necessário calcular o $H_{e,\text{médio}}$, através de expressões que entram em linha de conta com a intensidade da irradiação solar no topo da atmosfera, com o ângulo de zenith e com a declinação solar. As expressões não são aqui explanadas já que saem fora do contexto deste estudo, sendo portanto apenas referidas com o intuito de explicar de onde provem o índice de claridade.

Verifica-se então uma irradiação e índice de clareza médios de 6,325 e 0.718, respectivamente.

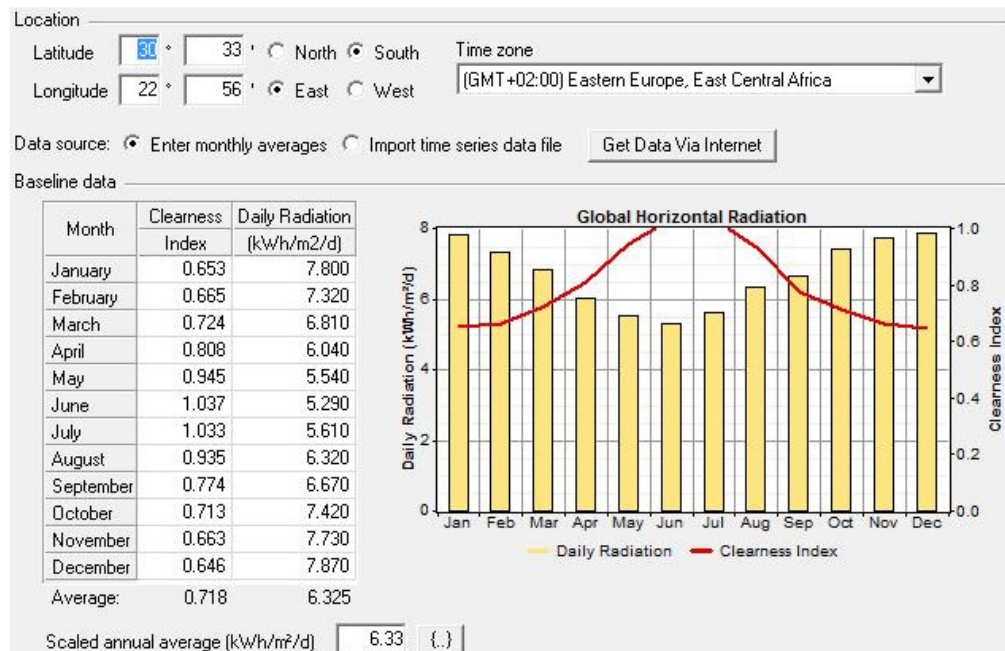


Figura 5.2 - Recursos solares considerados para o dimensionamento do sistema

Outra condicionante que afecta seriamente a performance do sistema e que como tal tem de ser considerada é a temperatura. É necessário especificar a temperatura média de cada mês para todos os meses do ano. A variação mensal da temperatura pode ser analisada no gráfico abaixo representado, onde é especificada a temperatura máxima, mínima e média verificada durante o ano.

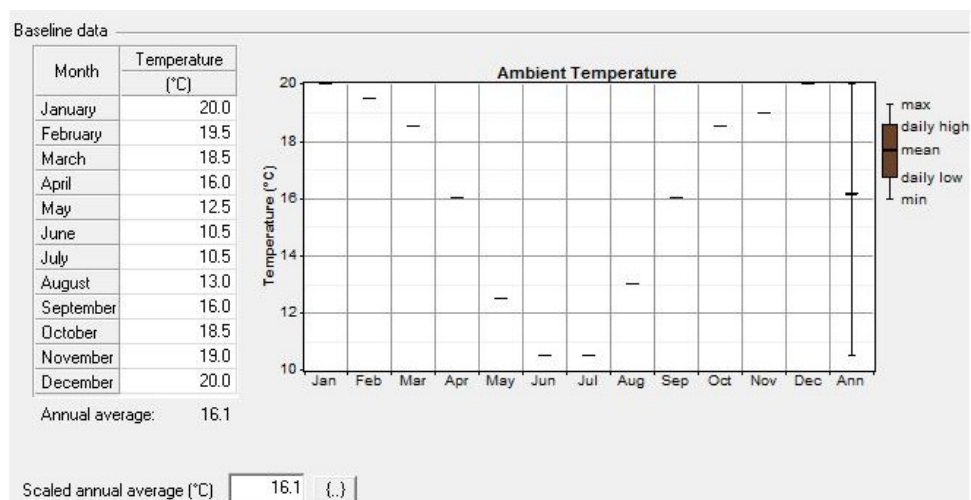


Figura 5.3 - Temperaturas medias mensais verificadas para o local de implementação

Tendo este projecto sido pensado principalmente para instalação em locais isolados e como tal para um funcionamento em regime isolado, não se podem ter inicialmente expectativas de 0% de ininterruptibilidade de serviço. No entanto é também previsto que o sistema funcione em cooperação com a rede eléctrica de distribuição local para casos onde a rede não consegue fornecer elevados índices de fiabilidade, e como tal torna-se necessário considerar uma capacity shortage (%) para o sistema, semelhante à da rede de distribuição local existente, para que faça todo o sentido para o cliente, optar pela solução projectada.

Foi então realizada uma pesquisa, na empresa de transporte e distribuição de energia na África do Sul, nomeadamente na ESKOM [34], onde se verifica uma inacessibilidade à energia eléctrica de 15% anuais (Energy availability factor). Para o nosso sistema foi considerada uma capacity shortage (interruptibilidade de serviço total anual sobre a carga total anual a alimentar) de 20 %, ligeiramente superior, na medida em que para valores mais baixos se verificavam índices de excesso de energia global do sistema (%) elevados.

Por fim foi realizada uma análise económica do sistema, considerando um período de funcionamento de 25 anos e também uma taxa de juro efectiva anual de 6 % (não tendo qualquer tipo de referência para as taxas de juro praticadas, foi utilizado o valor de base pré-definido pelo software).

Annual real interest rate (%)	6
Project lifetime (years)	25
System fixed capital cost (\$)	0
System fixed O&M cost (\$/yr)	0
Capacity shortage penalty (\$/kWh)	0

Figura 5.4 - Parâmetros económicos

Maximum annual capacity shortage (%)	20	{..}
Minimum renewable fraction (%)	0	{..}
Operating reserve		
As percent of load		
Load in current time step (%)	10	{..}
Annual peak load (%)	0	{..}
As percent of renewable output		
Solar power output (%)	25	{..}
Wind power output (%)	50	{..}
Note: HOMER calculates the total required operating reserve for each time step by multiplying each of these four inputs by the load or output value for that time step and adding the results.		
Primary energy savings		
☐ Minimum primary energy savings (%)	10	{..}
Reference electrical efficiency (%)	33	{..}
Reference thermal efficiency (%)	75	{..}

Figura 5.5 - Restrições impostas ao sistema

Relativamente ao campo “Load in current time step”, a utilização de 10 % significa que o sistema tem de salvaguardar capacidade para suprimir um aumento súbito de 10 % da potência total da carga.

Devido à intermitência de funcionamento das energias renováveis, nomeadamente da energia solar, considerou-se necessário contemplar 25 % de capacidade de reserva, de forma a suprimir uma eventual diminuição da produção fotovoltaica dessa percentagem.

A estrutura global do sistema é então composta pelo sistema produtor fotovoltaico, pelas baterias e pelo inversor.

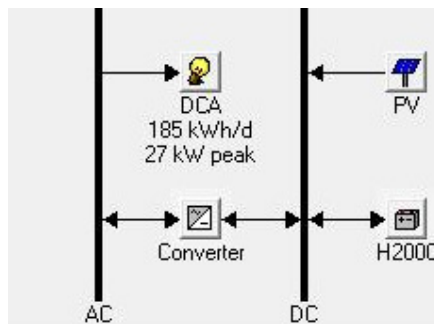


Figura 5.6 - Estrutura do sistema

5.4 Bateria Utilizada

O processo de escolha da bateria, teve em especial atenção a autonomia que pode ser proporcionada ao sistema. Por um lado, o período nocturno, quando os painéis não estão a produzir energia, tem de ser suprimido pelas baterias e como tal esse período representa o valor mínimo de autonomia que as baterias tem de ter. Por outro, quer-se que o sistema tenha um valor aceitável de autonomia, aquando de em eventual mau funcionamento dos painéis fotovoltaicos. Tentou-se que o sistema tivesse uma autonomia de aproximadamente 48 horas, no entanto verificou-se um objectivo difícil de alcançar e como tal a autonomia apresenta valores ligeiramente inferiores.

Outro factor que pesou bastante na escolha da bateria foi o peso. É um factor fundamental na medida em que as tarifas de transporte estão baseadas no peso do contentor. O componente do sistema que tem uma maior influência no peso são de facto as baterias e como tal foi dada também especial atenção a esta problemática.

Outras características que foram tidas em conta foram a frequência de manutenção e o tempo de vida das baterias. Relativamente ao tempo de vida das baterias, para aquelas que são vocacionadas para aplicação em sistemas que utilizam energias renováveis verificou-se que o seu valor permanece praticamente inalterável, ou seja, é bastante idêntico para a maioria das marcas existentes no mercado. Esse valor está compreendido entre 12 e 15 anos.

Quanto à manutenção, para os novos modelos de baterias ela é praticamente inexistente, no entanto para alguns modelos torna-se necessário acoplar um tubo contendo um gel específico que reage com o electrólito fazendo com que não seja necessário verificar de tempo a tempo o nível da água.

Outro factor que foi determinante para a escolha da bateria foi a dimensão (comprimento x largura x altura) de forma a se conseguir otimizar o número de baterias passíveis de se colocar na área do contentor reservada para o efeito. Foi necessário contemplar espaços de acesso às baterias para eventuais acções de manutenção, o que também condicionou bastante a escolha do tipo de bateria devido à disposição final que as baterias poderiam ter.

Depois de uma triagem, foi possível apurar 2 modelos que poderiam ser uma boa solução para o projecto em causa. Os modelos de baterias com capacidades reduzidas não permitiam obter valores de autonomia aceitáveis, apesar de se utilizar um maior número de baterias [35].

$$A = \frac{N_{bat} * V_{nom} * Q_{nom} * \left(1 - \frac{q_{min}}{100}\right) * 24}{L_{média} * 1000}, \quad (5.2)$$

Onde:

A = Autonomia do sistema de baterias (h)

N_{bat} = Número total de baterias do sistema;

V_{nom} = Tensão nominal de cada bateria (V);

Q_{nom} = Capacidade nominal de cada bateria (Ah);

q_{min} = estado de carga mínimo das baterias (%);

$L_{média}$ = Carga principal média (kWh/dia);

A capacidade reduzida vai também ela influenciar o designado “lifetime throughput” da própria bateria (valor fixo de energia que pode ser atingido até se atingir o número máximo de ciclos e a bateria necessitar de ser substituída). Sabendo o comportamento, número de ciclos versus profundidade de descarga de uma bateria, pode-se facilmente calcular o valor do “lifetime throughput” [35].

$$Q_{lifetime,i} = f_i * d_i * \left(\frac{q_{max} * V_{nom}}{1000} \right), \quad (5.3)$$

Onde:

$Q_{lifetime,i}$ = Lifetime throughput (kWh);

f_i = número de ciclos até se atingir a falha;

d_i = profundidade de descarga (%);

q_{max} = capacidade máxima da bateria (Ah);

V_{nom} = Tensão nominal da bateria (V);

Tendo o valor do lifetime throughput, consegue-se então calcular o tempo de vida expectável para o sistema de baterias, outro factor a que se deu atenção especial. Como se pode verificar uma bateria que tenha uma capacidade máxima baixa, vai também ela reduzir a quantidade de energia que é “ciclada” até ao final do tempo de vida da mesma, o que provoca uma diminuição do tempo de vida espectável do sistema onde essa bateria estiver instalada. Esta elação pode ser retirada analisando-se a equação seguinte:

$$R_{bat} = MIN \left(\frac{N_{bat} * Q_{lifetime_médio}}{Q_{thrpt_anual}}, R_{bat,f} \right), \quad (5.4)$$

Onde:

R_{bat} = Tempo de vida espectável para o sistema (anos);

N_{bat} = Número total de baterias do sistema;

$Q_{lifetime_médio}$ = Lifetime throughput médio (kWh);

Q_{thrpt_anual} = Throughput anual da bateria (kWh/ano);

$R_{bat,f}$ = Tempo máximo de vida da bateria independentemente do nível de utilização (especificado pelo fabricante em anos);

Daí que tenham sido contempladas para este estudo, duas alternativas de baterias com capacidades elevadas, na ordem dos 2000 Ah.

