

1 2



9 0

UNIVERSIDADE D COIMBRA

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Estudo Simulado do Funcionamento Estacionário de um Sistema de Energia Elétrica de Pequena Escala e com Elevada Disseminação de Renováveis Variáveis - Análise do Impacto do Uso de Armazenamento e Ações de Gestão da Procura

Fábio Joel Ribeiro Pessoa

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores, na especialização de Energia, orientado pelo Professor Doutor Álvaro Filipe
Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes.

fevereiro de 2020



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Estudo Simulado do Funcionamento Estacionário de um
Sistema de Energia Elétrica de Pequena Escala e com
Elevada Disseminação de Renováveis Variáveis - Análise
do Impacto do Uso de Armazenamento e Ações de Gestão
da Procura**

Fábio Joel Ribeiro Pessoa

Orientador: Professor Doutor Álvaro Filipe P. C. de Oliveira Gomes

Presidente: Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Vogal: Professora Doutora Dulce Helena Carvalho Coelho

Coimbra, fevereiro de 2020

Este trabalho teve apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito dos projetos T4ENERTEC (POCI-01-0145-FEDER-029820), MAnAGER (POCI-01-0145-FEDER-028040) e UID/MULTI/00308/2020.

This work has been supported by the European Regional Development Fund through the COMPETE 2020 Program and FCT, under projects UID/MULTI/00308/2020, T4ENERTEC (POCI-01-0145-FEDER-029820), and MAnAGER (POCI-01-0145-FEDER-028040).

Agradecimentos

O trabalho aqui desenvolvido representa o fim de uma etapa que durou cinco anos. Foi um caminho que nem sempre foi fácil, por vezes com vontade de desistir mas, com a ajuda de professores, pais e amigos se tornou muito mais fácil.

Em primeiro lugar agradecer a oportunidade que os meus pais me deram em poder realizar este curso. Por mais que tente, nunca poderei compensar todo o esforço que fizeram para ter sempre tudo aquilo que precisei ao longo destes anos. A eles, muito obrigado!

Em segundo lugar agradecer aos que me acompanharam ao longo destes anos. Aos meus companheiros de sempre: Daniel, Rúben, João Pedro e Marcelo, obrigado por tudo! Certamente não esquecerei os momentos que passámos nesta vida académica.

Por último e não menos importante, resta-me agradecer a todos os professores que se cruzaram comigo e em especial ao meu orientador, Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes, por todos os conselhos e ferramentas disponibilizadas ao longo do trabalho.

A todos,

Muito Obrigado.

Resumo

Os estudos relacionados com os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) são de extrema importância, pois a crescente aposta em fontes de energia renovável traz consigo novos desafios para as redes, em termos de segurança e fiabilidade, devido às características inerentes a este tipo de geração "limpa". Quando se trata de redes isoladas, a disseminação de geração baseada em renováveis é ainda mais desafiante.

A presente dissertação tem como objetivo analisar, com recurso a simulação, o comportamento de um pequeno SEE perante uma forte penetração de renováveis (solar e eólica). Por outro lado, pretende-se também saber até que ponto ações de gestão da procura ou uso de armazenamento químico podem ter influência positiva, no funcionamento desse SEE, em regime estacionário. Para isso, identificou-se uma série de cenários de simulação, em termos de penetração de renováveis, de ações de gestão da procura e de armazenamento, permitindo assim escrutinar e perceber a maior ou menor influência da utilização das técnicas mencionadas para diferentes casos que possam ocorrer ou vir a ocorrer no sistema, com vista à sua possível implementação. A ênfase da análise foi o regime estacionário do SEE, tendo-se considerado, na construção dos cenários, alternativas de utilização dos recursos, incluindo a geração térmica existente.

Conclui-se com a realização deste trabalho que ações de gestão da procura e o uso de armazenamento trazem benefícios para o SEE. Através do uso do armazenamento demonstra-se a possibilidade de utilizar de forma mais eficiente os grupos geradores da central térmica. Foi também possível aumentar a utilização das renováveis (solar e eólica), reduzindo o *curtailment*, recorrendo para isso ao armazenamento e ações de gestão da procura. Contudo, as baterias até agora instaladas e usadas nas simulações apresentaram algumas limitações ao nível da capacidade de armazenamento. Deverá ser feita uma análise económica sobre a possibilidade de aumentar a capacidade de armazenamento, tendo em vista a crescente aposta nas renováveis do SEE em questão. Com a utilização da carga controlável, provou-se que é possível suavizar as flutuações resultantes da introdução de fontes de energia renovável intermitentes, reduzindo desta forma algumas perdas associadas.

PALAVRAS-CHAVE: Energias Renováveis, Gestão de Carga, Armazenamento, Fluxos de Potência, Sistemas de Energia Elétricos (SEE).

Abstract

Studies related to power systems are extremely important, as the growing investment in renewable energy sources brings new challenges for the networks, in terms of safety and reliability, due to the characteristics inherent to this type of "clean" generation. When it comes to isolated networks, the spread of generation based on renewables is even more challenging.

This dissertation aims to analyze, using simulation, the behavior of a small power system in the face of a strong penetration of renewables (solar and wind). On the other hand, it is also intended to know the extent to which demand management actions or the use of chemical storage can have a positive influence on the functioning of this power system, in a steady state. For this, a series of simulation scenarios were identified, in terms of penetration of renewables, demand management and storage, thus allowing to scrutinize and perceive the greater or lesser influence of the use of the mentioned techniques for different cases that may occur or will occur in the system, with a view to its possible implementation. The emphasis of the analysis was the steady state, having considered, in the construction of the scenarios, alternatives for the use of resources, including the existing thermal generation.

It is concluded with this work that demand management actions and the use of storage bring benefits to the power system. The use of storage demonstrates the possibility of using the generating sets of the thermal power plant more efficiently. It was also possible to increase the use of renewables (solar and wind), reducing curtailment, using storage and demand management actions for this. However, the batteries installed and used in the simulations so far have had some limitations in terms of storage capacity. An economic analysis should be made on the possibility of increasing storage capacity, in view of the growing investment in renewables in the power system in question. With the use of controllable load, it has been proved that it is possible to smooth out fluctuations resulting from the introduction of intermittent renewable energy sources, reducing some associated losses.

KEYWORDS: Renewable Energy, Load Management, Storage, Power Flows, Power Systems

Conteúdo

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Acrónimos e Abreviaturas	1
1 Introdução	3
1.1 Contextualização	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 Estado da Arte	7
2.1 <i>Curtailement</i> de Geração Renovável	7
2.1.1 Gestão de Carga e Armazenamento	8
2.1.1.1 Gestão de Carga	8
2.1.1.2 Armazenamento	10
2.2 Critérios de Segurança e de Funcionamento dos SEE	11
2.3 Requisitos de Ligação à Rede para a Energia Eólica	13
3 Caracterização do Caso de Estudo	15
3.1 Geografia e Demografia de Porto Santo	15
3.2 Sistema de Energia Elétrica	15
3.2.1 Caracterização da Carga	17
3.2.2 Caracterização e Parametrização da Geração	20
3.2.2.1 Geração Térmica	20
3.2.2.2 Geração Eólica	21
3.2.2.3 Geração Fotovoltaica	21
3.3 Montagem e Parametrização do SEE base no <i>PowerWorld</i>	22

3.3.1	Diagrama Unifilar e Características dos Elementos Constituintes da Rede	22
4	Time Step Simulation	25
4.1	Simulação/Validação da Rede Base Implementada no <i>PowerWorld</i>	25
4.2	Central Dessalinizadora Como Carga Controlável	30
4.2.1	Simulação de Possíveis Cenários de Operação da Central Dessalinizadora	33
4.3	Aumento da Penetração de Fontes de Energia Renovável	37
4.3.1	Integração de Armazenamento no SEE de Porto Santo	40
4.3.1.1	Armazenamento do Excesso de Renovável	42
4.3.1.2	Melhoria de Eficiência dos Grupos Geradores da Central Térmica	42
4.3.1.3	Uso de Armazenamento em Conjunto com o Controlo da Central Dessalinizadora	45
5	Conclusões e Trabalho Futuro	49
5.1	Conclusões	49
5.2	Trabalho Futuro	50
	Bibliografia	51
	Anexos	55

Lista de Figuras

2.1	Simulação Experimental de Cargas Controláveis Usando Smart Meters [8]	9
2.2	Aplicação de Armazenamento para Suavização de Diagramas de Carga [10]	10
3.1	Mapa/Localização Ilha de Porto Santo	15
3.2	Rede de Transporte (a) e Distribuição MT (b) em Porto Santo (2018) [21]	17
3.3	Pontas Mensais dos Últimos Anos [21]	18
3.4	Diagramas de Carga por estação do ano e por fonte de energia primária [21]	18
3.5	Diagrama de Carga por estação do ano [21]	19
3.6	Diagramas de Carga Típicos nas Subestações por Estação do Ano [21]	19
3.7	Diagrama Unifilar - Porto Santo	22
4.1	Carga simulada por subestação	26
4.2	Geração Eólica (a) e PV (b) para a semana de agosto simulada	26
4.3	Geração térmica de um grupo semanal (a) e de um dia (b) para a semana de agosto simulada	27
4.4	Geração Térmica Total e Produção Renovável semanal (a) e de um dia (b) para a semana de agosto simulada	27
4.5	Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 30 kV	28
4.6	Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 6.6 kV	28
4.7	Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 30 kV (slack bus a 1,05 p.u.)	29
4.8	Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 6.6 kV (slack bus a 1,05 p.u.)	29
4.9	Perdas nas linhas da rede para o primeiro dia de simulação	29
4.10	Princípio de Funcionamento da Osmose Inversa [24]	30
4.11	Etapas do Processo de Osmose Inversa [24]	30
4.12	Cenário de Funcionamento da Central Dessalinizadora sem controlo	33
4.13	Cenário de Funcionamento Diário da Central Dessalinizadora com controlo	34

4.14	Cenário de Funcionamento Semanal da Central Dessalinizadora com controlo	35
4.15	Cenário de Funcionamento Semanal da Central Dessalinizadora sem controlo	35
4.16	Variação Detalhada das Áreas a Cinzento das Figuras 4.14 e 4.15	35
4.17	Perdas ativas na rede com controlo (a) e sem controlo (b) da central dessalinizadora	36
4.18	Geração Térmica Para um Grupo Para a Semana Simulada	36
4.19	Perfis de Tensão Para os Barramentos a 6.6 kV (a) e Para os Barramentos a 30 kV (b)	37
4.20	Diagrama Unifilar Com Mais Geração Renovável - Porto Santo	38
4.21	Geração Renovável para a semana simulada	38
4.22	Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 30 kV	39
4.23	Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 6.6 kV	39
4.24	Extrato de Dados Sobre a Corrente	39
4.25	Geração Térmica semanal (a) e de um dia (b) para a semana de simulada	40
4.26	Exemplo de um dia com excesso renovável e seu armazenamento	42
4.27	Consumo Específico dos Geradores da Central Térmica	43
4.28	Carga, Geração Renovável e Utilização de Bateria para um dia	44
4.29	Geração térmica para o dia simulado	44
4.30	Estado de Carga (SoC) da bateria para o dia simulado	44
4.31	Perfis de Tensão Para os Barramentos de 30 kV (a) e Perfis de Tensão Para os Barramentos de 6,6 kV (b) Para o Dia Simulado	45
4.32	Esquema Completo dos Recursos do SEE da Ilha de Porto Santo [31]	46
4.33	Exemplo - semana de maio - Dados da Carga Base, Geração Renovável e P_{dif}	47
1	Diagrama de Blocos do modelo GENSAL	55
2	Diagrama de Blocos do modelo IEEEET1	56
3	Diagrama de Blocos do modelo DEGOV1	57
4	Diagrama de Blocos do Controlador da Resistência Rotórica	60
5	Diagrama de Blocos do Modelo do Veio das Turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47	60
6	Diagrama de Blocos do Modelo Aerodinâmico das Turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47	61

Lista de Tabelas

3.1	Quadro-Resumo do Sistema Eletroprodutor de Porto Santo, 2018 [21]	16
3.2	Potência Instalada/Transformadores nas Subestações [21]	16
3.3	Cargas Máximas Verificadas nas Subestações [21]	17
3.4	Características das Linhas [21]	23
3.5	Características dos Transformadores [21]	23
4.1	Resumo das Características da Central Dessalinizadora de Porto Santo	31
1	Características técnicas dos grupos electrogéneos da Central Térmica do Porto Santo	55
2	Parâmetros dos geradores síncronos - Central Térmica do Porto Santo	56
3	Dados dos reguladores de tensão - Central Térmica de Porto Santo	57
4	Dados dos reguladores carga-velocidade - motores de combustão interna de Porto Santo	58
5	Dados do Gerador Eólico (Rotor Bobinado) Vestas V-47	59
6	Parâmetros do Controlador da Resistência Rotórica da Turbina Vestas-V47	60
7	Parâmetros do modelo do veio das turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47	61
8	Parâmetros do modelo aerodinâmico das turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47	61
9	Dados dos Geradores Eólicos (Indução Rotor em Gaiola) Vestas V-29	62

Acrónimos e Abreviaturas

AREAM Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira.

EEM Empresa de Eletricidade da Madeira.

ENTSO-E *European Network of Transmission System Operators for Electricity.*

HAN *Home Area Network.*

PT Posto de Transformação.

PW *Power World.*

RNT Rede Nacional de Transporte.

RRT Regulamento da Rede de Transporte.

SEE Sistema de Energia Elétrica.

TSO *Transmission System Operator.*

TSS *Time Step Simulation.*

Capítulo I. Introdução

I.1 Contextualização

A disseminação de fontes de energia renovável tem aumentado bastante ao longo dos últimos anos, um pouco por todo o mundo, influenciada por fatores económicos e ambientais. A produção de energia elétrica em centrais convencionais que utilizam como fontes de energia primária combustíveis fósseis, tais como carvão ou gás natural, tem a desvantagem, quando comparada com a produção baseada em renováveis, de poluir o ambiente e consequentemente contribuir para alterações climáticas, bem como utilizar recursos que são limitados ou não renováveis.

Na Europa, a integração de fontes renováveis de energia tem sido intensamente estimulada com o intuito de alcançar metas estabelecidas pelos governos, de modo a reduzir a emissão de gases com efeito de estufa, os quais contribuem para o aquecimento global. Em 2009, a União Europeia estabeleceu uma meta, a atingir até 2030, na qual 33% da geração de energia elétrica será feita através de fontes de energia renováveis e que até 2050 essa percentagem passará a 100% [1]. Atualmente, de entre todas as formas de gerar energia a partir de fontes renováveis, destacam-se a energia eólica, hídrica e a energia solar fotovoltaica.

Contudo, como resultado da cada vez mais rápida penetração de geração renovável variável, surgem desafios no que diz respeito à manutenção da estabilidade do SEE, nomeadamente quando ocorrem desequilíbrios de potências. Isto acontece porque o tipo de geração que tem sido mais integrado (energia eólica ou energia solar fotovoltaica) ou não tem inércia associada (solar fotovoltaica), ou tendo (energia eólica), esta encontra-se total ou parcialmente desacoplada da rede por eletrónica de potência. Para além disso, a variabilidade associada à geração renovável é outro factor desafiante no que toca à gestão dos sistemas de energia elétrica e, por isso, é necessário encontrar formas que permitam colmatar essa variabilidade. As duas formas de atuação, no sentido de mitigar tais efeitos, passam por recorrer ao armazenamento de energia e ações de gestão da procura.

Neste trabalho serão analisadas e estudadas algumas estratégias que permitam verificar a viabilidade e o impacto da utilização do armazenamento e de ações de gestão de carga num SEE isolado. Com recurso a um *software* específico, será possível analisar o comportamento do SEE para diferentes cenários de utilização e disponibilidade dos diversos recursos existentes.

1.2 Objetivos

Como o próprio título deste trabalho indica, a motivação para a realização desta investigação é analisar o funcionamento de um SEE de pequena escala com baixa inércia (grande disseminação de renováveis variáveis) e avaliar o impacto da utilização de ações de gestão da procura e utilização de armazenamento no funcionamento em regime estacionário do SEE. Para isso, considerar-se-á como caso prático a análise do sistema elétrico da ilha de Porto Santo, localizada no arquipélago da Madeira, cuja geração elétrica se baseia numa central térmica, parques eólicos e sistemas fotovoltaicos [2].

No caso de sistemas isolados, sem qualquer interligação com outros sistemas elétricos, como é o caso da ilha de Porto Santo, a operação de sistemas elétricos de energia com elevada disseminação de renováveis variáveis pode ser ainda mais desafiadora, porque, além da baixa inércia, tais sistemas não podem contar com sistemas vizinhos com que troquem potência/energia em períodos de escassez ou de excesso relativamente às suas necessidades. Tal pode contribuir para que o investimento em renováveis variáveis seja ainda mais difícil de rentabilizar, pelo menos acima de um determinado nível de satisfação da procura, devido a potenciais situações de *curtailment* e também à necessidade de ter acautelados períodos de inexistência das fontes primárias renováveis. Em caso de ilhas, é necessário ter em conta também os fatores económicos associados à geração de energia elétrica, particularmente relacionados com o transporte de combustível, que levam a apostar em força nos sistemas de geração renovável. Os desafios que se avizinham serão criar condições que permitam acomodar as características intrínsecas da produção renovável, tais como a sua variabilidade e possível não coincidência entre a produção e o consumo de energia elétrica.

Pelo exposto, será objetivo desta dissertação recorrer a simulações do uso de armazenamento (nomeadamente baterias) e ações de gestão de carga, de modo a verificar e avaliar a sua utilidade em termos de operação do sistema. Estes sistemas de armazenamento e as ações de gestão da carga podem vir a ser implementados, ou expandidos, no caso do armazenamento, permitindo integrar um maior número de fontes de geração renovável e apoiando e melhorando a operação destes pequenos sistemas elétricos.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho aqui apresentado encontra-se dividido em cinco capítulos. Para além deste capítulo introdutório, existem ainda mais quatro capítulos. O segundo capítulo é destinado ao estado da arte, onde se apresentam não só os conceitos fundamentais à compreensão do tema da dissertação mas

também uma análise do que está a ser feito acerca desta temática. O terceiro capítulo é reservado à caracterização da ilha de Porto Santo e, em especial, à caracterização dos diferentes elementos que constituem o SEE da ilha. É também neste capítulo que se implementa o SEE no *software* utilizado. No quarto capítulo apresentam-se as simulações e discussões de vários casos de estudo, diferentes do caso base, utilizando o *Time Step Simulation* (TSS), disponibilizado pelo *software*. Por último, no quinto capítulo desenvolvem-se as conclusões e são apresentados possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2. Estado da Arte

2.1 Curtailment de Geração Renovável

Um pouco por todo o mundo, influenciado por questões ambientais, assiste-se a um aumento da introdução de geração baseada em fontes renováveis, como já foi frisado. Contudo, esta forma de gerar energia apresenta uma enorme variabilidade e não é despachável, só existindo produção de energia quando as fontes primárias de energia forem suficientes. Estas oscilações na disponibilidade das fontes primárias determinam a intermitência associada a este tipo de geração [3]. Para além da variabilidade, outro problema associado à produção renovável é a não coincidência entre a geração de energia e a procura, em alguns períodos do dia.

Atualmente, em grandes SEE interconectados, a intermitência associada à geração renovável variável está a ser mitigada sem grandes problemas. Já quando se trata de pequenos SEE isolados, que não estão interligados a outros SEE, a intermitência já é considerada como um obstáculo a ultrapassar, porque não há qualquer troca de energia/potência com outro SEE, em caso de necessidade ou utilidade para a operação do sistema. Por vezes acontece que, quando o nível de penetração de renováveis é elevado, relativamente à capacidade instalada de geração convencional, os operadores de sistema são obrigados a recorrer ao chamado *curtailment* das renováveis, isto é, à limitação da sua produção. Isto acontece quando se encontram restrições operacionais no sistema, devido à elevada produção renovável, forçando os operadores de sistema a aceitarem menos geração renovável do que a disponível [4].

As restrições operacionais podem ser devidas a vários factores. Uma razão para a qual se pode recorrer ao *curtailment* é a instalação de turbinas eólicas ou painéis fotovoltaicos sem aumentar a capacidade de transmissão necessária ao transporte de energia gerado, o que leva à limitação de produção por parte destes geradores. Outro motivo, é a obrigação das centrais térmicas fornecerem reservas a descer. Quando a produção renovável é alta, os grupos térmicos encontram-se a gerar próximo do seu limite mínimo, podendo ser necessário aumentar o seu nível operacional de modo a ter reserva descendente suficiente. Este aumento faz-se, realizando o *curtailment* das renováveis. Existem ainda as questões de estabilidade que podem justificar o *curtailment* durante algumas contingências [4].

O grande problema do uso da técnica do *curtailment* é o desperdício de energia com origem em fontes renováveis, provocando o desaproveitamento dos recursos renováveis existentes. A não utilização desses recursos, na sua totalidade, irá disparar o período de retorno dos investimentos e os benefícios ambientais irão diminuir drasticamente [5].

Os autores de [4] fizeram um estudo em vários países do mundo acerca do *curtailment*, incluindo Portugal, onde explicam como e quando é realizado o *curtailment* em cada local e quais são as implicações em termos económicos, resultantes do uso desta técnica.

De modo a reduzir o *curtailment* surgem o armazenamento e as ações de gestão da carga. O armazenamento é capaz de balancear e suavizar as flutuações tanto da lado da geração como do lado da procura, bem como compensar o efeito da intermitência [5]. O controlo de algumas cargas, em sistemas isolados, pode ser outra estratégia capaz de evitar o *curtailment* de modo a rentabilizar o máximo possível todos os investimentos realizados em geração baseada em energias renováveis. Nas secção 2.1.1 apresenta-se de forma mais detalhada cada uma destas técnicas.

2.1.1 Gestão de Carga e Armazenamento

A utilização de armazenamento e ações de gestão de carga são apontadas por várias investigações como possíveis soluções capazes de participar na melhoria das condições de funcionamento das redes isoladas com elevada penetração de energia renováveis [6], [7].

2.1.1.1 Gestão de Carga

Uma das possíveis soluções que permite maximizar a utilização de recursos renováveis em sistemas isolados está relacionada com o conceito de gestão de carga. No caso desta investigação, o principal interesse deste conceito está relacionado com o facto de cargas controláveis poderem ser utilizadas para suavizar as flutuações existentes nos SEE devido à procura e à introdução de fontes de energia renováveis intermitentes e, sobretudo, à minimização da sua não utilização.

Com o controlo de carga, é também possível contribuir para a manutenção da frequência dentro de limites de operação normais, até que sejam ativadas as reservas que assegurem a sua manutenção em regime permanente. Assim, podem-se mobilizar grupos de arranque lento, que operam com menores custos e de forma mais eficiente em vez dos grupos mais rápidos e caros.

É natural que para a aplicação destes conceitos seja necessário uma infraestrutura sólida de comunicações bidirecional entre os consumidores e os operadores de rede. Passam assim a existir

equipamentos (os chamados *smart meters*) nas instalações dos consumidores que permitem troca de informações (preços, medições de energia), assim como enviar sinais para controlo de cargas [8]. Existindo estes equipamentos, é possível desligar equipamentos durante situações de emergência do sistema, de forma a restabelecer o equilíbrio entre a geração e o consumo.

Os autores de [8] fizeram um estudo acerca de cargas domésticas controláveis, tendo obtido resultados interessantes e positivos relativamente ao fornecimento de resposta primária de frequência usando *smart meters*. Na figura 2.1 está representada a simulação por eles realizada, podendo servir como protótipo para uma escala maior.

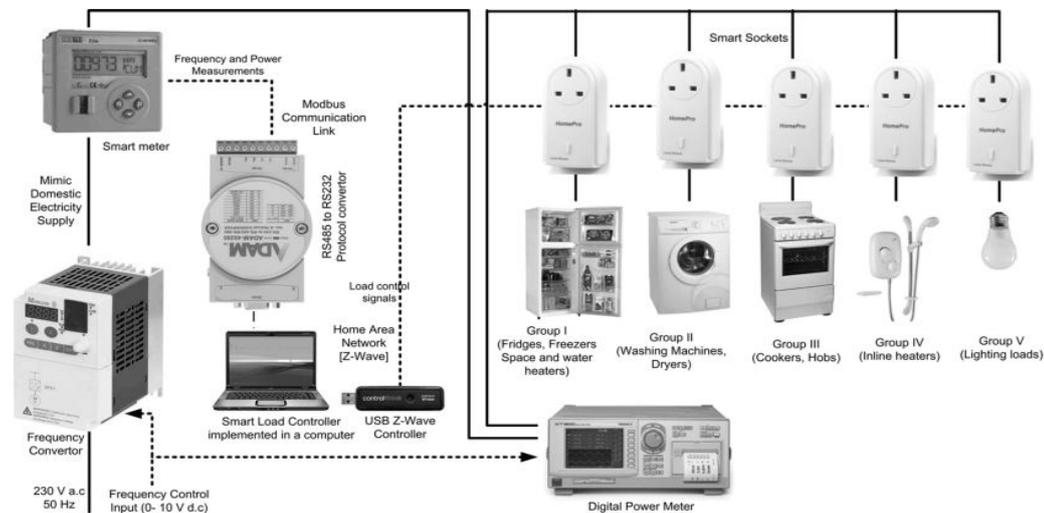


Figura 2.1: Simulação Experimental de Cargas Controláveis Usando Smart Meters [8]

Nesta implementação, o *smart meter* permite medir a frequência do sistema e armazenar esse valor no seu registo interno. O controlador de carga, implementado no computador representado, lê a frequência. Através de um algoritmo executado pelo computador e com base na frequência lida, este decide quando ligar ou desligar as cargas, enviando sinais para os *smart sockets* através de uma rede *Home Area Network* (HAN). O conversor de frequência serve apenas para imitar as variações de frequência de um sistema elétrico.