Tabela 5.4 - Dimensões das baterias em análise

	Tipo de Bateria	Dimensões			Peso (Kg)	Volume(m ³)	Custo(€)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura(mm)			
	Bateria Hoppecke 16 ozps 2000	215	400	815	150	0,07009	1360
	Surrette Rolls 2KS33P 5000	392	211	630	94	0,05210856	1025

5.4.1 Hoppecke 16 OpzS 2000

O primeiro modelo é o Hoppecke 16 OpzS 2000, com as seguintes características:

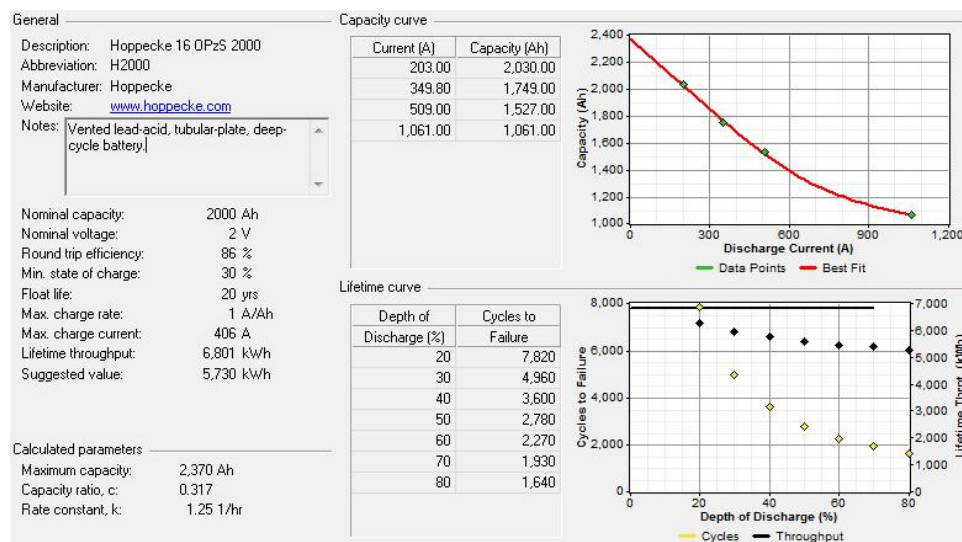


Figura 5.7 - Características técnicas da bateria Hoppecke 16 OPzS 2000

5.4.2 Surrette Rolls 2KS33P 5000

O segundo modelo é o Surrette Rolls 2KS33P 5000, com as seguintes características:

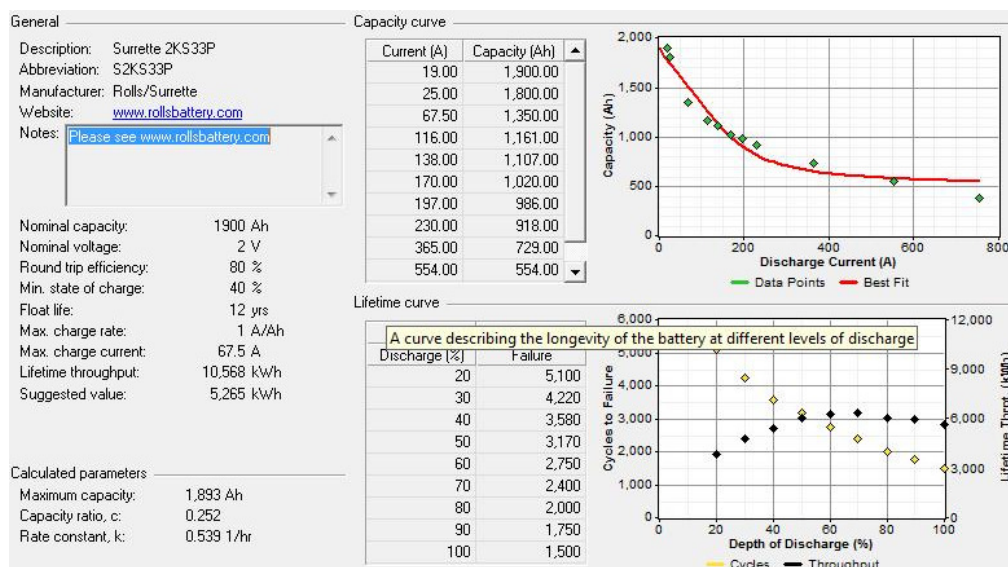


Figura 5.8 - Características técnicas da bateria Surrette Rolls 2KS33P 5000

5.4.3 Análise das baterias e seu comportamento

Analizando as características da bateria Hoppecke 16 OpzS 2000 pode-se constatar que para profundidades de descarga baixas tem um comportamento bastante bom, no que diz respeito ao número de ciclos até atingir um ponto de ruptura (para 20% de profundidade de descarga consegue 7820 ciclos até atingir a ruptura). No entanto a rapidez com que, devido ao aumento da profundidade de descarga, decresce esse número de ciclos é elevada, quando comparada com a outra bateria em teste. Esse fenómeno pode ser verificado aproximando as curvas por uma recta e verificar qual delas tem o maior declive em módulo.

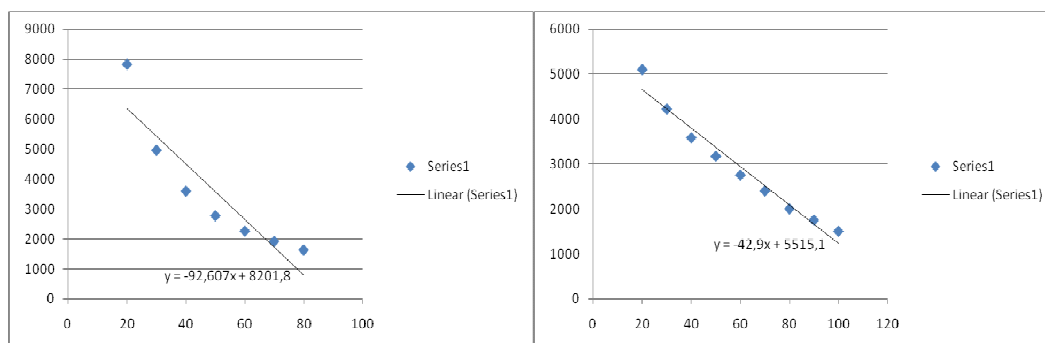


Figura 5.9 - a) Aproximação linear da curva do número de ciclos em função da profundidade de descarga para a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000

b) Aproximação linear da curva do número de ciclos em função da profundidade de descarga para a bateria Surrete Rolls 2KS33P

Como se pode verificar o declive da recta a) é bastante superior ao da recta b) e como se prevê uma frequência elevada de funcionamento da bateria em profundidades de descarga (entre os 60 e os 70 %), toma-se então como caso mais crítico a nível de comparação, os 70 % para se verificar qual é de facto a bateria que melhores resultados consegue obter. Verifica-se então que para uma profundidade de descarga de 70 % a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000 consegue realizar 1930 ciclos até deixar de funcionar, enquanto que a bateria Surrete Rolls 2KS33P consegue realizar 2400 ciclos. Daí que neste factor se destaque a bateria da Rolls.

No entanto relativamente à capacidade em função da corrente de descarga verifica-se que a bateria da Hoppecke apresenta resultados significativamente melhores. Analise-se então o comportamento das duas baterias para o cenário de 2 consumidores domésticos de classe alta, por exemplo.

Verifica-se através do software Homer Energy que para este cenário de consumo e utilizando a bateria da Hoppecke, a potência média de consumo anual é de aproximadamente

8 KW. Portanto a corrente média máxima que se poderá verificar neste cenário de consumo será $I_{descarga_bateria} = 8000/24 = 333$ A. Analisando a curva da capacidade da bateria em função da corrente de descarga pode-se constatar que a bateria Hoppecke consegue uma capacidade de aproximadamente 1750 Ah, enquanto que a bateria da Rolls apenas consegue uma capacidade de aproximadamente 750 Ah.

Relativamente às restantes comparações, são analisadas individualmente as performances das duas baterias para cada tipo de consumidores e para diferente números de habitações do mesmo tipo de consumidores, de forma que se consiga chegar a uma conclusão acerca do número máximo de habitações que é possível alimentar para cada perfil de consumo.

- DCA - 2 Habitações

Tabela 5.5 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCA 2 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000 			Surrette Rolls 2KS33P 5000 		
DCA - 2 habitações			DCA - 2 habitações		
Volume disp. baterias	7,720734	m ³	Volume disp. baterias	7,720734	m ³
Número de baterias	84		Número de baterias	84	
Volume total baterias	5,88756	m ³	Volume total baterias	4,37711904	m ³
Volume restante (espaço baterias)	1,833174	m ³	Volume restante (espaço baterias)	3,34361496	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	26		Numero PVs extra (espaço baterias)	48	
Potência extra (espaço baterias)	5892,345	W	Potência extra (espaço baterias)	10747,3338	W
Potência indicada pelo Homer Energy	40000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	50000	W
Potência extra (espaço PV's)	4550	W	Potência extra (espaço PV's)	-5450	W
Potência máxima PV nova	50442,345	W	Potência máxima PV nova	55297,3338	W
Número de PVs desperdiçados	20		Número de PVs desperdiçados	-24	
Número de painéis desperdiçados	0,962962963		Número de painéis desperdiçados	-1,15343915	
Volume desperdiçado (espaço painéis)	1,204811111	m ³	Volume desperdiçado (espaço painéis)	-1,4431254	m ³

Tabela 5.6 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCA 2 habitações

Surrette Rolls 2KS33P 5000			Hoppecke 16 OPzS 2000		
DCA - 2 habitações			DCA - 2 habitações		
Potência Fotovoltaica Total	50	KW	Potência Fotovoltaica Total	40	KW
Número de baterias	84		Número de baterias	84	
Potência do Inversor a utilizar	20	KW	Potência do Inversor a utilizar	30	KW
Potência de pico consumida	27	KW	Potência de pico consumida	27	KW
Energia diária consumida	185	KWh/d	Energia diária consumida	185	KWh/d
Excesso de Energia	14	%	Excesso de Energia	1,8	%
Capacity Shortage	18	%	Capacity Shortage	20	%
Autonomia	25	h	Autonomia	31	h
Tempo de vida das baterias	12	anos	Tempo de vida das baterias	14	anos
Peso do sistema	7896	Kg	Peso do sistema	12600	Kg
Investimento Inicial do sistema	485100	€	Investimento Inicial do sistema	441840	€
Investimento em painéis	387000	€	Investimento inicial em painéis	309600	€
Investimento em baterias	86100	€	Investimento inicial em baterias	114240	€
Investimento em Inversor	12000	€	Investimento inicial em Inversor	18000	€
Investimento em substituição de componentes do sistema	69061	€	Investimento em substituição de componentes do sistema	58246	€
Investimento em manutenção	212971	€	Investimento em manutenção	186126	€
Investimento Total	747811	€	Investimento Total	679350	€

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrette Rolls 2KS33P 5000, pode -se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 27 KW, permitindo alimentar duas habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe alta (tabela 5.6). Simultaneamente analisando a tabela 5.5, verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de 7,72 m³, onde se pretendem instalar 84 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 84 baterias é de 4,377 m³, restando para instalação de baterias 3,34 m³. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente. O volume total disponível para instalação de baterias foi calculado tendo em conta metade do volume do contentor, menos o espaço reservado para instalação do inversor e dos elementos de controlo da micro-rede (foi considerado um volume de 1,176 m³ para este efeito) e garantindo que existem boas condições de acessibilidade às baterias (para garantir esta facilidade de acesso às baterias foi considerado um espaço vazio igual ao espaço ocupado por uma fileira de baterias, o que reduz o volume disponível para instalação de baterias para metade), ou seja $(5,900 \times 2,395 \times 1,176 - 1,176) / 2 = 7,72 \text{ m}^3$.



Figura 5.10 - Esboço 3D inicial do perfil das baterias e explanação do espaço reservado para o fácil acesso às baterias e as medidas reais para instalação das baterias Rolls

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 50 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $1,44 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \times 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmo cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 5,45 KW e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 2 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (14%), quando comparada com a existente aquando da utilização da bateria Hoppecke 16 OpzS 2000 (1,8%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000 apresenta valores para esta grandeza mais satisfatórios (18% contra 20% utilizando a outra bateria).

Quanto à autonomia constata-se que existe uma diferença de 6 horas entre os dois tipos de baterias, estando portanto em vantagem quanto à maximização da autonomia a bateria da Hoppecke.

No que diz respeito ao tempo de vida a bateria da Hoppecke está também ela em ligeira vantagem, conseguindo funcionar sem necessitar de substituição durante 14 anos, contra 12 anos da bateria da Rolls.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg contra 150 Kg da bateria da Hoppecke. O peso é uma característica deveras importante para o dimensionamento do sistema, na medida em que é necessário realizar o transporte do contentor da fábrica até ao consumidor final e normalmente as tarifas de transporte são estipuladas em função do peso final transportado. No total o sistema teria uma contribuição das baterias de 7895 Kg, valor bastante menor que os 12600 Kg proporcionados pela bateria da Hoppecke.