Tal como na investigação acima citada, pretende-se verificar se ações de gestão de carga terão influência no sistema com baixa inércia natural em estudo e, em especial, perceber se o operador de sistema pode ganhar alguma flexibilidade através de uma qualquer carga com potencial para ser controlada.

2.1.1.2 Armazenamento

O armazenamento de energia elétrica converte a energia elétrica numa forma possível de ser armazenada e posteriormente pode convertê-la novamente em energia elétrica, quando necessário. Em sistemas completamente isolados e relativamente pequenos, com elevada penetração de geração renovável, pequenas perturbações de carga podem ter efeitos consideráveis no valor de frequência do sistema e a intermitência associada à geração não convencional pode trazer alguns problemas aos SEE [9]. Para além disso, é perfeitamente natural que à medida que se aumenta a disseminação de renovável variável, haja situações de produção renovável superior à procura, o que poderá levar a situações de *curtailment*. Uma alternativa para a resolução destes problemas é a utilização do armazenamento. Estes sistemas podem participar na regulação primária de frequência, contribuindo para a manutenção da estabilidade do sistema. Para além da frequência, o armazenamento pode injetar potência reativa e fazer o controlo de tensão. Além da regulação das variáveis de controlo, os dispositivos de armazenamento podem armazenar energia durante um período de baixa procura e fornecer essa energia armazenada num período onde essa procura se maximize, tal como representado na figura 2.2 [10]. Deste modo, a utilização desta tecnologia encoraja o investimento em fontes renováveis, uma vez que permite mitigar a variabilidade de produção associada a esta forma de geração de energia e o seu potencial desperdício [11].

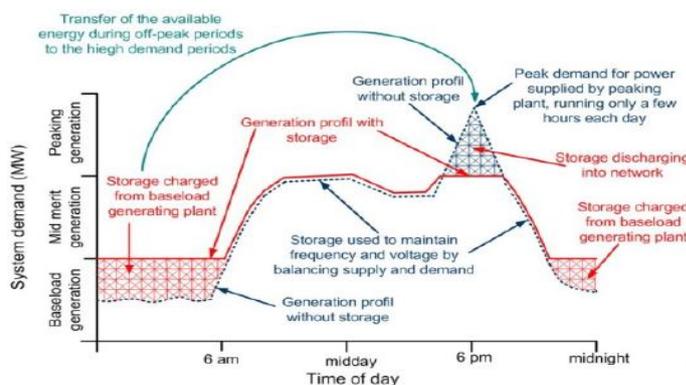


Figura 2.2: Aplicação de Armazenamento para Suavização de Diagramas de Carga [10]

As baterias ligam à rede através de conversores de eletrónica de potência, podendo variar o seu ponto de funcionamento de plena carga ao vazio ou do vazio à plena carga em segundos [12]. A rápida variação de potência, resultante das características inerentes a estes sistemas, possibilitam efetuar uma célere reposição do serviço após a ocorrência de algum evento. Todos os benefícios da utilização de armazenamento podem ser ainda potenciados com a utilização conjunta de técnicas de gestão de carga.

Relativamente aos grupos térmicos, o armazenamento tem a vantagem de ser mais rápido na sua atuação e permite tanto injetar como absorver potência. No entanto, estes sistemas têm também desvantagens. O seu processo de carga/descarga apresenta perdas, a sua capacidade de absorver ou injetar potência está sempre dependente do seu estado de carga e a sua capacidade de armazenar energia vai sendo degradada ao longo do tempo. Todos estes contras tornam, por vezes, o investimento neste tipo de tecnologia pouco viável. Porém, com os desenvolvimentos recentes das tecnologias existentes, a aposta em massa neste tipo de equipamentos será uma realidade [13].

Existem atualmente diversas formas de armazenar energia, no entanto, nesta dissertação, apenas serão usadas para simulação baterias (armazenamento químico).

2.2 Critérios de Segurança e de Funcionamento dos SEE

Para se poder caracterizar o estado de funcionamento em que o sistema elétrico se encontra, existem as chamadas variáveis de controlo de segurança. São elas [14]:

- As tensões nos nós da rede;
- A frequência do sistema;
- Os níveis de carga nos diferentes elementos da rede;
- As reservas de regulação.

Identificadas as variáveis de controlo, os SEE podem-se encontrar num de 4 estados possíveis de funcionamento [14]:

- Estado Normal - é o estado onde o SEE tem todas as suas variáveis de controlo dentro dos limites estabelecidos.
- Estado de Alerta - caracteriza-se por todas as variáveis de controlo se encontrarem dentro dos limites estipulados, mas não se cumpre algum critério de segurança face ao estipulado.
- Estado de Emergência - é o estado que se verifica quando alguma das variáveis de controlo sai fora dos limites pré-estabelecidos.
- Estado de Reposição - o SEE encontra-se neste estado quando após um apagão (seja regional ou nacional) se repõe de forma ordenada e segura o fornecimento do serviço.

No que concerne à frequência do sistema, no caso particular de Porto Santo, as margens de variação desta variável de controlo são estabelecidas de acordo as normas e regras internacionais, seguindo as recomendações da *European Network of Transmission System Operators for Electricity*

(ENTSO-E) [14]. A frequência nominal é definida nos 50 Hz e a regulação primária é ativada antes dos desvios excederem os ± 20 mHz. Todas as reservas primárias devem ser ativadas antes dos desvios excederem os ± 200 mHz. Em resposta a um déficit de geração igual ou inferior à referência, a frequência instantânea mínima está definida nos 49,2 Hz. No caso de perda de carga igual ou inferior à referência estipulada, a frequência instantânea máxima permitida é 50,8 Hz [15].

A regulação primária é aquela que deve manter o equilíbrio entre a produção e o consumo, através da atuação automática dos reguladores de velocidade dos respetivos grupos, provocando uma variação de potência inversamente proporcional à variação de frequência da rede. A banda de insensibilidade destes reguladores deverá ser sempre inferior a ± 10 mHz, de modo a manter o mais constante possível o valor da energia reguladora da rede. Está também definido no Regulamento da Rede de Transporte (RRT) que os geradores ligados diretamente à Rede Nacional de Transporte (RNT) devem permitir uma regulação de, pelo menos, 5% da potência nominal e o estatismo de cada grupo deve ser flexível no intervalo de 4 a 6 % [14]. Relativamente à ilha de Porto Santo, a contribuição para a reserva primária total a que a central é obrigada, é estabelecida todos os anos, com base na observação das pontas de consumo do SEE.

A regulação secundária visa anular o desvio de frequência ou o desvio de potência total da rede, relativamente a um valor nominal. No caso da ilha de Porto Santo deverá ser assegurada por grupos térmicos que possam ser mobilizados num espaço de tempo inferior a 20 minutos. A reserva secundária deve ser determinada, para cada hora do dia, em função da evolução do consumo, da produção renovável e da probabilidade de falha dos grupos geradores.

Em relação ao controlo de tensão, os valores desta variável de controlo não deverão ultrapassar, no estado normal de funcionamento, os $\pm 10\%$ do valor nominal.

Quanto aos níveis de carga, estes nunca deverão ultrapassar a capacidade nominal de cada elemento da rede nem a capacidade térmica, no caso de linhas de transporte.

Dizem também as normas que, para uma correta exploração do SEE em termos de segurança e abastecimento, deve existir uma reserva adicional de potência ativa que permita colmatar possíveis desequilíbrios entre a geração e o consumo. Surgem assim as reservas de regulação, que representam a variação máxima de potência ativa para subir ou baixar por parte das unidades físicas que se encontram numa área de balanço. Todos os agentes de mercado devem, até às 20h do dia anterior, fazer uma oferta com toda a reserva de regulação disponível para o dia seguinte, seja para subir ou para baixar [14].

Existem ainda planos de segurança e contingência que estabelecem as medidas que se devem tomar, aquando da ocorrência de incidentes que provoquem a interrupção do serviço aos utilizadores do sistema elétrico. Essas medidas englobam, por exemplo, o deslastre de cargas (automático ou manual) ou mudanças no programa de despacho [14].

2.3 Requisitos de Ligação à Rede para a Energia Eólica

Como já foi mencionado, as restrições ambientais que levam a uma sociedade livre de carbono estão a fazer com que sejam usadas cada vez mais fontes de energia renovável. O vento e a luz solar, que são os elementos fundamentais para a produção renovável são, geralmente, mais abundantes em ilhas, como é o caso de Porto Santo, o que motiva a que a aposta em geração baseada em renováveis seja, por isso, grande nestas zonas. A proliferação deste tipo de instalações renováveis desencadeou o desenvolvimento de certas normas e requisitos que são fundamentais para o bom funcionamento dos SEE [16].

Atualmente, os novos geradores eólicos a conectar à rede estão a ser obrigados pelos países, de uma forma gradual, a participar nos serviços de sistema, quer seja no controlo de potência ativa e regulação de frequência, quer seja no controlo de potência reativa e regulação de tensão [17]. Para além disto, devem ser ainda muito mais tolerantes a pequenos distúrbios e contribuir ativamente para a estabilidade do sistema durante a sua normal operação.

Contudo, enquanto os novos parques eólicos devem começar a obedecer a todos estes requisitos, pode haver parques eólicos antigos que foram instalados quando os requisitos eram menos rigorosos. Assim, não se pode exigir que todos os parques eólicos obedeçam a todas essas normas, criadas recentemente por força da penetração elevada de fontes renováveis.

A ENTSO-E é uma organização que representa 43 *Transmission System Operators* (TSOs) de 36 diferentes países da Europa e que é responsável pela elaboração e implementação dos *Grid Codes* [18]. Estes *Grid Codes* não são mais que um conjunto de especificações técnicas, onde se definem todas as regras que devem ser cumpridas por todas as instalações que estão conectadas a uma rede. Só cumprindo as normas especificadas por eles é que se garante uma rede elétrica robusta e segura. Para além da ENTSO-E, que estabelece os *Grid Codes* continentais, existem ainda os *Grid Codes* nacionais, que tendem a ser mais exaustivos e específicos e que diferem em alguns aspetos nos diferentes países europeus.

Por exemplo, no caso da vizinha Espanha, os *Grid Codes* lá definidos já exigem um controlo

primário de frequência sem remuneração para todas as unidades geradoras, incluindo geração eólica e solar. Caso essas unidades não sejam capazes de providenciar resposta primária, terão de atestar que obtiveram regulação primária a partir de outro gerador [18]. Outro exemplo é o da Dinamarca, em que os geradores eólicos já têm de ter capacidade de controlo semelhante às centrais de geração convencionais, de modo a participar ativamente nos serviços de sistema [19].

De salientar que os *Grid Codes* estão em constante atualização à medida que novas tecnologias vão sendo introduzidas e que, as medidas por eles impostas são cada vez mais exigentes, especialmente quando se tratam de sistemas de pequena dimensão e com grande proliferação de renováveis. De modo a aproveitar os recursos existentes e garantir a segurança do fornecimento de energia, os operadores de sistema vão ser cada vez mais rigorosos, especialmente em relação à geração não convencional. As novas regras irão exigir para estas fontes emulação de inércia, suporte de energia reativa durante falhas, bem como capacidade de operação em modo ilha. Por outras palavras, a geração não convencional terá de ser desenvolvida de modo a poder atender aos mesmos requisitos que já existiam para a geração convencional.

Capítulo 3. Caracterização do Caso de Estudo

3.1 Geografia e Demografia de Porto Santo

Porto Santo é uma pequena ilha localizada no Oceano Atlântico, com aproximadamente 42 km² de área e que se situa a cerca de 40 km da Ilha da Madeira. Possui, aproximadamente, 5400 habitantes (censos de 2011), cujo número pode duplicar ou triplicar nos meses de verão devido ao turismo, principal atividade económica desta ilha [20]. Esta flutuação populacional é um dos principais desafios impostos ao sistema elétrico da ilha, com influência natural nos diagramas de carga da ilha. Geograficamente, é um território com baixo relevo, sendo que a sua altitude máxima é cerca de 500 m devido a uma pequena montanha que existe na parte oriental da ilha.



Figura 3.1: Mapa/Localização Ilha de Porto Santo

3.2 Sistema de Energia Elétrica

As características deste território fazem com que, em termos elétricos, esta região esteja completamente isolada, não existindo até hoje, a possibilidade de interligação de outras redes elétricas para apoio no fornecimento de energia.

O sistema de produção de energia elétrica da ilha de Porto Santo consiste numa central termo-elétrica com 4 grupos eletrogéneos a fuelóleo, um parque eólico e ainda uma central fotovoltaica. A central térmica, situada no Sítio do Penedo, é capaz de disponibilizar uma potência máxima de 17,28 MW. O parque eólico do Cabeço do Carvalho é constituído por 3 aerogeradores, em que dois pertencem à Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM), com uma potência instalada de 2x225 kW e outro à empresa privada ENEREEM, com uma potência de 1x660 kW. A potência total instalada na ilha é 20,73 MW, partilhada pela central termoelétrica, com 17,28 MW (82,2%), pelo parque eólico, com 1,11 MW (5,3%) e o restante pela central fotovoltaica e microprodutores, com 2,62 MW (12,5%) [21]. A tabela 3.1 descreve, de forma sintética, o sistema eletroprodutor de Porto Santo.

Tabela 3.1: Quadro-Resumo do Sistema Eletroprodutor de Porto Santo, 2018 [21]

	EEM		ENEREEM	PRIVADOS	Total
	Térmica	Eólica	Eólica	Fotovoltaico	
Nº de Centrais	1	1	1	20	23
Potência Instalada (MW)	17,28	2x0,225	1x0,66	2,62	21,01
Emissão (GWh)	27,84	-	1,29	3,71	32,83

A rede de distribuição e transmissão funciona da seguinte maneira: geração de energia nas centrais renováveis e transmissão até às subestações a 6,6 kV (linhas a roxo, figura 3.2). No caso da central térmica, produz-se energia com 4 grupos térmicos de 4 MW a 6,6 kV, sendo elevada para 30 kV na subestação afeta a esta central (SE CNP), cuja potência do transformador instalado é de 4 MVA. Todas as subestações se encontram interligadas por intermédio de ligações a 30 kV (linhas a vermelho, figura 3.2). A subestação de Vila Baleira, representada na figura 3.2 por SE VBL, possui dois transformadores com uma potência total instalada de 10 MVA (4+6). A subestação da Calheta, representada no mapa por SE CPS, possui um transformador com uma potência instalada de 6 MVA. A partir destas subestações faz-se a distribuição de energia até aos PTs a 6,6 kV e destes para os clientes. As tabelas 3.2 e 3.3 resumem as características das subestações em relação ao último relatório realizado pela EEM, no final do ano de 2018 [21].

Tabela 3.2: Potência Instalada/Transformadores nas Subestações [21]

Subestações	Nº de Transformadores	Potência Instalada (MVA)	Tensões (kV)
Central Térmica - CNP	1	4	30/6,6
Vila Baleira - VBL	1	6	30/6,6
	1	4	30/6,6
Calheta - CPS	1	6	30/6,6

Tabela 3.3: Cargas Máximas Verificadas nas Subestações [21]

Subestações	Carga Máxima Verificada			Zonas de Influência
	P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)	
Central Térmica - CNP	1,4	0,6	1,5	Porto Santo - "Este"
Vila Baleira - VBL	3,2	1,2	3,4	Porto Santo - "Centro"
Calheta - CPS	3,2	1,1	3,4	Porto Santo - "Oeste"



Figura 3.2: Rede de Transporte (a) e Distribuição MT (b) em Porto Santo (2018) [21]

3.2.1 Caracterização da Carga

Em relação à carga da ilha de Porto Santo, é notório o aumento da procura de energia elétrica nos meses de verão, muito devido à atividade turística da região. A figura 3.3 ilustra as pontas de consumo (em MW) registadas nos últimos anos [21].

Também em resultado das variações das condições climáticas ao longo do ano, a ilha de Porto Santo está sujeita a uma diversidade de cenários no que diz respeito ao "mix" de produção de energia elétrica. A figura 3.4 representa os diagramas de carga por estação do ano e por fonte de energia primária, ao minuto, referentes ao último ano [21].

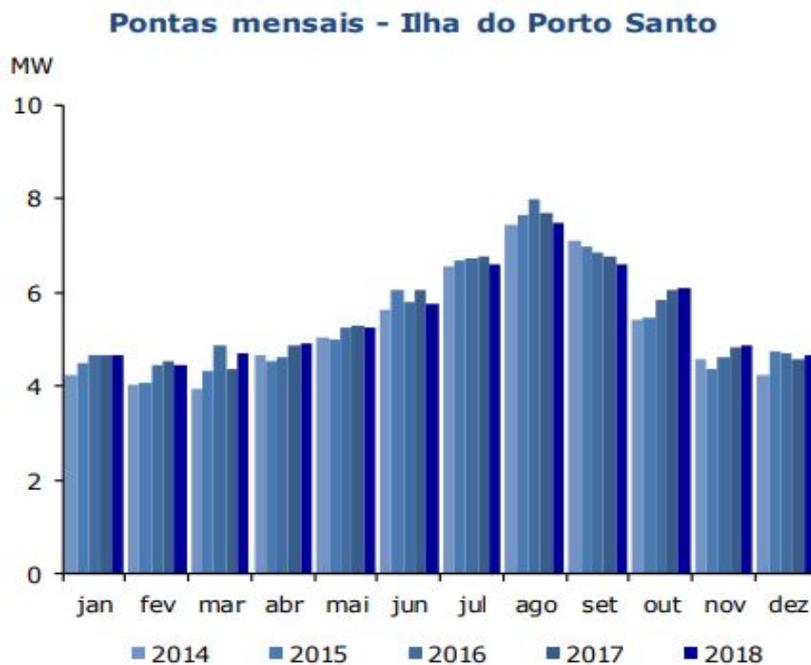


Figura 3.3: Pontas Mensais dos Últimos Anos [21]

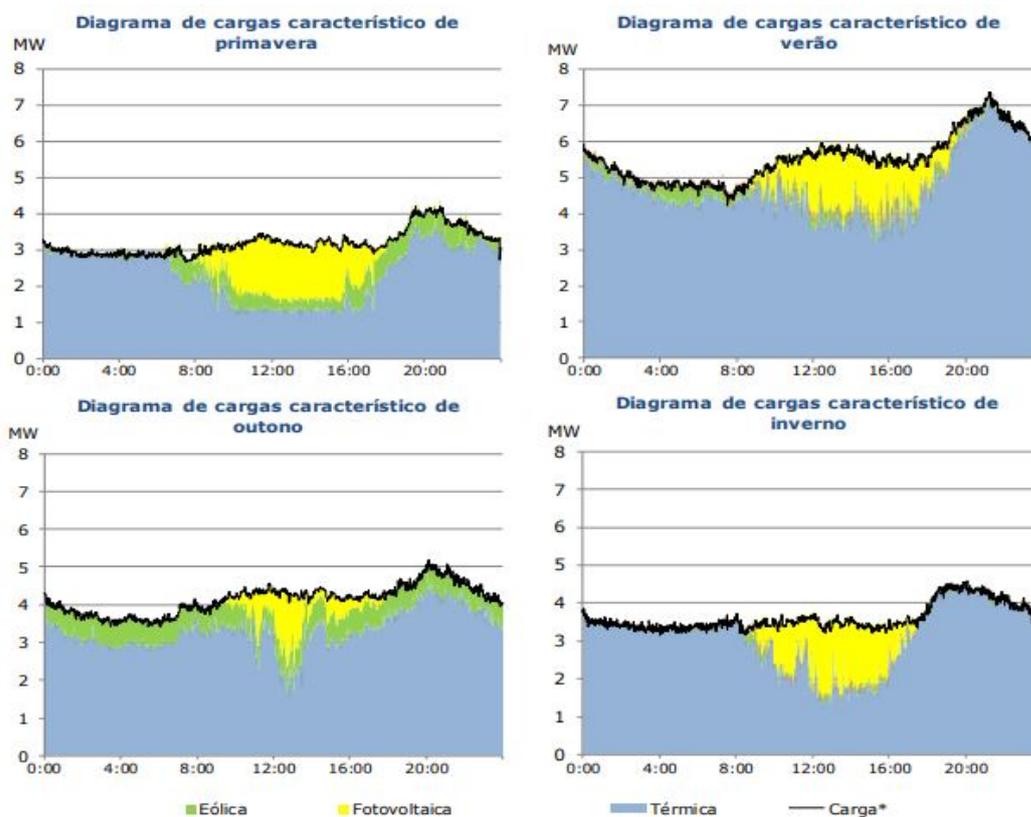


Figura 3.4: Diagramas de Carga por estação do ano e por fonte de energia primária [21]

A análise do diagrama da figura 3.5 disponibilizado pela EEM [21] e que resulta da média dos valores de carga do correspondente período temporal, permite comprovar a sazonalidade da econo-

mia da ilha de Porto Santo, onde a potência de ponta do verão quase que duplica face às estações da primavera e do inverno.

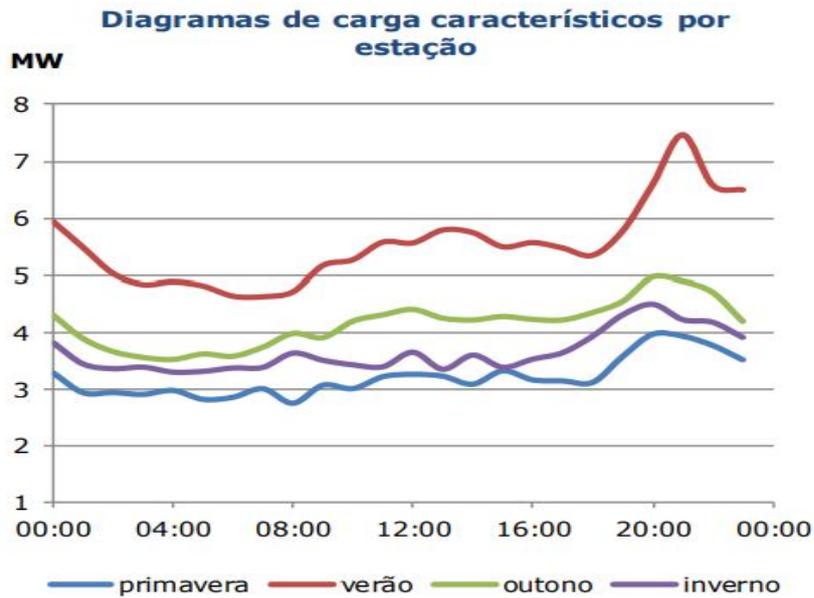


Figura 3.5: Diagrama de Carga por estação do ano [21]

Para além de uma análise global da carga na ilha, existem ainda dados sobre a carga nas três subestações existentes na ilha. A figura 3.6 resume a carga típica por subestação nas diferentes estações do ano [21].