No entanto analisando a componente económica verifica-se que utilizando esta bateria é necessário realizar um maior investimento inicial em painéis fotovoltaicos, na medida em que é necessária uma potência de produção superior quando comparada com a potência necessária para o sistema utilizando a bateria da Hoppecke. Tendo em conta que, para os dois tipos de bateria, é necessário o mesmo número de baterias e sendo que o preço da bateria da Rolls é bastante mais reduzido (1025 € contra 1360 €) verifica-se que o investimento inicial em baterias é mais reduzido para a bateria da Rolls.

Relativamente ao investimento em substituição de material, considerou-se um preço de substituição para cada componente igual ao preço de compra inicial (pior cenário), se bem que se um sistema deste género fosse produzido em série, em elevadas quantidades, existiriam contractos com as empresas de cada componente que permitiriam reduzir tanto o preço unitário de cada elemento, como o preço da substituição. A bateria da Hoppecke apresenta melhores resultados, na medida em que possui um tempo de vida superior e como tal nos 25 anos em análise tem de ser substituído menos vezes.

No total o sistema mais compensatório a nível económico e a nível técnico é de facto o sistema constituído pela bateria da Hoppecke. No entanto existem outras condicionantes que têm de ser consideradas, como o peso e a disposição das baterias no contentor devido às suas dimensões. Relativamente ao peso torna-se necessário analisar as tarifas de transporte dos

contentores e verificar se o cenário de custo total mais favorável inverte para a bateria da Rolls, ou se se mantem exactamente igual.

DCA - 2 Habitações com a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000

Nesta simulação, utilizando a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 27 KW, permitindo alimentar duas habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe alta (tabela 5.6). Simultaneamente analisando a tabela 5.5, verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de $7,72 \text{ m}^3$, onde se pretendem instalar 84 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 84 baterias é de $5,89 \text{ m}^3$, restando para instalação de baterias $1,83 \text{ m}^3$. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente, no entanto verifica-se um maior aproveitamento do que o sistema constituído pela bateria da Rolls.

No espaço reservado para o transporte de painéis, também se constata que existe um inaproveitamento do volume total. Na medida em que existe a possibilidade de transportar 44,55 KW e apenas é necessária uma potência fotovoltaica de 40 KW, sobrando 4550 W, que correspondem a um volume inaproveitado de $1,20 \text{ m}^3$. Na totalidade desaproveitam-se $3,03 \text{ m}^3$.

Relativamente ao desempenho técnico, este já foi analisado anteriormente aquando da comparação entre as duas baterias.

Relativamente à disposição das baterias, o modelo Hoppecke 16 OPzS 2000, é caracterizado pelas seguintes características dimensionais: 21,5 cm de comprimento, 40,0 cm de largura e 81,5 cm de altura, perfazendo um volume de $0,07 \text{ m}^3$.

O peso de cada bateria é de 150 Kg. A folha de características desta bateria pode ser consultada em [X](#).

Devido ao posicionamento obrigatório que as baterias tem de ter devido à localização do painel de ligações, a forma que permite maximizar o número de baterias a colocar no espaço reservado para o efeito é colocar uma coluna de 3 baterias, o que já perfaz $0,4 \times 3 = 1,2$ metros em largura (aproximadamente igual aos 1,176 metros disponíveis para a colocação de baterias, no entanto como anteriormente não se considerou o máximo de 13 painéis, mas sim 11 painéis ainda existe algum espaço livre para o excedente das baterias que é de 2,4 cm). Sendo que as baterias têm um comprimento de 0,215 metros, e que se dispõe de sensivelmente 4,900 metros de comprimento para colocação de baterias (na medida em que existe a necessidade de reservar espaço para o/os inversores e os elementos de controlo da micro-rede. Desta forma reserva-se para esse efeito um volume de $1,176 \text{ m}^3$), então podem-

se colocar 22 baterias para perfazer os 4,900 metros de comprimento disponível. Conseguindo-se um máximo de 132 baterias instaladas.

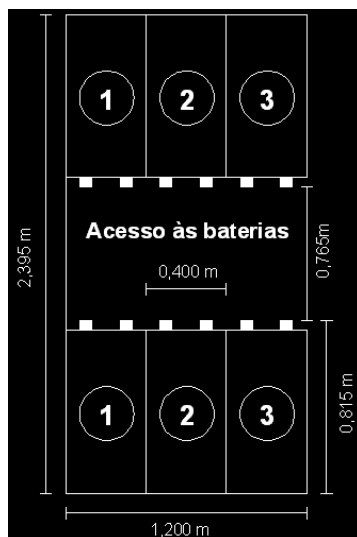


Figura 5.11 - Pormenor da disposição das baterias

Pensou-se na solução indicada na figura, já que o acesso às baterias tem de ser previsto. A altura deste modelo de baterias é elevada e como tal de forma a se criarem duas prateleiras é inevitável a inversão das baterias. Apenas com uma prateleira de baterias, conseguiam-se colocar 72 baterias no interior do contentor, o que para este cenário de consumo, que necessita de 84 baterias, já não era suficiente.

No entanto, este modelo de bateria é constituído por um electrólito líquido e como tal a disposição mencionada na figura 5.11, não é de todo possível. Nas baterias de electrólito líquido, após um certo período de funcionamento, parte dos eléctrodos começa a sofrer desgaste e verifica-se um depósito de pequenas partículas do material do eléctrodo no fundo da bateria. No caso da figura as baterias superiores estão invertidas o que consequentemente provoca um movimento das partículas depositadas em direcção aos eléctrodos, que pode provocar um mau funcionamento das baterias.

- DCA - 3 Habitações

Tabela 5.7 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCA 3 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000 			Surrette Rolls 2KS33P 5000 		
DCA - 3 habitações			DCA - 3 habitações		
Volume disp. baterias	7,720734	m ³	Volume disp. baterias	7,720734	m ³
Número de baterias	132		Número de baterias	132	
Volume total baterias	9,25188	m ³	Volume total baterias	6,87832992	m ³
Volume restante (espaço baterias)	-1,531146	m ³	Volume restante (espaço baterias)	0,84240408	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	-22		Numero PVs extra (espaço baterias)	12	
Potência extra (espaço baterias)	-4921,540714	W	Potência extra (espaço baterias)	2707,7274	W
Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	70000	W
Potência extra (espaço PV's)	-15450	W	Potência extra (espaço PV's)	-25450	W
Potência máxima PV nova	39628,45929	W	Potência máxima PV nova	47257,7274	W
Número de PVs desperdiçados	-69		Número de PVs desperdiçados	-113	
Número de painéis desperdiçados	-3,26984127		Número de painéis desperdiçados	-5,38624339	
Volume desperdiçado (espaço painéis)	-4,091061905	m ³	Volume desperdiçado (espaço painéis)	-6,73899841	m ³

Tabela 5.8 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCA 3 habitações

Surrette Rolls 2KS33P 5000 			Hoppecke 16 OPzS 2000 		
DCA - 3 habitações			DCA - 3 habitações		
Potência Fotovoltaica Total	70	KW	Potência Fotovoltaica Total	60000	KW
Número de baterias	132		Número de baterias	132	
Potência do Inversor a utilizar	40	KW	Potência do Inversor a utilizar	40	KW
Potência de pico consumida	41	KW	Potência de pico consumida	41	KW
Energia diária consumida	279	KWh/d	Energia diária consumida	279	KWh/d
Excesso de Energia	9,4	%	Excesso de Energia	1,6	%
Capacity Shortage	18	%	Capacity Shortage	20	%
Autonomia	26	h	Autonomia	32	h
Tempo de vida das baterias	12	anos	Tempo de vida das baterias	15	anos
Peso do sistema	12408	Kg	Peso do sistema	19800	Kg
Investimento Inicial do sistema	701100	€	Investimento Inicial do sistema	667920	€
Investimento inicial em painéis	541800	€	Investimento inicial em painéis	464400	€
Investimento inicial em baterias	135300	€	Investimento inicial em baterias	179520	€
Investimento inicial em Inversor	24000	€	Investimento inicial em Inversor	24000	€
Investimento em substituição de componentes do sistema	110671	€	Investimento em substituição de componentes do sistema	81808	€
Investimento em manutenção	311658	€	Investimento em manutenção	279700	€
Investimento Total	1160340	€	Investimento Total	1020662	€

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrette Rolls 2KS33P 5000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 41 KW, permitindo alimentar três habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe alta. Simultaneamente, verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de 7,72 m³, onde se pretendem instalar 132 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 132 baterias é de 6,87 m³, restando para instalação de baterias 0,84 m³. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente, no entanto verifica-se que

contrariamente ao sistema com a bateria da Hoppecke, existe espaço para a colocação das 132 baterias.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 70 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $6,73 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \times 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmo cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 25,45 KW e como tal não está garantida a possibilidade de alimentação de 3 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (9,4%), quando comparada com a existente aquando da utilização da bateria Hoppecke 16 OpzS 2000 (1,6%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000 apresenta valores para esta grandeza mais satisfatórios (18% contra 20 % utilizando a outra bateria).

Quanto à autonomia constata-se que existe uma diferença de 6 horas entre os dois tipos de baterias, estando portanto em vantagem quanto à maximização da autonomia a bateria da Hoppecke.

No que diz respeito ao tempo de vida a bateria da Hoppecke está também ela em ligeira vantagem, conseguindo funcionar sem necessitar de substituição durante 15 anos, contra 12 anos da bateria da Rolls.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg contra 150 Kg da bateria da Hoppecke. No total o sistema teria uma contribuição das

baterias de 12408 Kg, valor bastante menor que os 19800 Kg proporcionados pela bateria da Hoppecke.

No entanto analisando a componente económica verifica-se que utilizando esta bateria é necessário realizar um maior investimento inicial em painéis fotovoltaicos, na medida em que é necessária uma potência de produção superior quando comparada com a potência necessária para o sistema utilizando a bateria da Hoppecke. Tendo em conta que, para os dois tipos de bateria, é necessário o mesmo número de baterias e sendo que o preço da bateria da Rolls é bastante mais reduzido (1025 € contra 1360 €) verifica-se que o investimento inicial em baterias é mais reduzido para a bateria da Rolls.

Relativamente ao investimento em substituição de material, a bateria da Hoppecke apresenta melhores resultados, na medida em que possui um tempo de vida superior e como tal nos 25 anos em análise tem de ser substituído menos vezes.

No total o sistema mais compensatório a nível económico é de facto o sistema constituído pela bateria da Hoppecke. No entanto realizando-se a mesma análise que foi feita para a bateria da Rolls em termos de espaços disponíveis e de dimensões verifica-se que não é possível de todo conseguir colocar as 132 baterias da Hoppecke no contentor, existindo portanto falta de espaço. O volume ocupado pelas 132 baterias da Hoppecke é de 9,25 m³ o que ultrapassa os 7,72 m³ disponíveis. Por outro lado no espaço reservado para os painéis também não existe qualquer espaço livre na medida em que o sistema necessita de 60 KW e apenas se conseguem colocar 44,55 KW. Portanto conclui-se que utilizando a bateria da Hoppecke não é de todo possível alimentar 3 habitações com este perfil de consumo.

- DCM - 4 Habitações

Tabela 5.9 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCM 4 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000 			Surrette Rolls 2KS33P 5000 		
DCM - 4 habitações			DCM - 4 habitações		
Volume disp. baterias	7,720734	m ³	Volume disp. baterias	7,720734	m ³
Número de baterias	48		Número de baterias	72	
Volume total baterias	3,36432	m ³	Volume total baterias	3,75181632	m ³
Volume restante (espaço baterias)	4,356414	m ³	Volume restante (espaço baterias)	3,96891768	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	62		Numero PVs extra (espaço baterias)	57	
Potência extra (espaço baterias)	14002,75929	W	Potência extra (espaço baterias)	12757,2354	W
Potência indicada pelo Homer Energy	40000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	50000	W
Potência extra (espaço PV's)	4550	W	Potência extra (espaço PV's)	-5450	W
Potência máxima PV nova	58552,75929	W	Potência máxima PV nova	57307,2354	W
Número de PVs desperdiçados	20		Número de PVs desperdiçados	-24	
Número de paineis desperdiçados	0,962962963		Número de paineis desperdiçados	-1,15343915	
Volume desperdiçado (espaço paineis)	1,204811111	m ³	Volume desperdiçado (espaço paineis)	-1,4431254	m ³

Tabela 5.10 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCM 4 habitações

Surrette Rolls 2KS33P 5000		Hoppecke 16 OPzS 2000	
			
DCM - 4 habitações		DCM - 4 habitações	
Potência Fotovoltaica Total	50 KW	Potência Fotovoltaica Total	40000 KW
Número de baterias	72	Número de baterias	48
Potência do Inversor a utilizar	20 KW	Potência do Inversor a utilizar	30 KW
Potência de pico consumida	32 KW	Potência de pico consumida	32 KW
Energia diária consumida	179 KWh/d	Energia diária consumida	179 KWh/d
Excesso de Energia	18,5 %	Excesso de Energia	4,4 %
Capacity Shortage	19 %	Capacity Shortage	19 %
Autonomia	22 h	Autonomia	18 h
Tempo de vida das baterias	12 anos	Tempo de vida das baterias	9 anos
Peso do sistema	6768 Kg	Peso do sistema	7200 Kg
Investimento Inicial do sistema	472800 €	Investimento Inicial do sistema	392880 €
Investimento inicial em painéis	387000 €	Investimento inicial em painéis	309600 €
Investimento inicial em baterias	73800 €	Investimento inicial em baterias	65280 €
Investimento inicial em Inversor	12000 €	Investimento inicial em Inversor	18000 €
Investimento em substituição de componentes do sistema	59911 €	Investimento em substituição de componentes do sistema	69336 €
Investimento em manutenção	206835 €	Investimento em manutenção	167718 €
Investimento Total	722851 €	Investimento Total	625458 €

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrette Rolls 2KS33P 5000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 32 KW, permitindo alimentar quatro habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe média. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de 7,72 m³, onde se pretendem instalar 72 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 72 baterias é de 3,75 m³, restando para instalação de baterias 3,97 m³. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 50 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de 1,44 m³, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de (4,900*0,630*1,2=3,7 m³) e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias (4,900*0,505*1,2=2,97 m³). Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de 3,7+2,97=6,67 m³. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de 3,7 m³, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de 6 *1800=10800 W.