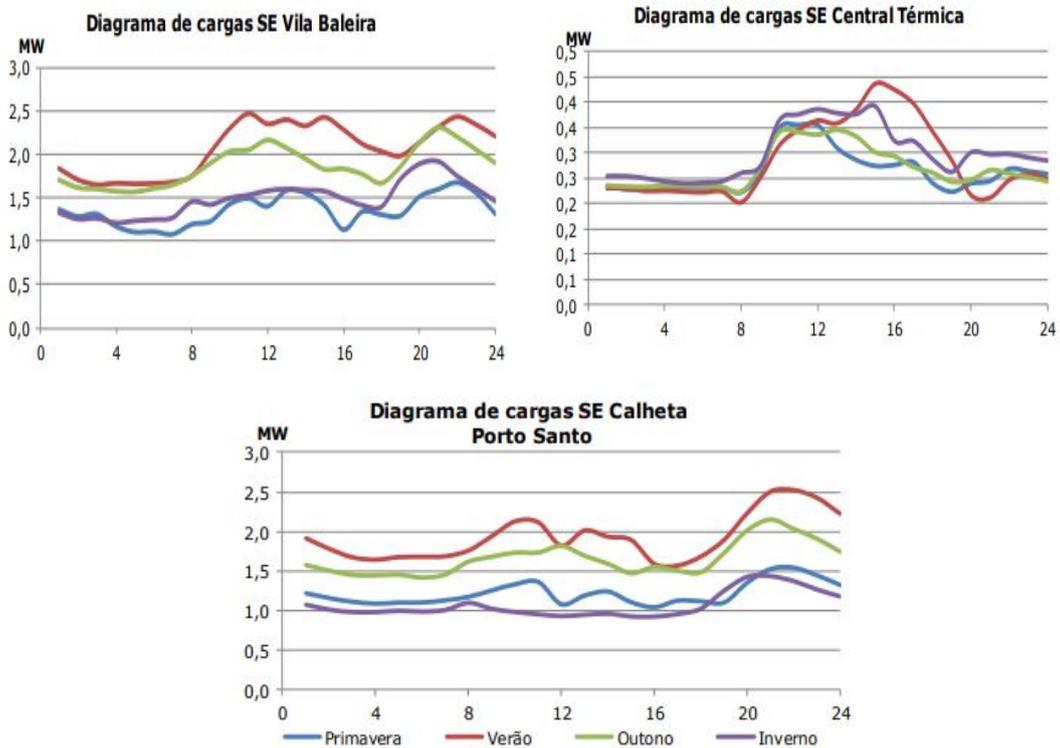


Figura 3.6: Diagramas de Carga Típicos nas Subestações por Estação do Ano [21]

De modo a poder desenvolver os estudos acerca do SEE em causa, o conhecimento dos diagramas de carga e de geração assume especial relevância. É através deles que é possível identificar diferentes cenários que possam apresentar um potencial de aproveitamento para a operação do sistema, bem como realizar alguns testes de modo a verificar a viabilidade da introdução de mais fontes de energia renovável. Por exemplo, a penetração de energias com origem renovável pode ser tão elevada que pode levar a um número reduzido de máquinas térmicas ligadas. Importa, por isso, perceber como se comporta o sistema em termos de fluxos de potência e consequentemente na carga dos diferentes elementos que compõem o SEE, para diferentes níveis de penetração de fontes de energia renováveis.

3.2.2 Caracterização e Parametrização da Geração

Nesta secção pretende-se caracterizar a geração da ilha de Porto Santo, explicando sucintamente as particularidades de cada tipo de geração. Os parâmetros específicos de cada máquina e que se utilizarão no *software* de simulação estão descritos e tabelados nos anexos respetivos.

3.2.2.1 Geração Térmica

Como referido na secção anterior, existe uma central termoelétrica com 4 grupos eletrogéneos em pleno funcionamento, que disponibilizam uma potência máxima de 17,28 MW, sendo responsável por mais de 80% do total da produção elétrica da ilha de Porto Santo. Existem dois grupos mais antigos que se encontram desativados, fora de exploração normal e só se utilizam em situações de emergência. Os grupos térmicos, equipados com motores de combustão interna, consomem dois tipos de combustível: o diesel é utilizado quando os geradores funcionam com potências entre os 0,8 MW e os 1,2 MW e o fuelóleo é utilizado quando os geradores funcionam com potências entre os 1,2 MW e os 4 MW. Cada grupo térmico tem uma gama de potências proibida, nas quais não podem funcionar, sendo essa gama pertencente ao intervalo de 0 a 0,8 MW. Uma vez em funcionamento um grupo térmico, esse grupo deve funcionar, no mínimo, 1 hora.

Esta central encontra-se equipada por máquinas síncronas de pólos salientes que se podem caracterizar em *software* recorrendo ao modelo "GENSAL". No *software* utilizado a elaboração do modelo pressupõe o conhecimento dos parâmetros de cada máquina em específico. Valores como a potência e a tensão nominal da máquina, constantes transitórias e subtransitórias em vazio (T'_{d0} , T''_{d0} e T''_{q0}), a constante de inércia (H), o amortecimento (D), as reatâncias síncronas, transitórias, subtransitórias e de dispersão do estator (X_d , X_q , X'_d , X''_d e X_l) e a característica de magnetização de cada máquina encontram-se tabelados no anexo A.

Para além do gerador, estas máquinas de pólos salientes necessitam e possuem um circuito de excitação e regulação de tensão. O modelo "IEEE1" é um dos modelos mais utilizados para este tipo de circuito. O diagrama de blocos deste modelo encontra-se representado no anexo A bem como uma tabela com os valores dos parâmetros utilizados.

Esta central térmica conta ainda com reguladores carga-velocidade. Com base na potência elétrica desejada e na velocidade da turbina, este compensador determina a potência mecânica necessária para a correta operação do gerador. O modelo utilizado foi o "DEGOV1" (*Woodward Diesel Governor*), cujo diagrama de blocos bem como os parâmetros utilizados se encontram no anexo A.

Todos os parâmetros que permitem modelizar as máquinas térmicas instaladas em Porto Santo foram extraídos de um estudo já realizado [22] em parceria com a AREAM.

3.2.2.2 Geração Eólica

O parque eólico da ilha de Porto Santo é composto por três aerogeradores, cujo fabricante é a *VESTAS*. Com uma potência instalada de 1,11 MW, este parque é constituído por duas turbinas eólicas do modelo V29, com 225 kW cada, cuja instalação remonta a 1996 e uma do modelo V47 com 660 kW, instalada no final do ano 2000.

Em termos de *software*, os geradores eólicos podem ser caracterizados através dos modelos "WT1G1" e "WT2G1", modelos que se podem encontrar na biblioteca do programa utilizado. O modelo "WT1G1" é utilizado para os geradores eólicos de 225 kW pertencentes à empresa EEM e o modelo "WT2G1" é utilizado para a turbina de 600 kW pertencente à empresa ENEREEM.

Os modelos atrás citados, para além de englobarem o modelo do gerador de indução de rotor em gaiola, no caso do modelo "WT1G1" e de rotor bobinado com resistência do rotor variável, no caso do modelo "WT2G1", englobam também o modelo do veio, da turbina eólica e do controlador da resistência rotórica (no caso do modelo "WT2G1"). Os parâmetros utilizados encontram-se tabelados no anexo B. A maioria dos dados foram também retirados do Projeto "TRES - Transição para um Modelo Energético Sustentável", projeto realizado pela EEM em parceria com a AREAM [22].

3.2.2.3 Geração Fotovoltaica

Para além da geração termoelétrica e da geração eólica, existe ainda um parque solar fotovoltaico, com uma potência instalada de 2 MW. Como descrito na tabela 3.1, este parque é responsável pela produção de pouco mais de 3 GWh de energia elétrica, sensivelmente constante ao longo dos anos.

Fisicamente, é constituído por dois módulos fotovoltaicos, em que cada módulo está ligado a dois grupos inversores *SIEMENS*, perfazendo um total de 4 grupos inversores, de 500 kW cada [23].

3.3 Montagem e Parametrização do SEE base no PowerWorld

3.3.1 Diagrama Unifilar e Características dos Elementos Constituintes da Rede

De forma a ser possível a simulação do SEE de Porto Santo no software utilizado neste trabalho, foi necessário a construção do diagrama unifilar da rede de energia, tendo como base os documentos de caracterização da rede de transporte e de distribuição disponibilizados no *website* da EEM [21] e também alguns dados fornecidos diretamente pela empresa.

A rede foi modelizada ao pormenor até ao nível das subestações onde se representou todas as ligações existentes entre elas. Para além disso, foram inseridos todos os geradores, incluindo a geração renovável, bem como os transformadores presentes em cada subestação.

Toda a rede a jusante foi modelizada através de uma carga, ligada no barramento de mais baixa tensão (6,6 kV) de cada subestação.

A figura 3.7 ilustra o diagrama unifilar construído no ambiente do *software PowerWorld*.

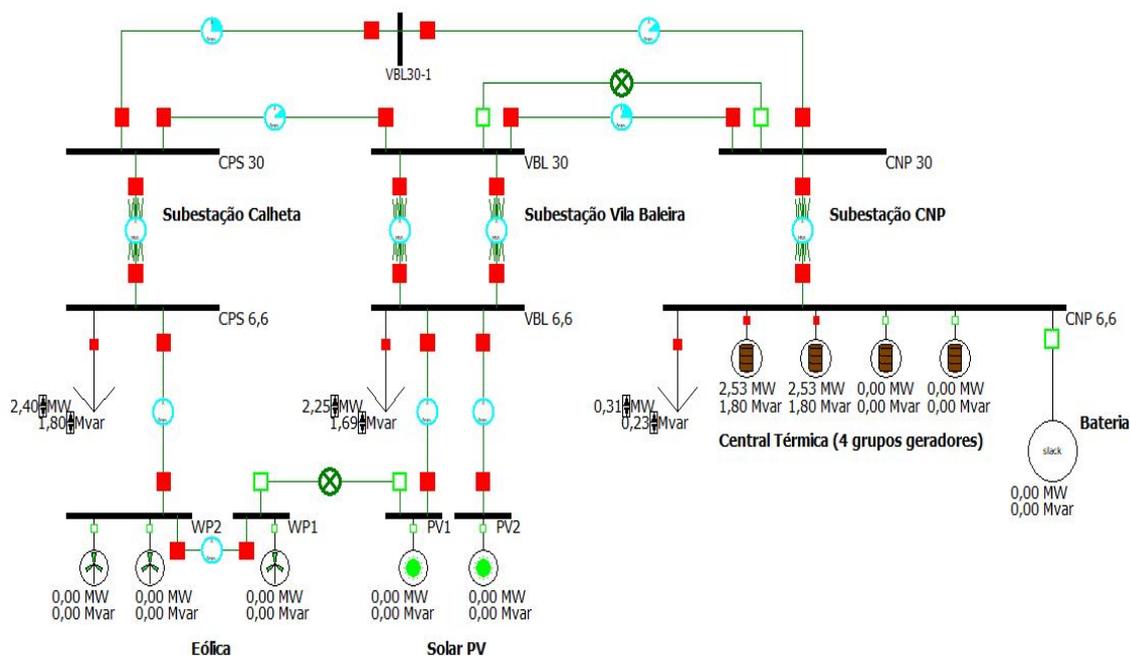


Figura 3.7: Diagrama Unifilar - Porto Santo

Após a construção e disposição dos elementos pela rede foram introduzidos no programa todos

os dados relativos às tensões e potências de cada máquina assim como características das linhas, transformadores e barramentos, além de todas as características mencionadas na secção 3.2.2. e que se encontram em anexo.

A partir da figura 3.7 é possível identificar onze barramentos, que são considerados como os barramentos base do SEE. Esses barramentos estão identificados pela sigla de cada subestação seguido do valor de tensão respetivo, no caso dos barramentos inerentes a cada subestação. Os barramentos afetos aos geradores renováveis estão identificados por WP1 (1*660 kW) e WP2 (2*225 kW), no caso da energia eólica e por PV1 (0,5 MW) e PV2 (0,5 MW), no caso da geração fotovoltaica.

As características das linhas de transmissão não transformadoras foram retiradas das informações fornecidas pela EEM e encontram-se resumidas na tabela 3.4 [21].

Tabela 3.4: Características das Linhas [21]

Barramento 1	Barramento 2	Tensão (kV)	R (Ω /Km)	X (Ω /Km)	B (Mhos/km)	Comprimento (Km)	Corrente Máx. (A)
CNP 30	VBL 30	30	0,516778	0,19695	77,41*10 ⁻⁶	2,44	376
CNP 30	VBL 30	30	0,517595	0,154173	54,50*10 ⁻⁶	2,65	168
CNP 30	VBL 30-1	30	0,516778	0,19695	77,41*10 ⁻⁶	2,48	376
VBL 30-1	CPS 30	30	0,517595	0,154173	54,50*10 ⁻⁶	4,84	168
VBL 30	CPS 30	30	0,517595	0,154173	54,50*10 ⁻⁶	6,03	168
CPS 6,6	WP2	6,6	0,51485	0,1665	0	3,8	188
WP2	WP1	6,6	0,51485	0,1665	0	0,3	188
WP1	PV1	6,6	0,51485	0,1665	0	0,5	188
PV1	VBL 6,6	6,6	0,19481	0,1508	0	4,07	324
PV2	VBL 6,6	6,6	0,51485	0,1665	0	2,95	188

Além das características das linhas introduziu-se ainda os dados relativos aos transformadores instalados em cada subestação. Esses dados encontram-se resumidos na tabela 3.5 e foram retirados da caracterização da rede disponibilizada pela EEM [21]. Os valores em p.u. foram calculados com o valor de base do transformador respetivo.

Tabela 3.5: Características dos Transformadores [21]

Subestação	Ano de Ligação	Refrigeração	Tensões (kV)	P. Nominal (MVA)	R. (p.u.)	X. (p.u.)
Nova Central - CNP	1992	Óleo Natural Ar Natural	30/6,6	4	0,0055	0,0567
Vila Baleira - VBL	2011	Óleo Natural Ar Forçado	30/6,6	6	0,0065	0,0596
	1992	Óleo Natural Ar Natural	30/6,6	4	0,0055	0,0567
Calheta - CPS	2009	Óleo Natural Ar Forçado	30/6,6	6	0,0065	0,0596

Capítulo 4. Time Step Simulation

O *Power World* (PW) disponibiliza uma ferramenta extremamente útil, designada *Time Step Simulation* (TSS). Através dela é possível avaliar como variam os parâmetros do SEE, devido a mudanças na carga, na geração ou em qualquer outro elemento que possa sofrer alterações ao longo do tempo. Dito de outra forma, é possível correr simulações de fluxo de potência durante um período de tempo selecionado (um dia, por exemplo), com um *time step* (resolução temporal) pré-definido. Deste modo, obtém-se a caracterização do sistema em regime estacionário para cada intervalo de tempo do período em estudo. Em cada intervalo de tempo são especificados os dados de entrada, que podem ser valores de carga, geração renovável ou outros, que permitam construir um cenário de simulação.

Para cada cenário de simulação identificam-se quais os resultados que se desejam como *output*, sejam eles relacionados com barramentos, geradores, linhas ou outros. Esses resultados podem ser módulos de tensão, ângulos (em graus ou radianos), potências necessárias em cada intervalo de tempo, perdas nas linhas ou outros.

Neste caso em específico, introduzir-se-á como *input* os dados relativos à carga (em MW e MVar) de cada subestação e os dados de geração renovável (eólica e solar). Como *output* será importante recolher os dados relacionados com as tensões nos barramentos, com a geração dos grupos térmicos em serviço, com a carga nos diferentes elementos que constituem a rede e com as perdas ativas no SEE.

4.1 Simulação/Validação da Rede Base Implementada no PowerWorld

Após a construção do modelo da rede de Porto Santo e da introdução de todos os parâmetros necessários, é imperial verificar a sua viabilidade, isto é, se o modelo implementado se aproxima do real e se, em funcionamento normal, as variáveis de controlo se encontram dentro de uma gama admissível de valores.

Como se pretende analisar e verificar a viabilidade do comportamento do SEE modelizado, faz sentido analisar um cenário em que haja uma elevada procura de energia elétrica. Em Porto Santo e devido à forte atividade turística da ilha, a maximização da procura verifica-se sobretudo nos meses

de verão. Assim, optou-se por escolher para simulação, uma semana do mês de agosto.

Neste cenário de simulação e como se trata do caso base do SEE em causa, a geração renovável nunca ultrapassa a procura. Por isso e porque a carga durante a semana simulada está quase sempre acima dos 4 MW e abaixo dos 8 MW, que é a potência máxima disponibilizada por dois grupos geradores, durante a simulação estão sempre dois grupos térmicos ativos.

A simulação foi realizada para sete dias do mês de agosto e teve um *step* de 15 minutos, ou seja, para cada parâmetro introduzido ou extraído da simulação, existem 672 pontos. A figura 4.1 ilustra a carga introduzida no software, correspondente à semana de verão simulada.



Figura 4.1: Carga simulada por subestação

Na figura 4.2 está representada a geração renovável que se introduziu como *input* no *PowerWorld*. De salientar a variabilidade associada à geração eólica e também o efeito da passagem de nuvens na geração PV.

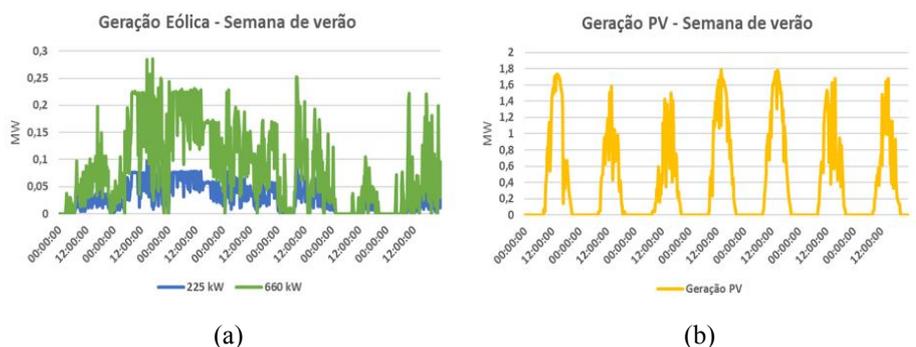


Figura 4.2: Geração Eólica (a) e PV (b) para a semana de agosto simulada

Após correr a simulação é possível retirar dados acerca da produção da central térmica, que se vai ajustar às necessidades para cada ponto no tempo, tendo em conta a geração renovável e a procura. Na figura 4.3 está representado a geração de um grupo térmico para a semana simulada e, separadamente, os dados mais precisos do primeiro dia desta simulação. Na figura 4.4 representa-se a geração térmica total e a produção renovável para a semana simulada e para o primeiro dia de

simulação.

É importante salientar que os gráficos da figura 4.3 representam a produção de um grupo térmico porque, como os dois grupos são iguais em termos de modelação, equilibram-se em termos da potência gerada.

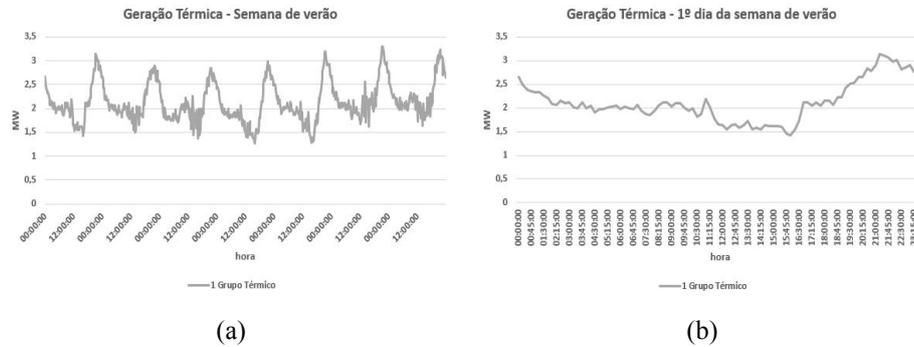


Figura 4.3: Geração térmica de um grupo semanal (a) e de um dia (b) para a semana de agosto simulada

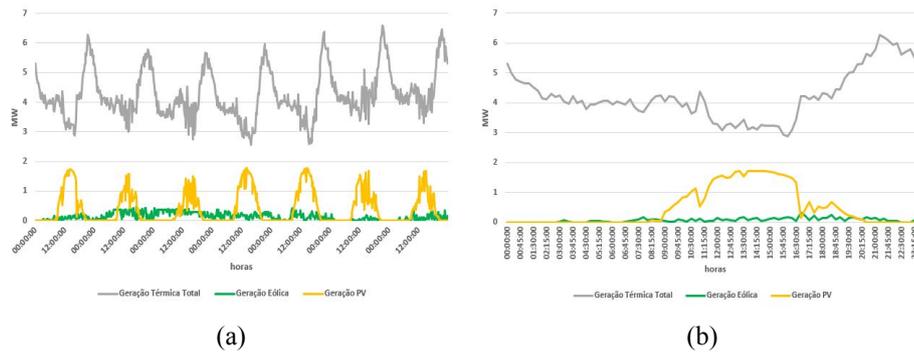


Figura 4.4: Geração Térmica Total e Produção Renovável semanal (a) e de um dia (b) para a semana de agosto simulada

Através da análise da figura 4.3 percebe-se a forte dependência que existe da geração térmica, trazendo consigo elevados custos de operação (consumo de combustível) e elevadas emissões de gases com efeito de estufa. Reconhece-se então a importância de utilizar o armazenamento neste tipo de cenário, onde a renovável não ultrapassa a procura. As baterias podem substituir a reserva girante dos grupos térmicos, de modo a ser possível desligar algum grupo durante um certo período de tempo. A redução do número de máquinas térmicas em funcionamento pode trazer melhorias ao nível da eficiência dos grupos (como se verá adiante) e permitirá reduzir os consumos de combustível bem como reduzir as emissões de gases poluentes.

Da mesma simulação de onde se retiraram os dados relativos à produção dos grupo térmicos, extraiu-se também os dados dos perfis de tensão para os diferentes barramentos da rede, sejam bar-

ramentos a 30 kV ou a 6.6 kV. Através destes dados é possível verificar se os valores estão dentro de uma gama admissível. Neste caso, a tensão do barramento de referência está definida em 1 p.u..

Nas figuras 4.5 e 4.6 estão representados os perfis de tensão para os barramentos de 30 kV e 6,6 kV, respetivamente.

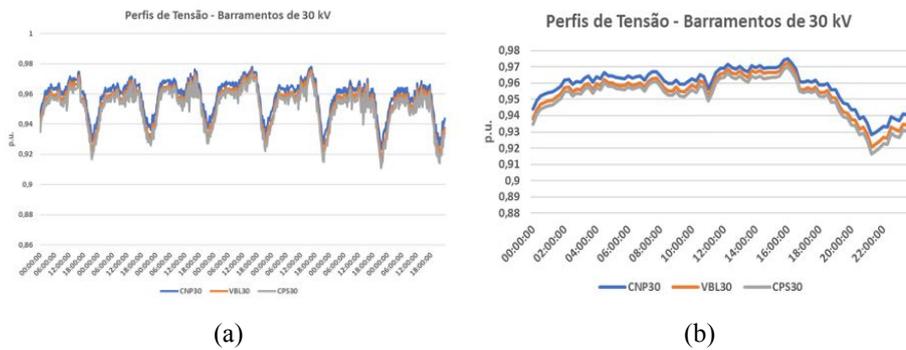


Figura 4.5: Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 30 kV

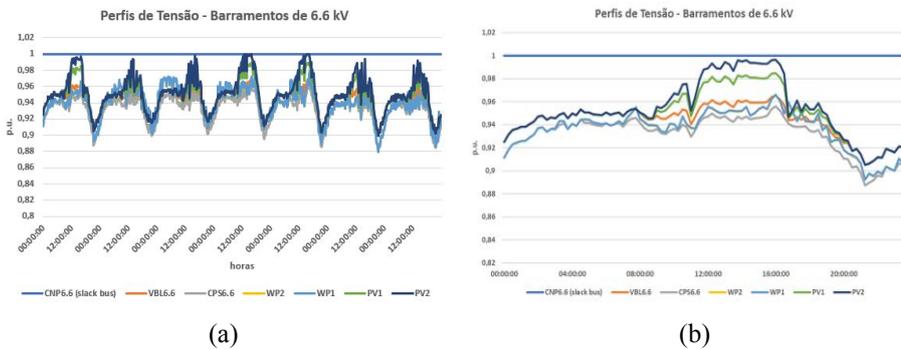


Figura 4.6: Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 6.6 kV

Verifica-se que os valores de tensão dos barramentos a 30 kV estão sempre abaixo do valor de tensão do barramento de referência, observando-se que o maior desvio ocorre em horas de maior procura de energia, isto é, sensivelmente ao final do dia. Para os barramentos de 6.6 kV existe um ligeiro desvio, abaixo dos 0.9 p.u., nos barramentos mais distanciados do *slack bus* mas por um curto período de tempo. Da observação dos gráficos e de modo a solucionar o problema do abaixamento da tensão nos barramentos mais distantes, definiu-se a tensão do *slack bus* como sendo 1,05 p.u. e não 1 p.u. como definido inicialmente. Obtiveram-se assim os gráficos de tensão representados nas figuras 4.7 e 4.8.

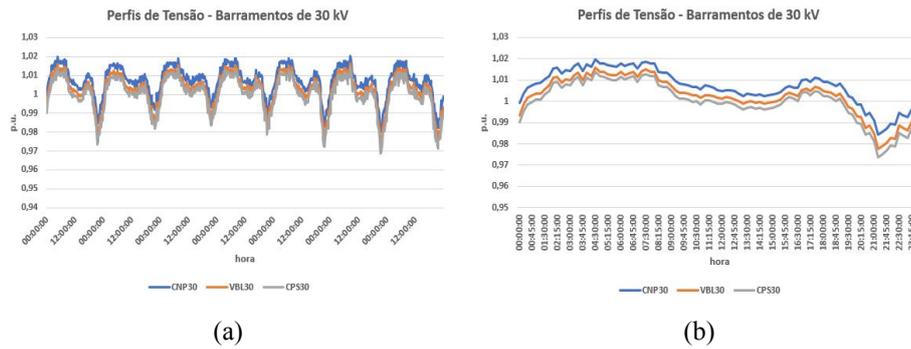


Figura 4.7: Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 30 kV (slack bus a 1,05 p.u.)