Fazendo os mesmos cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800$ W, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 5,45 KW e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 3 habitações utilizando-se esta bateria.

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que ambas as baterias apresentam o mesmo valor (19%).

Quanto à autonomia constata-se que existe uma diferença de 4 horas entre os dois tipos de baterias, estando portanto em vantagem quanto à maximização da autonomia a bateria da Rolls.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls está também ela em ligeira vantagem, conseguindo funcionar sem necessitar de substituição durante 12 anos, contra 9 anos da bateria da Hoppecke.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg contra 150 Kg da bateria da Hoppecke. No total o sistema teria uma contribuição das baterias de 6768 Kg, valor bastante menor que os 7200 Kg proporcionados pela bateria da Hoppecke.

No entanto analisando a componente económica verifica-se que utilizando esta bateria é necessário realizar um maior investimento inicial em painéis fotovoltaicos, na medida em que é necessária uma potência de produção superior quando comparada com a potência necessária para o sistema utilizando a bateria da Hoppecke. Tendo em conta que, para os dois tipos de bateria, é necessário o mesmo número de baterias e sendo que o preço da bateria da Rolls é bastante mais reduzido (1025 € contra 1360 €) verifica-se que o investimento inicial em baterias é mais reduzido para a bateria da Rolls.

Relativamente ao investimento em substituição de material, a bateria da Rolls apresenta melhores resultados, na medida em que possui um tempo de vida superior e como tal nos 25 anos em análise tem de ser substituída menos vezes.

No total o sistema mais compensatório a nível económico é o sistema constituído pela bateria da Hoppecke. No entanto a nível técnico o sistema constituído pela bateria da Rolls apresenta valores mais satisfatórios. Concluindo-se portanto que esta solução é uma solução viável, no entanto não se consegue uma optimização do espaço disponível no contentor, e como tal é necessário testar o comportamento do sistema para um número superior de habitações a alimentar.

- DCM - 5 Habitações

Tabela 5.11 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCM 5 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000			Surrette Rolls 2KS33P 5000		
					
DCM - 5 habitações			DCM - 5 habitações		
Volume disp. baterias	7,720734	m ³	Volume disp. baterias	7,720734	m ³
Número de baterias	48		Número de baterias	84	
Volume total baterias	3,36432	m ³	Volume total baterias	4,37711904	m ³
Volume restante (espaço baterias)	4,356414	m ³	Volume restante (espaço baterias)	3,34361496	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	62		Numero PVs extra (espaço baterias)	48	
Potência extra (espaço baterias)	14002,75929	W	Potência extra (espaço baterias)	10747,3338	W
Potência indicada pelo Homer Energy	50000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W
Potência extra (espaço PV's)	-5450	W	Potência extra (espaço PV's)	-15450	W
Potência máxima PV nova	58552,75929	W	Potência máxima PV nova	55297,3338	W
Número de PVs desperdiçados	-24		Número de PVs desperdiçados	-69	
Número de paineis desperdiçados	-1,153439153		Número de paineis desperdiçados	-3,26984127	
Volume desperdiçado (espaço paineis)	-1,443125397	m ³	Volume desperdiçado (espaço paineis)	-4,0910619	m ³

Tabela 5.12 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCM 5 habitações

Surrette Rolls 2KS33P 5000			Hoppecke 16 OPzS 2000		
					
DCM - 5 habitações			DCM - 5 habitações		
Potência Fotovoltaica Total	60	KW	Potência Fotovoltaica Total	50000	KW
Número de baterias	84		Número de baterias	48	
Potência do Inversor a utilizar	30	KW	Potência do Inversor a utilizar	40	KW
Potência de pico consumida	40	KW	Potência de pico consumida	40	KW
Energia diária consumida	223	KWh/d	Energia diária consumida	223	KWh/d
Excesso de Energia	17,2	%	Excesso de Energia	5,8	%
Capacity Shortage	20	%	Capacity Shortage	20	%
Autonomia	21	h	Autonomia	15	h
Tempo de vida das baterias	12	anos	Tempo de vida das baterias	7	anos
Peso do sistema	7896	Kg	Peso do sistema	7200	Kg
Investimento Inicial do sistema	568500	€	Investimento Inicial do sistema	476280	€
Investimento inicial em paineis	464400	€	Investimento inicial em paineis	387000	€
Investimento inicial em baterias	86100	€	Investimento inicial em baterias	65280	€
Investimento inicial em Inversor	18000	€	Investimento inicial em Inversor	24000	€
Investimento em substituição de componentes do sistema	71565	€	Investimento em substituição de componentes do sistema	98669	€
Investimento em manutenção	250	€	Investimento em manutenção	204790	€
Investimento Total	870320	€	Investimento Total	769034	€

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrette Rolls 2KS33P 5000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 40 KW, permitindo alimentar cinco habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe média. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de 7,72 m³, onde se pretendem instalar 84 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado

pelas 84 baterias é de $4,38 \text{ m}^3$, restando para instalação de baterias $3,34 \text{ m}^3$. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 60 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $4,09 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \times 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmos cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 15,45 KW e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 5 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (17,2%), quando comparada com a existente aquando da utilização da bateria Hoppecke 16 OpzS 2000 (5,8%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que ambas as baterias apresentam o mesmo valor (20%).

Quanto à autonomia constata-se que existe uma diferença de 6 horas entre os dois tipos de baterias, estando portanto em vantagem quanto à maximização da autonomia a bateria da Rolls.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls está também ela em ligeira vantagem, conseguindo funcionar sem necessitar de substituição durante 12 anos, contra 7 anos da bateria da Hoppecke.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg contra 150 Kg da bateria da Hoppecke. No entanto para o peso total do sistema existe uma

contribuição das baterias Rolls de 7896 Kg, valor superior aos 7200 Kg proporcionados pela bateria da Hoppecke, na medida em que necessita de um número bastante superior de baterias.

No entanto analisando a componente económica verifica-se que utilizando esta bateria é necessário realizar um maior investimento inicial em painéis fotovoltaicos, na medida em que é necessária uma potência de produção superior quando comparada com a potência necessária para o sistema utilizando a bateria da Hoppecke. Tendo em conta que, para as baterias Rolls, é necessário um número superior de baterias verifica-se que o investimento inicial em baterias é mais elevado para a bateria da Rolls, apesar do preço da bateria da Rolls ser bastante mais reduzido (1025 € contra 1360 €).

Relativamente ao investimento em substituição de material, a bateria da Rolls apresenta melhores resultados, na medida em que possui um tempo de vida superior e como tal nos 25 anos em análise tem de ser substituída menos vezes.

No total o sistema mais compensatório a nível económico é o sistema constituído pela bateria da Hoppecke. No entanto a nível técnico o sistema constituído pela bateria da Rolls apresenta valores mais satisfatórios. Concluindo-se portanto que esta solução é uma solução viável, no entanto não se consegue uma optimização do espaço disponível no contentor, e como tal é necessário testar o comportamento do sistema para um número superior de habitações a alimentar.

- DCM - 6 Habitações

Tabela 5.13 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCM 6 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000 			Surrette Rolls 2KS33P 5000 		
DCM - 6 habitações			DCM - 6 habitações		
Volume disp. baterias	7,720734	m ³	Volume disp. baterias	7,720734	m ³
Número de baterias	60		Número de baterias	108	
Volume total baterias	4,2054	m ³	Volume total baterias	5,62772448	m ³
Volume restante (espaço baterias)	3,515334	m ³	Volume restante (espaço baterias)	2,09300952	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	50		Numero PVs extra (espaço baterias)	30	
Potência extra (espaço baterias)	11299,28786	W	Potência extra (espaço baterias)	6727,5306	W
Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	70000	W
Potência extra (espaço PV's)	-15450	W	Potência extra (espaço PV's)	-25450	W
Potência máxima PV nova	55849,28786	W	Potência máxima PV nova	51277,5306	W
Número de PVs desperdiçados	-69		Número de PVs desperdiçados	-113	
Número de painéis desperdiçados	-3,26984127		Número de painéis desperdiçados	-5,38624339	
Volume desperdiçado (espaço painéis)	-4,091061905	m ³	Volume desperdiçado (espaço painéis)	-6,73899841	m ³

Tabela 5.14 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCM 6 habitações

Surrette Rolls 2KS33P 5000		Hoppecke 16 OPzS 2000	
			
DCM - 6 habitações		DCM - 6 habitações	
Potência Fotovoltaica Total	70 KW	Potência Fotovoltaica Total	60000 KW
Número de baterias	108	Número de baterias	60
Potência do Inversor a utilizar	40 KW	Potência do Inversor a utilizar	50 KW
Potência de pico consumida	48 KW	Potência de pico consumida	48 KW
Energia diária consumida	268 KWh/d	Energia diária consumida	268 KWh/d
Excesso de Energia	13,6 %	Excesso de Energia	5,4 %
Capacity Shortage	18 %	Capacity Shortage	20 %
Autonomia	22,1 h	Autonomia	15 h
Tempo de vida das baterias	12 anos	Tempo de vida das baterias	8 anos
Peso do sistema	10152 Kg	Peso do sistema	9000 Kg
Investimento Inicial do sistema	676500 €	Investimento Inicial do sistema	576000 €
Investimento inicial em painéis	541800 €	Investimento inicial em painéis	464400 €
Investimento inicial em baterias	110700 €	Investimento inicial em baterias	81600 €
Investimento inicial em Inversor	24000 €	Investimento inicial em Inversor	30000 €
Investimento em substituição de componentes do sistema	92369 €	Investimento em substituição de componentes do sistema	120550 €
Investimento em manutenção	299386 €	Investimento em manutenção	247997 €
Investimento Total	1042748 €	Investimento Total	928984 €

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrette Rolls 2KS33P 5000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 48 KW, permitindo alimentar seis habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe média. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de 7,72 m³, onde se pretendem instalar 108 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 108 baterias é de 5,63 m³, restando para instalação de baterias 2,1 m³. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 70 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de 6,74 m³, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de (4,900*0,630*1,2=3,7 m³) e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias (4,900*0,505*1,2=2,97 m³). Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de 3,7+2,97=6,67 m³. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de 3,7 m³, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de 6 *1800=10800 W. Fazendo os mesmo cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma

potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800+9000 = 19800$ W, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 25,45 KW e como tal não está garantida a possibilidade de alimentação de 6 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (13,6%), quando comparada com a existente aquando da utilização da bateria Hoppecke 16 OpzS 2000 (5,4%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria da Rolls proporciona um valor melhor (18% contra 20% utilizando-se a bateria da Hoppecke).

Quanto à autonomia constata-se que existe uma diferença de 7 horas entre os dois tipos de baterias, estando portanto em vantagem quanto à maximização da autonomia a bateria da Rolls.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls está também ela em ligeira vantagem, conseguindo funcionar sem necessitar de substituição durante 12 anos, contra 8 anos da bateria da Hoppecke.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg contra 150 Kg da bateria da Hoppecke. No entanto para o peso total do sistema existe uma contribuição das baterias Rolls de 10152 Kg, valor superior aos 9000 Kg proporcionados pela bateria da Hoppecke, na medida em que necessita de um número superior de baterias.

No entanto analisando a componente económica verifica-se que utilizando esta bateria é necessário realizar um maior investimento inicial em painéis fotovoltaicos, na medida em que é necessária uma potência de produção superior quando comparada com a potência necessária para o sistema utilizando a bateria da Hoppecke. Tendo em conta que, para as baterias Rolls, é necessário um número superior de baterias verifica-se que o investimento inicial em baterias é mais elevado para a bateria da Rolls, apesar do preço da bateria da Rolls ser bastante mais reduzido (1025 € contra 1360 €).