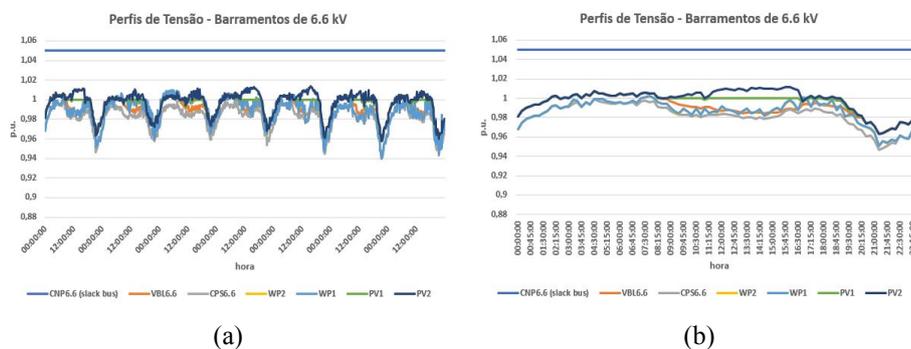


Figura 4.8: Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 6.6 kV (slack bus a 1,05 p.u.)

Os valores de tensão encontram-se agora sempre dentro da gama admissível (entre 0,9 p.u. e 1,1 p.u.).

Foi também extraído do *software* um gráfico relativo às perdas totais nas linhas da rede. Como esperado, verifica-se um aumento destas quando os fluxos de potência aumentam, isto é, quando a procura por energia elétrica é maior, principalmente ao final do dia. A figura 4.9 ilustra graficamente as perdas, para o primeiro dia de simulação, em MW.



Figura 4.9: Perdas nas linhas da rede para o primeiro dia de simulação

4.2 Central Dessalinizadora Como Carga Controlável

Na ilha de Porto Santo os recursos hídricos são bastante escassos e limitam-se a algumas nascentes cujo caudal é extremamente reduzido. Assim, em meados da década de 70, o governo regional da Madeira decidiu instalar, em Vila Baleira, uma central dessalinizadora de modo a colmatar as necessidades de água potável.

Em 1980, a central entrou em funcionamento utilizando como processo de dessalinização a osmose inversa (OI). De uma forma simplificada, a OI é um processo físico que utiliza o fenómeno da osmose para remover os sais bem como outros produtos químicos presentes na água. Este processo é acionado através de pressão, onde a água é forçada a passar numa membrana semi-permeável. Como resultado dessa pressão, maior do que a pressão osmótica, a água doce passa pela membrana, enquanto que os sais são retidos pela mesma [24].

Em todo este processo, as grandes consumidoras de energia são as bombas de alta pressão que são acionadas através de motores de indução. As figuras 4.10 e 4.11 representam o princípio de funcionamento do processo e as suas etapas, respetivamente.

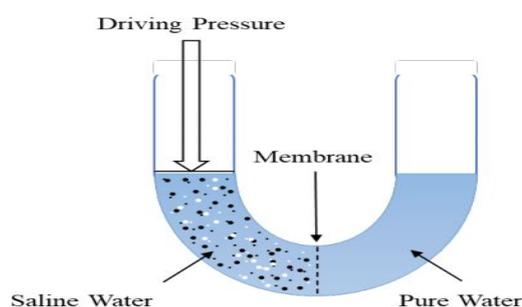


Figura 4.10: Princípio de Funcionamento da Osmose Inversa [24]

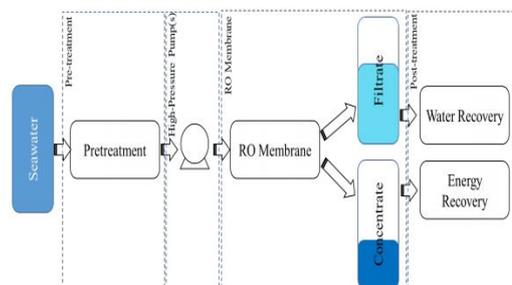


Figura 4.11: Etapas do Processo de Osmose Inversa [24]

Até ao ano de 2000 a central foi gerida pelo governo regional da Madeira, sendo que a partir de 2000 esta foi integrada na empresa pública IGA, S.A.. Em 2002 iniciou-se um processo de ampliação

e remodelação de toda a instalação bem como um aumento da potência instalada para 2 MW.

Em 2004 todos os acionamentos recorriam à variação de frequência, o que permitia modelar a produção em função da procura e desta forma reduzir, drasticamente, os consumos de energia elétrica. [25].

Atualmente, existem duas unidades de produção por OI, com uma capacidade de produção total de cerca de 6900 m³/dia. Com uma capacidade de produção anual de 2,4 Mm³, suficiente para uma população de cerca de 35000 habitantes, esta central produziu no ano de 2018 1,2 Mm³ [26].

Em termos de consumo energético, as unidades de OI consomem entre 2,7 kWh/m³ e os 3,1 kWh/m³ e o consumo total sem bombagem para a rede de distribuição é cerca de 3,8 kWh/m³. Este consumo total sem bombagem representa o consumo de energia para produzir e armazenar 1 m³ de água doce, sem incluir o consumo para bombear a água na rede de distribuição. As duas unidades funcionam com potências nominais entre 600 e 1000 kW, admitindo-se que podem funcionar com potências dentro desse intervalo. Em 2015, o consumo acumulado de energia pela central dessalinizadora atingia os 15% da procura total de energia da ilha [27].

Todos os equipamentos da central são controlados e monitorizados a partir de um sistema de supervisão, permitindo, por exemplo, o arranque e paragem das unidades.

Na tabela 4.1 estão resumidas as características fundamentais acerca da central dessalinizadora [26], [27], e [28].

Tabela 4.1: Resumo das Características da Central Dessalinizadora de Porto Santo

Características da Central Dessalinizadora de Porto Santo	
Localização	Vila Baleira
Sistema	Osmose Inversa
Captação Máxima	15700 m ³ /dia
Produção Máxima	6900 m ³ /dia
Reserva	20200 m ³ (10 reservatórios)
Potência Instalada	2000 kW
Consumo	3,8 kWh/m ³
Custo Final de Água	1,05 €/m ³

Uma das principais barreiras à introdução de geração renovável em pequenos SEE como o de Porto Santo é a possível não coincidência entre os períodos de maior disponibilidade de energia

produzida e os períodos de tempo em que se verificam maiores consumos [27]. Tendo em conta a reserva total de 20200 m³ e que a central necessita de 3,8 kWh para produzir 1 m³ de água dessalinizada, a central conta com uma capacidade de armazenamento equivalente a 76760 kWh. Por isso, do ponto de vista do funcionamento do SEE da ilha de Porto Santo, a central dessalinizadora pode ser considerada como um potencial recurso controlável do lado da procura.

Pretende-se, através do controlo desta central, verificar a possibilidade de reduzir o pico da procura de energia e, não menos importante, utilizá-la como meio de introdução de mais fontes de energia renovável intermitentes.

De modo a poder simular o funcionamento da central dessalinizadora como carga controlável é necessário criar cenários de operação. Através da criação destes cenários pretende-se agendar o funcionamento da central ao longo dos dias, tendo em conta, sobretudo, a disponibilidade de geração renovável. A construção dos cenários de operação da central devem ter em conta algumas restrições relacionadas com os limites máximos e mínimos de água nos reservatórios, com a potência de operação das duas unidades e com os tempos de funcionamento ou paragem das mesmas. Assim, para a construção dos diagramas de carga da central deve-se ter as seguintes restrições:

- R1: $Reserva_{min} \leq R \leq Reserva_{max}$
- R2: $P_{dessal} \in [600-1000, 1200-2000]$ kW
- R3: $1,5h \leq T_{on} \leq 20h; 1,5h \leq T_{off} \leq 36h$

onde se define $Reserva_{max} = 20200$ m³ e a $Reserva_{min} = 1000$ m³ e R representa a quantidade de água nos reservatórios. A restrição R2 indica o intervalo de potências de funcionamento das duas unidades de OI e R3 restringe o tempo em funcionamento contínuo (T_{on}) e o tempo desligado (T_{off}). Estes tempos foram definidos para a realização das simulações, não havendo qualquer informação ou referência acerca desses mesmo tempos. A razão pela qual se considerou que a central não pode funcionar 24 horas por dia foi garantir que existem horas para a sua manutenção, como por exemplo, limpeza de filtros.

Tendo em conta as restrições acima indicadas, é possível construir possíveis diagramas de carga da central dessalinizadora, definindo a sua potência de funcionamento para cada ponto no tempo ($P_{dessal}(t)$). Sabendo que o consumo de energia é 3,8 kWh/m³, então é possível saber a quantidade de água produzida por hora (m³/h), através da fórmula:

$$Prod_{agua}(t) = \frac{P_{dessal}(t)}{3,8} \quad (4.1)$$

4.2.1 Simulação de Possíveis Cenários de Operação da Central Dessalinizadora

De modo a compreender a operação atual da central dessalinizadora foi criado um cenário para um dia de agosto, onde a produção de água passou os 4000 m³. Na construção deste cenário, assumiu-se que, no início do dia, os reservatórios estavam perto do limite mínimo e a central funcionou de acordo com a procura de água ao longo do dia. Importa realçar que este cenário foi criado com a capacidade instalada de geração renovável base, isto é, com 2 MW de geração fotovoltaica e 1,1 MW de geração eólica.

Na figura 4.12 está representada a carga base da ilha para esse dia, a carga total (carga base + central dessalinizadora) e a diferença entre a carga total e a geração renovável. Para além disto, está ainda representada a geração renovável bem como um possível cenário de operação da central dessalinizadora sem qualquer tipo de controlo. Os tempos de funcionamento foram cumpridos tendo em conta as restrições acima descritas e assumidas para a realização deste trabalho.

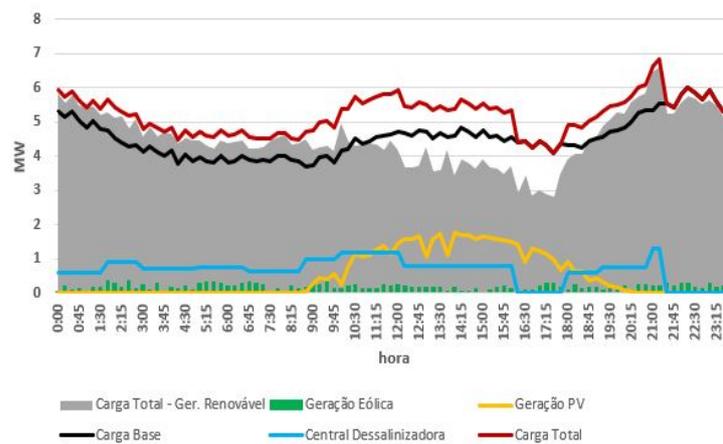


Figura 4.12: Cenário de Funcionamento da Central Dessalinizadora sem controlo

Observando o gráfico, verifica-se uma elevada produção fotovoltaica nas horas de maior radiação solar e uma geração de energia eólica com uma grande variabilidade ao longo do dia.

Tal como descrito atrás, os objetivos que se pretendem alcançar com o controlo da central dessalinizadora no contexto atual de Porto Santo, onde a produção renovável é pequena, são, em primeiro lugar, otimizar o seu funcionamento. Em segundo lugar, procura-se reduzir pontas nos diagramas com o objetivo de se reduzirem as perdas globais do SEE. Para além disto, pode-se conseguir melhorar a eficiência dos grupos térmicos. Tudo isto só é possível recorrendo ao armazenamento de água nos reservatórios que passam a funcionar como sistemas de armazenamento de energia. Através da análise da figura 4.12 é possível identificar um período na qual a central poderia operar, com o objetivo de suavizar flutuações nos diagramas, período esse situado sensivelmente entre as 10h e

as 18h desse dia. Assim, moveu-se o funcionamento da central, criando-se um novo cenário de operação, armazenando a água nos reservatórios para uma posterior utilização. A quantidade de água produzida foi aproximadamente igual ao cenário de operação sem controlo.

Ao existirem períodos durante o dia onde a central funciona e outros em que não funciona, levanta questões ao nível do pessoal que trabalha nesta central. Estas simulações foram feitas, pensando numa automatização futura dos sistemas da dessalinizadora, não necessitando de qualquer pessoa para ativar ou desativar a operação da central.

Na figura 4.13 está representado um possível funcionamento da central, recorrendo ao controlo da mesma e, assim, conseguir mover os seus períodos de funcionamento para períodos mais convenientes do ponto de vista da operação do SEE, cumprindo sempre as restrições dos seus tempos de funcionamento.