Relativamente ao investimento em substituição de material, a bateria da Rolls apresenta melhores resultados, na medida em que possui um tempo de vida superior e como tal nos 25 anos em análise tem de ser substituída menos vezes.

No total o sistema mais compensatório a nível económico é o sistema constituído pela bateria da Hoppecke. No entanto a nível técnico o sistema constituído pela bateria da Rolls apresenta valores mais satisfatórios.

- DCB - 21 e 22 Habitações utilizando a bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000

Tabela 5.15 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCB 21 e 22 habitações

Surrete Rolls 2KS33P 5000 			Surrete Rolls 2KS33P 5000 		
<u>DCB - 21 habitações</u>			<u>DCB - 22 habitações</u>		
Volume disp. baterias	7,720734	m ³	Volume disp. baterias	7,720734	m ³
Número de baterias	96		Número de baterias	120	
Volume total baterias	5,00242176	m ³	Volume total baterias	6,2530272	m ³
Volume restante (espaço baterias)	2,71831224	m ³	Volume restante (espaço baterias)	1,4677068	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	39		Numero PVs extra (espaço baterias)	21	
Potência extra (espaço baterias)	8737,4322	W	Potência extra (espaço baterias)	4717,629	W
Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W
Potência extra (espaço PV's)	-15450	W	Potência extra (espaço PV's)	-15450	W
Potência máxima PV nova	53287,4322	W	Potência máxima PV nova	49267,629	W
Número de PVs desperdiçados	-69		Número de PVs desperdiçados	-69	
Número de painéis desperdiçados	-3,26984127		Número de painéis desperdiçados	-3,26984127	
Volume desperdiçado (espaço painéis)	-4,0910619	m ³	Volume desperdiçado (espaço painéis)	-4,091061905	m ³

Tabela 5.16 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCB 21 e 22 habitações

Surrete Rolls 2KS33P 5000 			Surrete Rolls 2KS33P 5000 		
<u>DCB - 21 habitações</u>			<u>DCB - 22 habitações</u>		
Potência Fotovoltaica Total	60	KW	Potência Fotovoltaica Total	60	KW
Número de baterias	96		Número de baterias	120	
Potência do Inversor a utilizar	30	KW	Potência do Inversor a utilizar	30	KW
Potência de pico consumida	35	KW	Potência de pico consumida	36	KW
Energia diária consumida	245	KWh/d	Energia diária consumida	257	KWh/d
Excesso de Energia	10	%	Excesso de Energia	5,4	%
Capacity Shortage	20	%	Capacity Shortage	20	%
Autonomia	21,4	h	Autonomia	26	h
Tempo de vida das baterias	12	anos	Tempo de vida das baterias	12	anos
Peso do sistema	9024	Kg	Peso do sistema	11280	Kg
Investimento Inicial do sistema	580800	€	Investimento Inicial do sistema	605400	€
Investimento inicial em painéis	464400	€	Investimento inicial em painéis	464400	€
Investimento inicial em baterias	98400	€	Investimento inicial em baterias	123000	€
Investimento inicial em Inversor	18000	€	Investimento inicial em Inversor	18000	€
Investimento em substituição de componentes do sistema	80715	€	Investimento em substituição de componentes do sistema	99016	€
Investimento em manutenção	256179	€	Investimento em manutenção	268451	€
Investimento Total	895280	€	Investimento Total	945199	€

Simulação para 21 Habitações:

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 35 KW, permitindo

alimentar vinte e uma habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe baixa. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de $7,72 \text{ m}^3$, onde se pretendem instalar 96 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 96 baterias é de 5 m^3 , restando para instalação de baterias $2,72 \text{ m}^3$. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 60 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $4,09 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \times 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmos cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 15,45 KW e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 21 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (15%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria da Rolls proporciona um valor de 20%.

Quanto à autonomia constata-se que é possível alimentar o sistema apenas a partir das baterias durante 20 horas.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls consegue funcionar sem necessitar de substituição durante 12 anos.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg existindo uma contribuição das baterias Rolls para o peso total do sistema de 9024 Kg.

Concluindo-se portanto que esta solução é uma solução viável, no entanto não se consegue uma otimização do espaço disponível no contentor, e como tal é necessário testar o comportamento do sistema para um número superior de habitações a alimentar.

Simulação para 22 Habitações:

Nesta simulação, utilizando a bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 36 KW, permitindo alimentar vinte e duas habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe baixa. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de $7,72 \text{ m}^3$, onde se pretendem instalar 120 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 120 baterias é de $6,25 \text{ m}^3$, restando para instalação de baterias $1,47 \text{ m}^3$. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 60 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $4,09 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \times 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmos cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 15,45 KW e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 22 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (5,4%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria da Rolls proporciona um valor de 20%.

Quanto à autonomia constata-se que é possível alimentar o sistema apenas a partir das baterias durante 26 horas.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls consegue funcionar sem necessitar de substituição durante 12 anos.

A grande vantagem que a bateria da Rolls possui é de facto o peso, bastante inferior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 94 Kg existindo uma contribuição das baterias Rolls para o peso total do sistema de 11280 Kg.

Concluindo-se portanto que esta solução é uma solução viável, no entanto não se consegue uma optimização do espaço disponível no contentor, e como tal é necessário testar o comportamento do sistema para um número superior de habitações a alimentar.

Contudo, o sistema foi testado para 23 habitações e verificou-se que já não existia espaço disponível para colocação de painéis, daí que 22 habitações seja o máximo que o sistema poderá alimentar.

- DCB - 23 e 24 Habitações utilizando a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000

Tabela 5.17 - Estudo do espaço disponível para instalação de baterias e de painéis, para DCB 23 e 24 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000 			Hoppecke 16 OPzS 2000 		
DCB - 23 habitações			DCB - 24 habitações		
Volume disp. baterias	7.720734	m ³	Volume disp. baterias	7.720734	m ³
Número de baterias	60		Número de baterias	108	
Volume total baterias	4.2054	m ³	Volume total baterias	7.56972	m ³
Volume restante (espaço baterias)	3.515334	m ³	Volume restante (espaço baterias)	0.151014	m ³
Numero PVs extra (espaço baterias)	50		Numero PVs extra (espaço baterias)	2	
Potência extra (espaço baterias)	11299.28786	W	Potência extra (espaço baterias)	485.4021429	W
Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W	Potência indicada pelo Homer Energy	60000	W
Potência extra (espaço PV's)	-15450	W	Potência extra (espaço PV's)	-15450	W
Potência máxima PV nova	55849.28786	W	Potência máxima PV nova	45035.40214	W
Número de PVs desperdiçados	-69		Número de PVs desperdiçados	-69	
Número de paineis desperdiçados	-3.26984127		Número de paineis desperdiçados	-3.26984127	
Volume desperdiçado (espaço paineis)	-4.0910619	m ³	Volume desperdiçado (espaço paineis)	-4.091061905	m ³

Tabela 5.18 - Resultados técnicos da simulação no software Homer Energy, para DCB 23 e 24 habitações

Hoppecke 16 OPzS 2000			Hoppecke 16 OPzS 2000		
					
DCB - 23 habitações			DCB - 24 habitações		
Potência Fotovoltaica Total	60	KW	Potência Fotovoltaica Total	60	KW
Número de baterias	60		Número de baterias	108	
Potência do Inversor a utilizar	40	KW	Potência do Inversor a utilizar	40	KW
Potência de pico consumida	38	KW	Potência de pico consumida	40	KW
Energia diária consumida	269	KWh/d	Energia diária consumida	281	KWh/d
Excesso de Energia	5.1	%	Excesso de Energia	2	%
Capacity Shortage	19	%	Capacity Shortage	20	%
Autonomia	15	h	Autonomia	25.8	h
Tempo de vida das baterias	8	anos	Tempo de vida das baterias	13.9	anos
Peso do sistema	9000	Kg	Peso do sistema	16200	Kg
Investimento Inicial do sistema	570000	€	Investimento Inicial do sistema	586320	€
Investimento inicial em painéis	464400	€	Investimento inicial em painéis	464400	€
Investimento inicial em baterias	81600	€	Investimento inicial em baterias	146880	€
Investimento inicial em Inversor	24000	€	Investimento inicial em Inversor	24000	€
Investimento em substituição de componentes do sistema	113749	€	Investimento em substituição de componentes do sistema	75175	€
Investimento em manutenção	242884	€	Investimento em manutenção	267428	€
Investimento Total	908324	€	Investimento Total	968912	€

Simulação para 23 Habitações:

Nesta simulação, utilizando a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 38 KW, permitindo alimentar vinte e três habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe baixa. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de $7,72 \text{ m}^3$, onde se pretendem instalar 60 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 60 baterias é de $4,2 \text{ m}^3$, restando para instalação de baterias $3,5 \text{ m}^3$. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 60 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $4,09 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as

duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \cdot 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmo cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W . No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de $15,45 \text{ KW}$ e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 23 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (5.1%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria da Rolls proporciona um valor de 19%.

Quanto à autonomia constata-se que é possível alimentar o sistema apenas a partir das baterias durante 15 horas.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls consegue funcionar sem necessitar de substituição durante 8 anos.

A grande desvantagem que a bateria da Hoppecke possui é de facto o peso, bastante superior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 150 Kg existindo uma contribuição das baterias Rolls para o peso total do sistema de 9000 Kg .

Concluindo-se portanto que esta solução é uma solução viável, no entanto não se consegue uma optimização do espaço disponível no contentor, e como tal é necessário testar o comportamento do sistema para um número superior de habitações a alimentar.

Simulação para 24 Habitações:

Nesta simulação, utilizando a bateria Hoppecke 16 OpzS 2000, pode-se verificar, que o sistema está a alimentar uma carga com uma potência de pico de 40 KW , permitindo alimentar vinte e quatro habitações unifamiliares com um perfil de consumo de classe baixa. Verifica-se que temos um espaço disponível para colocação de baterias de $7,72 \text{ m}^3$, onde se pretendem instalar 108 baterias do modelo referido anteriormente. O volume Total ocupado pelas 108 baterias é de $7,57 \text{ m}^3$, restando para instalação de baterias $0,15 \text{ m}^3$. Ou seja o espaço definido para instalação de baterias não é completamente utilizado, não existindo uma optimização do espaço existente.

No espaço reservado para o transporte de painéis, constata-se que não existe espaço suficiente para a instalação dos 60 KW necessários, sendo portanto necessário um volume extra de $4,09 \text{ m}^3$, no espaço dos painéis. Contudo apenas para efeitos de transporte o volume disponibilizado para o espaço de acesso às baterias pode ser aproveitado para colocação de

painéis. Logo consultando a figura 5.10 pode-se verificar que entre as duas prateleiras se tem um volume inocupado de $(4,900 \times 0,630 \times 1,2 = 3,7 \text{ m}^3)$ e ainda se tem um volume inocupado correspondente ao espaço de acesso à segunda prateleira de baterias $(4,900 \times 0,505 \times 1,2 = 2,97 \text{ m}^3)$. Ou seja no total temos um volume total extra para colocação de painéis no espaço das baterias de $3,7 + 2,97 = 6,67 \text{ m}^3$. Se cada painel fotovoltaico tem um comprimento de 1,2 metros e uma largura de 60 centímetros, e sendo que apenas possuímos uma área de 1,2 metros por 4,9 metros, então podem-se usar painéis de suporte de 1,2 metros de largura e 4,9 metros de comprimento. Assim conseguem-se colocar em cada painel de suporte extra 8 painéis fotovoltaicos, o que perfaz uma potência de 1800 W. No espaço intermédio entre as duas prateleiras de baterias tem-se um volume inocupado de $3,7 \text{ m}^3$, o que permite colocar 6 painéis de suporte nesse espaço, perfazendo uma potência extra de $6 \times 1800 = 10800 \text{ W}$. Fazendo os mesmos cálculos para o espaço de acesso correspondente à segunda prateleira de baterias verifica-se que se conseguem colocar 5 painéis de suporte, o que perfaz uma potência extra de 9000 W. No total pode-se possuir uma potência extra total fotovoltaica de $10800 + 9000 = 19800 \text{ W}$, no entanto para este cenário de consumo apenas se necessita de uma potência extra fotovoltaica de 15,45 KW e como tal está garantida a possibilidade de alimentação de 23 habitações utilizando-se esta bateria.

Quanto ao comportamento do sistema, verifica-se que possui uma percentagem de excesso de energia deveras elevada (2,0%).

Como foi explicado no subcapítulo 5.3, considerou-se uma capacity shortage máxima de 20%, verificando-se que a bateria da Rolls proporciona um valor de 20%.

Quanto à autonomia constata-se que é possível alimentar o sistema apenas a partir das baterias durante 25,8 horas.

No que diz respeito ao tempo de vida, a bateria da Rolls consegue funcionar sem necessitar de substituição durante 13,9 anos.

A grande desvantagem que a bateria da Hoppecke possui é de facto o peso, bastante superior quando comparado com o peso da outra bateria em estudo. Esta bateria possui um peso de 150 Kg existindo uma contribuição das baterias Rolls para o peso total do sistema de 16200 Kg.

Concluindo-se portanto que esta solução é uma solução viável, no entanto não se consegue uma optimização do espaço disponível no contentor, e como tal é necessário testar o comportamento do sistema para um número superior de habitações a alimentar.

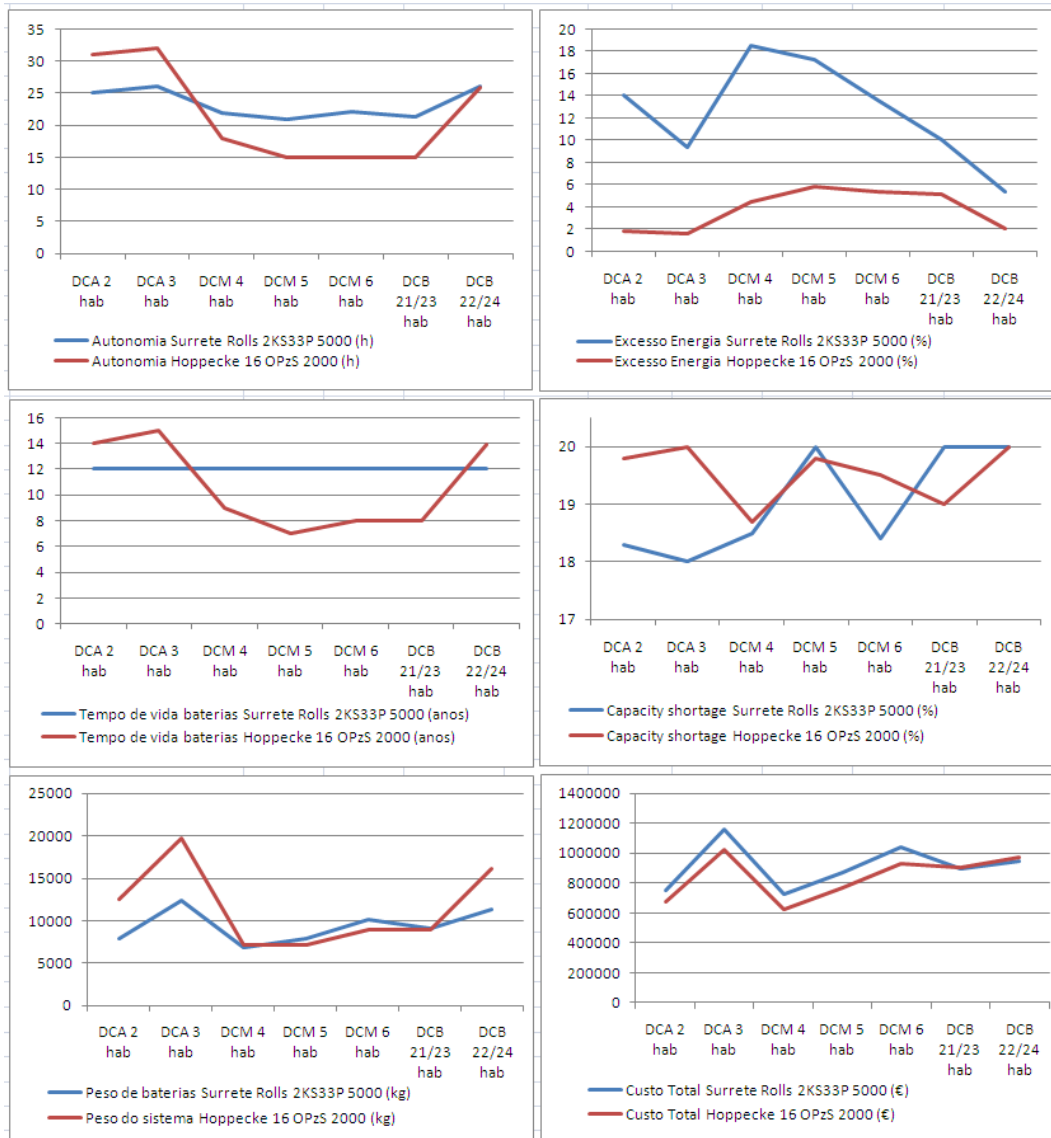
Contudo, o sistema foi testado para 25 habitações e verificou-se que já não existia espaço disponível para colocação de baterias, daí que 24 habitações, seja o máximo que o sistema poderá alimentar.

5.4.4 Conclusões

Através da análise efectuada, conseguiu-se apurar o número máximo de habitações passíveis de serem alimentadas por cada sistema, composto por diferentes tipos de baterias. A bateria Surrete Rolls 2KS33P 5000 será então o modelo escolhido para implementação neste projecto. A razão da sua escolha prende-se ao facto de logo à partida, as dimensões da bateria da Hoppecke, não permitirem de facto uma optimização do número de baterias a inserir no espaço reservado para o efeito no interior do contentor (O número máximo de baterias que poderiam ser colocadas no interior do contentor, garantindo os espaços apropriados para acesso às baterias seria de 72, enquanto que com a bateria escolhida se conseguem instalar nas mesmas condições 138 baterias). Contudo foi realizado um estudo de comparação entre as duas baterias, para demonstrar que de facto, não é apenas devido a essa problemática que se privilegia a bateria da Rolls, sendo que tecnicamente também é mais favorável a sua aplicação. E como tal verifica-se que se conseguem autonomias de funcionamento e simultaneamente tempos de vida das baterias também elas superiores. Contudo a desvantagem está no preço final do sistema, onde se verifica para todos os cenários de consumo, mais vantajosa a utilização da bateria da Hoppecke. A bateria da Rolls conduz a preços mais elevados. No entanto o modelo de bateria escolhido tem uma grande vantagem, que é o peso. Na medida em que são bastante mais leves que as baterias concorrentes.

Tabela 5.19 - Número máximo de habitações alimentadas para cada perfil de consumo

Tipo de consumidores	Nº máximo de habitações alimentadas
Consumidores Domésticos de classe Alta (DCA)	2
Consumidores Domésticos de classe Média (DCM)	5
Consumidores Domésticos de classe Baixa (DCB)	22



5.12 - Quadro resumo dos resultados dos testes efectuados (Análise comparativa)

5.5 Painéis fotovoltaicos utilizados

Não foi escolhido um painel específico, na medida em que os painéis existentes no mercado capazes de fornecer uma potência que ronda os 225 W necessitam de uma área de aproximadamente 1,5 m², o que não corresponde aos 0,7 m² considerados neste estudo. Sendo portanto necessário o desenvolvimento de novas tecnologias em painéis fotovoltaicos que consigam disponibilizar a potência pretendida com uma área mais reduzida. A razão pela qual foram considerados apenas 0,7 m², para a área de cada painel, foi o número de habitações passíveis de serem alimentadas pelo sistema. Considerando os painéis existentes

no mercado, a potência possível de colocar no interior do contentor fica severamente reduzida e consequentemente o número de habitações que o sistema pode de facto alimentar sai também ele bastante afectado, tornando o investimento num sistema deste tipo desinteressante. Fica portanto ao critério do investidor escolher um painel com as características de potência consideradas (225 W).

Realizando-se os cálculos, considerando-se a área de cada painel 1,5 m², verifica-se que se pode transportar no espaço reservado para os painéis apenas 20644 W. Mesmo aproveitando os espaços de acesso às baterias, conseguir-se-ia uma potência adicional de 5400+4500 = 9900 W. Perfazendo no total uma potência de 30544 W. Nos testes realizados este valor não permitiria abastecer o número de habitações em questão.

No software Homer Energy foram especificados valores para determinados parâmetros dos painéis que convém ser comentados. Nomeadamente, o preço de cada painel, o custo de manutenção dos painéis e o seu custo de substituição quando este atingir o tempo máximo de vida. Relativamente ao preço, realizou-se uma prospecção de mercado, verificando-se que actualmente os preços de painéis de 225 W estão compreendidos entre 800 e 1800 €, dependendo do tipo de tecnologia utilizada: painéis monocristalinos ou policristalinos. Apesar de não ser possível a utilização dos painéis actualmente existentes no mercado, prevê-se uma melhoria da tecnologia que permita utilizar a solução estudada neste projecto. Para se realizar uma estimativa de preço para esse modelo futuro foi realizada uma comparação entre alguns painéis existentes no mercado e pretendendo-se que este projecto seja algo inovador foram comparados painéis com índices de eficiência elevados para cada tipo de tecnologia (monocristalina e policristalina).

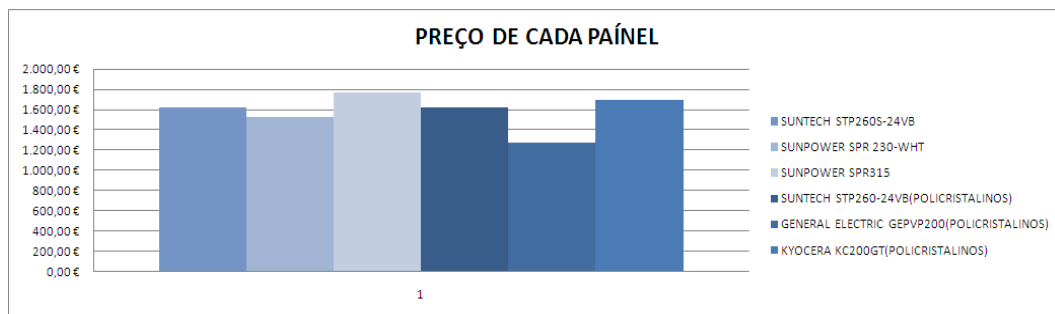


Figura 5.13 - Comparação do preço dos painéis

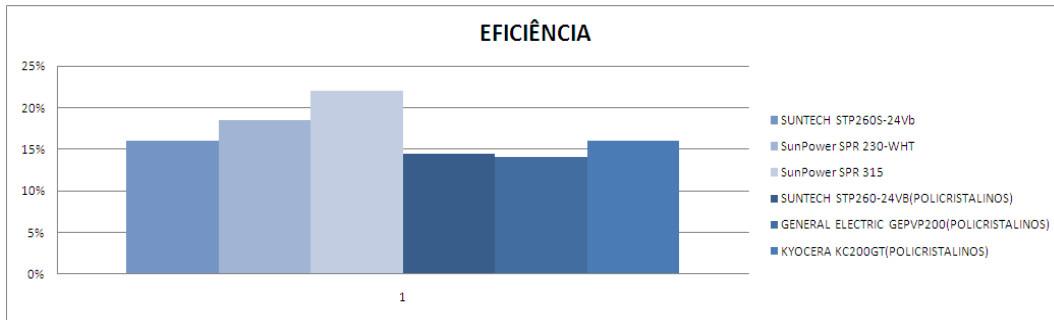


Figura 5.14 - Comparação da eficiência dos painéis

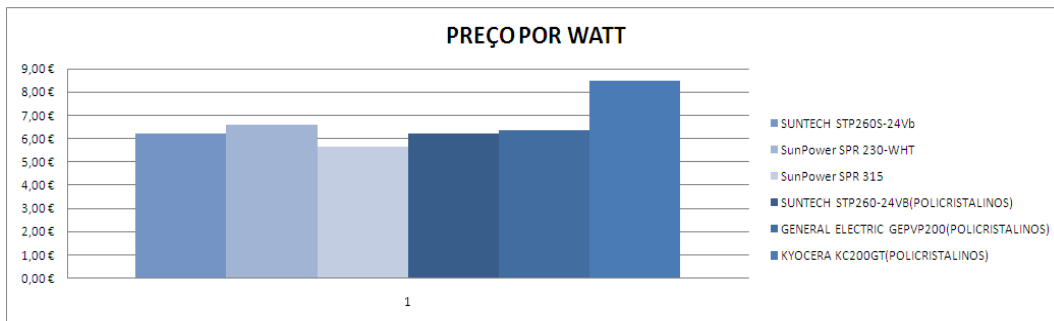


Figura 5.15 - Comparação do preço por Watt

Conclui-se portanto que em média o preço por Watt se encontra em 6,65 €. Portanto para um painel de 225 W tem-se um preço médio de aproximadamente 1500 €. Considerando que a tecnologia quando chegar ao mercado terá um preço mais elevado, considerou-se um preço de 1750 € por cada painel.

Relativamente ao custo de manutenção considerou-se um custo anual de 2500 €.

Relativamente ao custo de substituição do material considerou-se o mesmo valor que para o custo de investimento inicial.

Capítulo 6

6 Avaliação Final

6.1 Conclusões

Verificou-se que existe de facto espaço para a inserção no mercado de um sistema deste género, na medida em que existem necessidades evidentes no continente Africano, para a sua aplicação.

A sua aplicação, no caso de um sistema que se encontre ligado à rede está no entanto dependente da diferença de preços existente entre a energia proveniente das centrais convencionais e o preço da energia produzida pelo sistema fotovoltaico. Analisando os custos globais de uma central a carvão convencional, verifica-se que, entrando em linha de conta com custos de combustível, com o custo de investimento inicial em construção, custos de operação e manutenção, taxas de propriedade e taxas reguladoras, o custo total da central ronda os 30 €/MWh [36]. Para o sistema estudado neste trabalho e tomando como exemplo a alimentação das 22 habitações com um perfil de consumo de classe baixa, verifica-se uma produção diária de 257 KWh/dia. No entanto o preço final do sistema foi calculado fazendo-se uma análise durante um período de 25 anos. Logo a energia total produzida é de 2345125 KWh. O preço final deste sistema em particular é de 945199 €. Logo o preço por MWh, de forma que se consiga comparar com o preço da central a carvão convencional, é de $945199/2345125 = 403 \text{ €/MWh}$ (estando dentro dos valores referidos em [37]). Comparando apenas os custos de produção consegue-se verificar o porquê da ausência de investimentos em larga escala em soluções de produção dispersa. No entanto é necessário entrar em linha de conta com os investimentos que é necessário realizar em expansão de redes para se atingirem os consumidores isolados, tornando na maioria dos casos, este tipo de soluções a única hipótese a considerar. Outro pormenor que é importante salientar, é o custo de

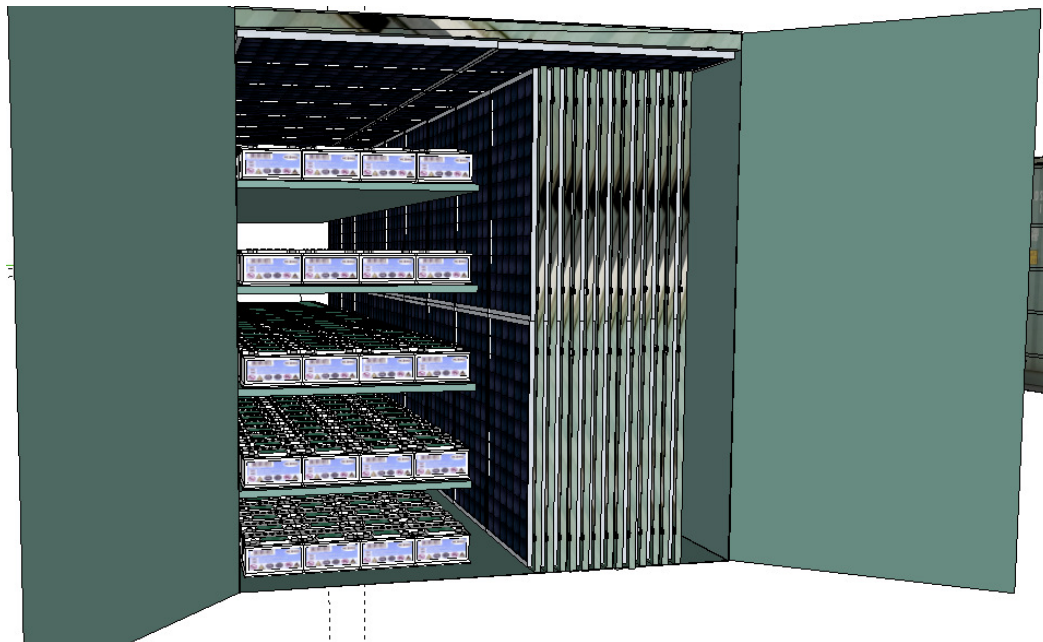
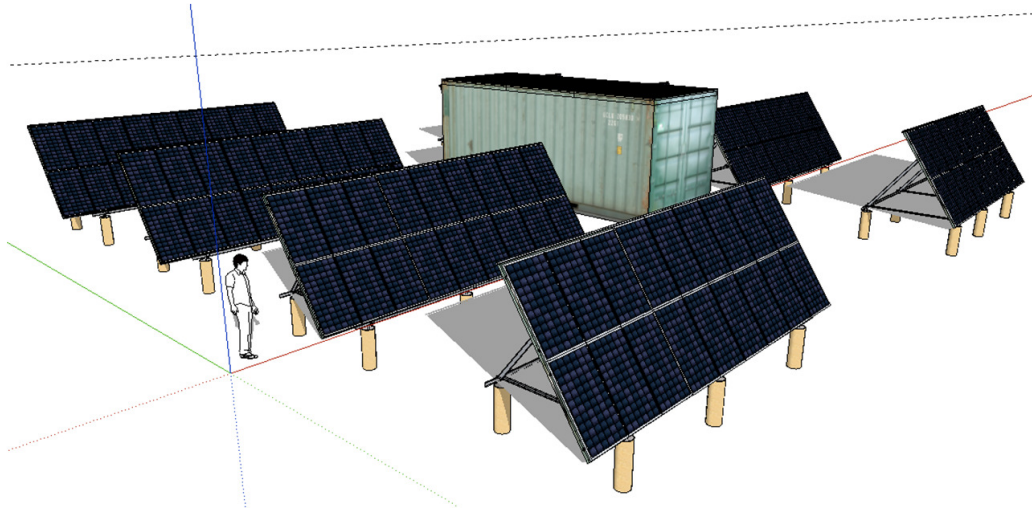
transporte dos contentores da europa até ao continente Africano. A título indicativo foi realizado um orçamento, simulando-se o transporte de um contentor do porto de Leixões, no distrito do Porto, Portugal, para a cidade do cabo. Nesta simulação entra-se em linha de conta com o transporte da fábrica até ao porto de Leixões em camião, seguindo até África em navio e finalmente realizando-se o transporte novamente em camião até à cidade do Cabo, na África do Sul. Os resultados do orçamento podem ser consultados no anexo B, concluindo-se que o custo total de transporte ronda os 2785 €.

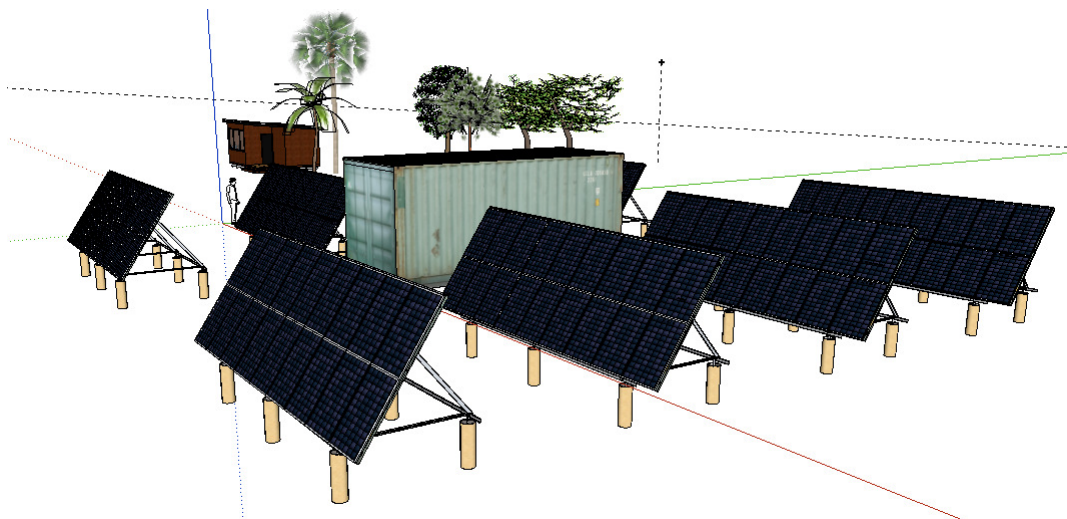
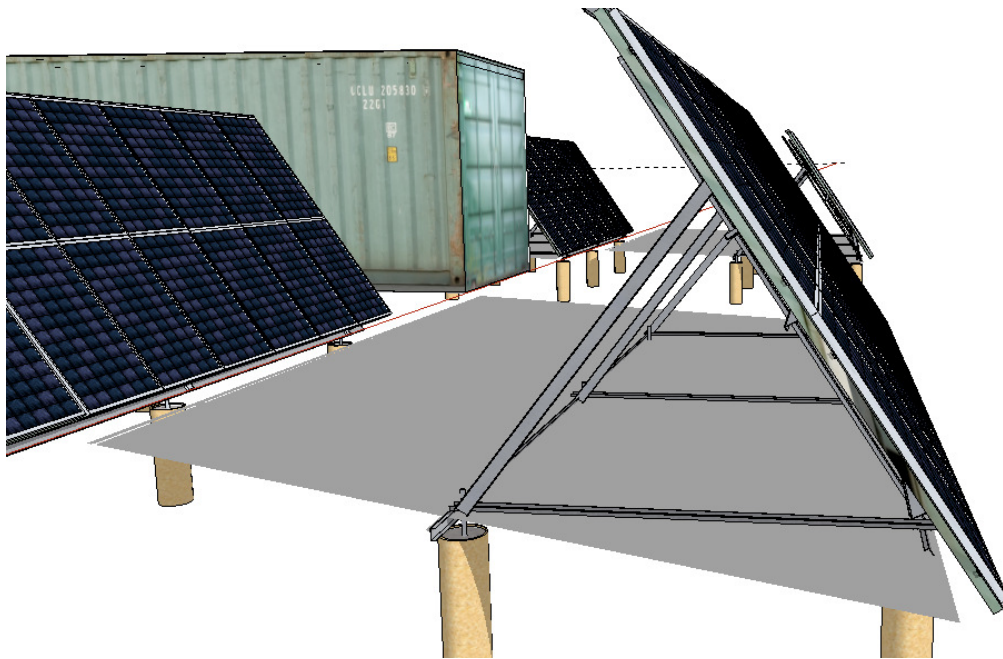
6.2 Trabalho a desenvolver no futuro

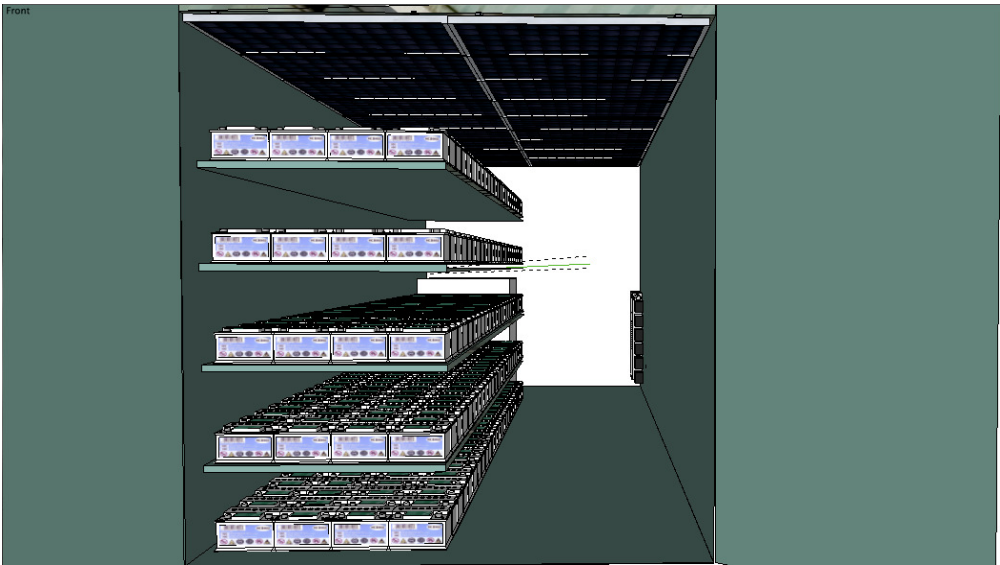
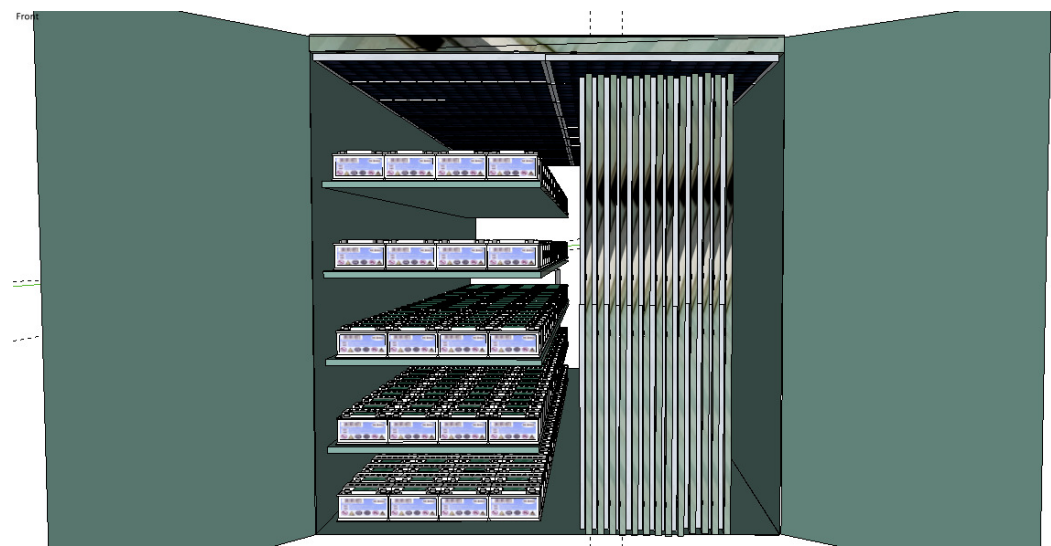
Existe de facto bastante trabalho que pode ser feito no futuro de forma a tornar a ideia subjacente a este projecto possível de implementar na realidade. Apesar de existirem inúmeros artigos que falem do comportamento das micro-redes, onde são explanados testes de simulação dinâmica para uma determinada arquitectura das mesmas, penso que todos os componentes do sistema deveriam ser modelizados em Matlab Simulink e que se deveria realizar uma análise dinâmica, de forma a comprovar se as metodologias de controlo de tensão e frequência funcionam de facto dentro dos parâmetros pretendidos. Simultaneamente, aquando do funcionamento em micro-rede, torna-se necessário contornar o problema de protecções existente através da verificação de resultados de simulação que permitam através da criação de vários cenários de defeito, encontrar os pontos fracos das protecções e consequentemente tentar encontrar uma solução final robusta.

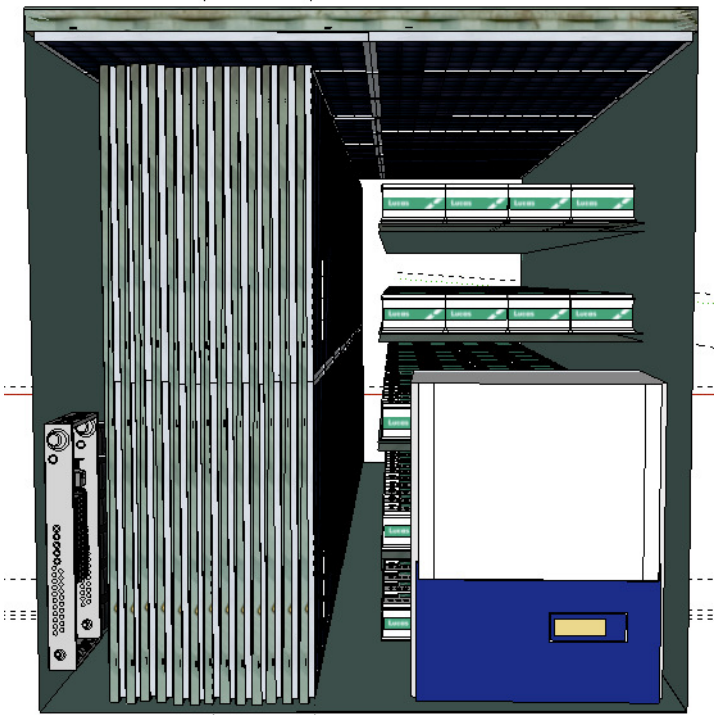
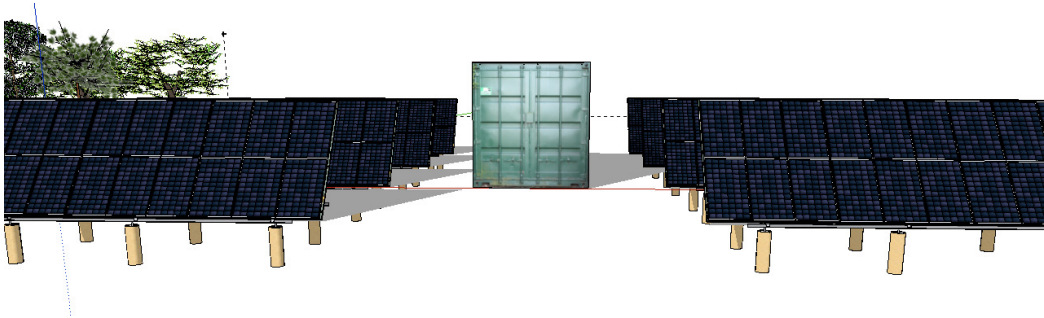
Relativamente aos inversores verificou-se que não existe nenhuma solução standard no mercado que permita realizar exactamente o pretendido e como tal existe espaço para o desenvolvimento da tipologia de inversores a utilizar.

Anexo A









Anexo B

Origem Portugal
Destino South Africa
Válido Desde 2010-06-24
Válido Até 2010-07-31
Trade Cape Town

Frete Marítimo

Taxa	Origem	Destino	Tempo de Trânsito	Moeda	20'	40'	40'HC	45'	Tipo	Unidade
FRETE	Leixoes	Cape Town		USD	1,300.00	-	-	-	Dry	Contentor

Adicionais de Frete

Taxa	Origem	Destino	Moeda	20'	40'	40'HC	45'	Tipo	Unidade
ISPS			USD	6.00	-	-	-	Dry	Contentor
BAF JUNHO			USD	400.00	-	-	-	Dry	Contentor
CONGESTION			USD	75.00	-	-	-	Dry	Contentor

Taxas Locais

Taxa	Origem	Destino	Moeda	20'	40'	40'HC	45'	Tipo	Unidade
THC			EUR	140.00	-	-	-	Dry	Contentor
TAXA DE PORTO			EUR	10.00	-	-	-	Dry	Contentor
TX SEGURANÇA			EUR	6.00	-	-	-	Dry	Contentor
SELO			EUR	20.00	-	-	-	Dry	Contentor
BL			EUR	65.00	-	-	-	Dry	B/L
CAMIONAGEM NUM RAIO DE 20 KM DO PORTO DE EMBARQUE			EUR	150.00	-	-	-	Dry	Contentor
DESPACHO			EUR	90.00	-	-	-	Dry	Documento
TAXAS LOCAIS NO DESTINO			ZAR	6,300.00	-	-	-	Dry	Contentor
DOCUMENTAÇÃO NO DESTINO			ZAR	250.00	-	-	-	Dry	B/L
CAMIONAGEM NO DESTINO			ZAR	1,550.00	-	-	-	Dry	Contentor

Esta oferta não pode ser considerada compromisso contractual até que a mesma seja previa e explicitamente aceite pelo cliente. As despesas não mencionadas na oferta não estão incluídas no preço. Esta oferta é válida unicamente para embarques pagos em Portugal e em moeda local (Euros). Os termos e condições estão sujeitos a eventuais alterações de BAF, CAF e outras sobretaxas. O frete será aplicado de acordo com a data de saída do navio ou do 'Gate In', segundo o armador. As despesas de 'Demurrage' e 'Detention' estão sujeitas a alterações por parte do armador sem aviso prévio.

Esperamos que esta cotação seja do seu interesse. Por favor não hesite em contactar-nos em caso de necessitar de algum esclarecimento ou informação adicional. A Damco providencia também uma vasta gama de serviços adicionais: carga aérea, despachos aduaneiros, grupagens, levantamentos, entregas, seguros de transporte e armazenagem das V mercadorias. Para mais informações sobre a nossa empresa e os serviços que lhe podemos oferecer, consulte a nossa página na Internet www.Damco.com. Todas as transacções estão sujeitas às normas da empresa (Standard Trading Conditions) e disponíveis em www.Damco.com ou a pedido do cliente.

Melhores Cumprimentos,

Ivone Azevedo
Inside Sales
DAMCO Logistics Portugal LDA
Email: ivone.azevedo@damco.com
Telefone: +351 229408308

Referências

- [1] C. Serra. (Janeiro de 2009, *África subsariana: 75% sem acesso à electricidade*. Available: <http://oficinadesociologia.blogspot.com/2009/01/frica-subariana-75-sem-acesso.html>
- [2] M. Cuambe, "Situação energética da África Austral," Presidente do conselho de administração da empresa Electricidade de Moçambique.
- [3] A. Ababa. (Fevereiro, 2010, *Europe to cooperate with Africa on smart grids proposal*. Available: <http://www.gas-metering.com/node/16975>
- [4] T. Woody. (Outubro, 2009, *Developing Countries Will Prove a Booming Solar Market, Industry Panelists Say*. Available: <http://green.blogs.nytimes.com/2009/10/28/developing-countries-will-be-a-booming-solar-market-industry-panelists-say/>
- [5] F. N. Gonesse. (2009, *Ligthning Africa - Solar Solutions Africa*. Available: <http://www.lightingafrica.org/members/detail/5451>
- [6] K. Fehrenbacher. (Fevereiro, 2010, *5 Reasons Why Developing Countries Need Smart Grids, Too*. Available: <http://earth2tech.com/2010/02/11/5-reasons-why-developing-countries-need-smart-grids-too/>
- [7] S. G. Africa. (2008. Available: <http://www.spintelligent-events.com/smart-grid-africa/en/index.php>
- [8] L. Kiesling. (Março, 2009, *Smart Grids and Renewables interconnection*. Available: <http://knowledgeproblem.com/2009/03/06/smart-grid-and-renewables-interconnection-part-4-of-5/>
- [9] D. Krotz, "Microgrids: reliable power in a small package," *Berkeley Lab - Science beat*, Fevereiro, 2003.
- [10] N. H. J.A.Peças Lopes, J.Mutalec, P.Djapicc, N.Jenkinsc (2006, *Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities*. Available: www.sciencedirect.com
- [11] (Fevereiro, 2009, *BPL GLOBAL/BPL AFRICA EXPANDS SMART GRID IN GHANA*. Available: <http://www.entrepreneur.com/tradejournals/article/192356064.html>

- [12] T. B. R. David Linden, "Handbook Of Batteries 3rd Edition," *McGraw-Hill*, 2002.
- [13] P. Ribeiro, "Optimização de estratégias de operação de sistemas híbridos," ed, 2009.
- [14] A. I. H. Ibrahim, J. Perron, "Energy storage systems—Characteristics and comparisons," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, 5 Janeiro 2007 2007
- [15] M. H. M. Jacqueline Biancon Copetti, "Baterias em Sistemas Solares Fotovoltaicos," 2007.
- [16] E.-E. S. Association. (2010. Available: <http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/>
- [17] D. V. A. Rosa, "Fundamentals of renewable energy processes," *Elsevier Academic Press*, 2005.
- [18] T.Bazouni, "Easymax solar energy MPPT (Solar Maximizers)," 2007.
- [19] T.Bazouni, "Solar Panel I/V curves (Extracting maximum power)," 2007.
- [20] D. S. Michael Sokolov, Member, IEEE, "A Modified MPPT Scheme for Accelerated Convergence ".
- [21] a. P.-C. H. Yaw-Juen Wang, "Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model," vol. World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2009.
- [22] VISHAY GENERAL SEMICONDUCTOR. Available: <http://www.element-14.com/community/docs/DOC-22519/l/physical-explanation--general-semiconductors>
- [23] S.-H. D. Chen-Wei Kuo, Fuh-Shyang Juang, Yu-Yu Ho "Solar Cell Module Installation Optimization and Evaluation of Power Conversion Simulation " 2009.
- [24] C. Monteiro, "Energia Solar Fotovoltaica - Aula 5 - Características e Dimensionamento de sistemas FV," 2010.
- [25] Kyocerasolar. (2010, *Modules*. Available: <http://www.kyocerasolar.com/solar/modules.html>
- [26] Wikipedia. (Junho, 2010, *Inverters*. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Inverter_\(electrical\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Inverter_(electrical))
- [27] SMA. (2010, *Sunny Backup System*. Available: <http://download.sma.de/smaprosa/dateien/2485/SBUPSYSTEM-KEN090415.pdf>
- [28] A. A. Robert Lasseter, Chris Marnay, John Stephens, , *et al.*, "Integration of Distributed Energy Resources - The CERTS MicroGrid Concept," 2002.
- [29] C. L. M. J. A. Peças Lopes, F. O. Resende. (Agosto, 2005, *MICROGRIDS BLACK START AND ISLANDED OPERATION*. Available: http://www.psc-central.org/uploads/tx_ethpublications/fp69.pdf
- [30] *Energy in your home*. Available: <http://www.capetown.gov.za/en/EnvironmentalResourceManagement/EnergyEfficiency/Documents/SLH%20energy%20audit%20pp%2044-47.pdf>

- [31] C. D. M. Monteiro. (1997, *Caracterização de consumos - Diagramas de carga*. Available: paginas.fe.up.pt/~cdm/DE2/DE2_A1b.pps
- [32] *Homer hybrid optimization model for electric renewables, version 2.75 beta*. U.S. National Renewable Energy Laboratory. Available: <http://homerenergy.com/>
- [33] Nasa. (2010, *Surface meteorology and Solar Energy*. Available: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [34] E. H. Limited. (2009, *Annual Report 2009*. Available: http://www.eskom.co.za/annreport09/ar_2009/downloads/eskom_ar_2009.pdf
- [35] T. Lambert, "Homer Energy Help Assistant," 2004.
- [36] "Title," unpublished |.
- [37] M. Amaral. (Março, 2010, *Vida Económica - A energia nuclear em Portugal*. Available: <http://www.aea.com.pt/site/pt/eco05.pdf>