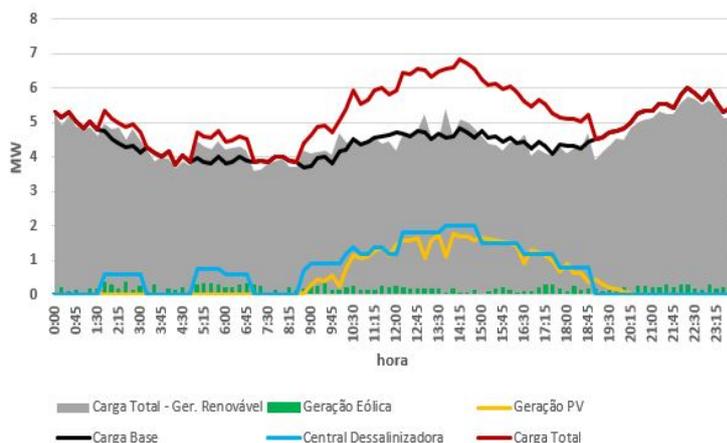


Figura 4.13: Cenário de Funcionamento Diário da Central Dessalinizadora com controlo

Ao comparar os gráficos das figuras 4.12 e 4.13 facilmente se observa que com o controlo da central dessalinizadora se consegue minimizar a diferença entre a carga base e a área a cinzento nos gráficos que representa a carga total menos a contribuição da geração renovável. Este tipo de controlo não traz qualquer tipo de alteração ao nível de funcionamento das térmicas que seja benéfica contudo, é possível suavizar os diagramas. Esta suavização permite diminuir as pontas dos diagramas e como as perdas são proporcionais ao quadrado da corrente, consegue-se diminuir as perdas no sistema. Em suma, lida-se com os problemas associados à intermitência da geração renovável, com benefícios para todo o SEE.

De modo a poder simular no *PowerWorld* o funcionamento da central dessalinizadora, como carga controlável, foi criado um cenário de operação durante uma semana de verão, onde se verifica um elevado consumo de água. Para cada intervalo de 15 minutos (*time step*) foi definida a sua potên-

cia, resultando no gráfico da figura 4.14. Foi considerado que, no início de cada dia, os reservatórios se encontravam próximos do limite mínimo e que, durante o dia, a produção nunca foi superior à produção máxima diária, estabelecida nos 6900 m³.

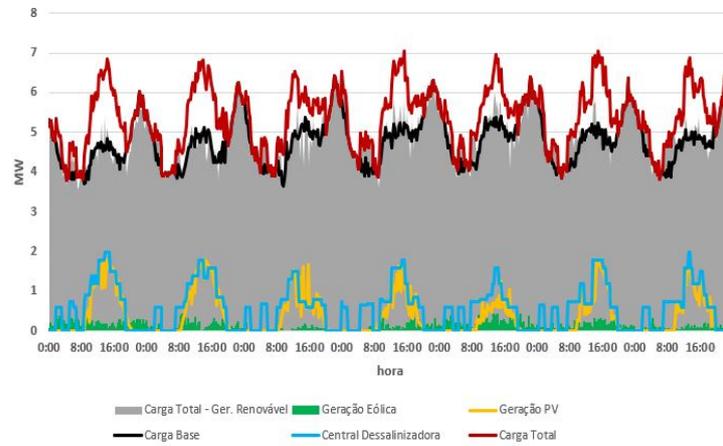


Figura 4.14: Cenário de Funcionamento Semanal da Central Dessalinizadora com controle

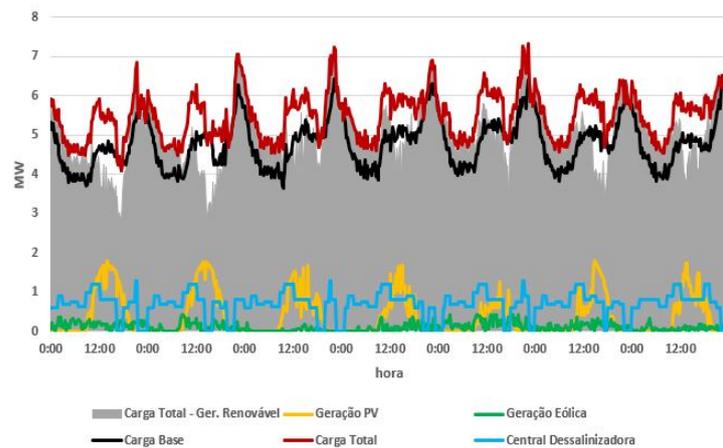


Figura 4.15: Cenário de Funcionamento Semanal da Central Dessalinizadora sem controle

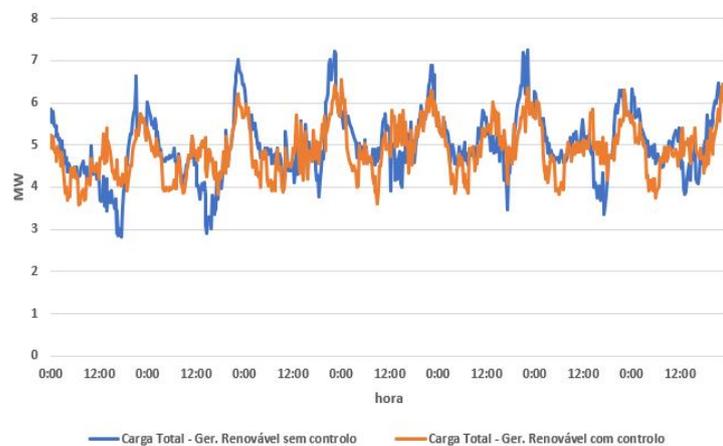


Figura 4.16: Variação Detalhada das Áreas a Cinzento das Figuras 4.14 e 4.15

Ao comparar as figuras 4.14 e 4.15 identificam-se novamente as diferenças nas áreas a cinzento dos gráficos, tal como explicado atrás. A figura 4.16 representa essa variação mais detalhada, para a semana simulada, onde se observa uma diminuição das pontas para a semana com controlo da central dessalinizadora, corroborando o descrito atrás, acerca da diminuição das perdas. As perdas ativas na rede ao longo da semana simulada, estão representadas na figura 4.17.

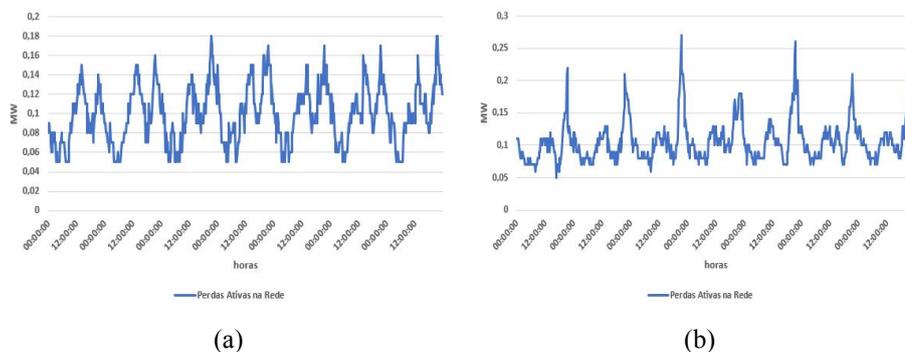


Figura 4.17: Perdas ativas na rede com controlo (a) e sem controlo (b) da central dessalinizadora

O somatório de perdas ativas no fim da semana sem controlo da central dessalinizadora foi 71,51 MW, enquanto que na semana com controlo da central foi 66,95 MW. Este somatório permitiu comprovar que se diminuem as perdas na rede com o controlo da central dessalinizadora.

A simulação foi realizada para uma semana de agosto e tal como se verifica pela figura 4.14, a carga total esteve quase sempre acima dos 4 MW o que obrigou a ter sempre 2 grupos térmicos em funcionamento. Na figura 4.18 está representada a geração térmica para um grupo (é igual para o outro grupo pelas razões invocadas na secção 4.1).

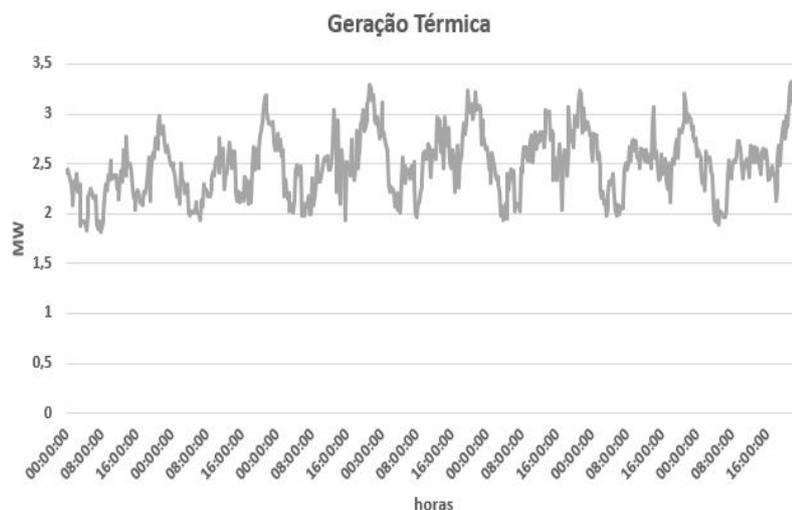


Figura 4.18: Geração Térmica Para um Grupo Para a Semana Simulada

Em termos de perfis de tensão, os valores encontram-se dentro da gama de valores admissíveis mas com algumas diferenças relativamente ao caso base, sem ter a central dessalinizadora como carga controlável. Pela análise da figura 4.19 pode-se concluir que a introdução e controlo da central dessalinizadora não trouxe problemas ao nível da tensão nos barramentos.

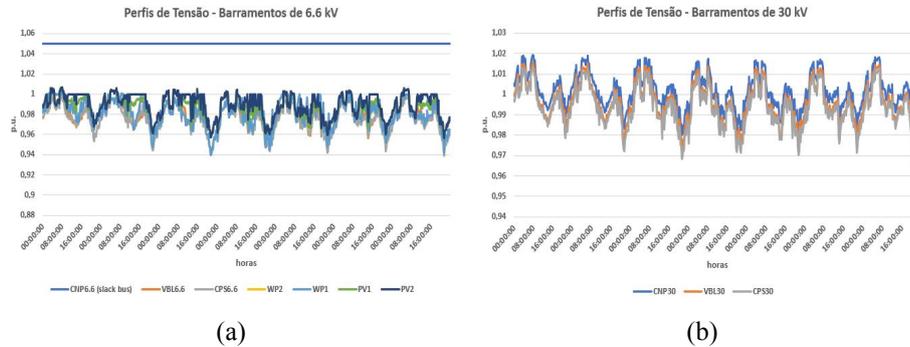


Figura 4.19: Perfis de Tensão Para os Barramentos a 6.6 kV (a) e Para os Barramentos a 30 kV (b)

4.3 Aumento da Penetração de Fontes de Energia Renovável

Atualmente, na ilha de Porto Santo, a geração renovável conta com uma capacidade instalada de 3,1 MW ($2 \times 0,225 + 1 \times 0,660 + 2$ MW). Por isso, a geração baseada em fontes renováveis nunca ultrapassa o valor da carga, isto é, não há excesso de energia que possa, por exemplo, ser armazenada para utilizar mais tarde.

Todavia, perspetivando um cenário futuro em que o SEE de Porto Santo se antevê ”mais verde” e, portanto, onde haja uma maior contribuição da produção renovável e uma redução do número de geradores térmicos convencionais em serviço de modo a reduzir os custos com combustível e melhorar o impacto ambiental, procedeu-se a um hipotético aumento da capacidade instalada de geração renovável. De referir que cenários onde haja um excesso de energia renovável serão uma realidade na ilha de Porto Santo, num futuro próximo [29].

Vão simular-se cenários onde passa a existir uma capacidade instalada de geração renovável igual a 6,43 MW, sensivelmente o dobro da atual. Foram introduzidas 2 turbinas eólicas de 660 kW para além da existente e um foi feito um aumento da capacidade instalada de geração solar PV para o dobro da existente (para 4 MW). Importa referir que não foi tido em conta a viabilidade económica do aumento feito. O único interesse foi ter uma contribuição de energia renovável de modo a simular alguns cenários e perceber a importância do uso de técnicas de gestão da carga bem como do uso do armazenamento neste tipo de contextos. O armazenamento permitirá maximizar a contribuição das renováveis, com todas as vantagens que lhe são reconhecidas e evitar possíveis desvantagens

(curtailment).

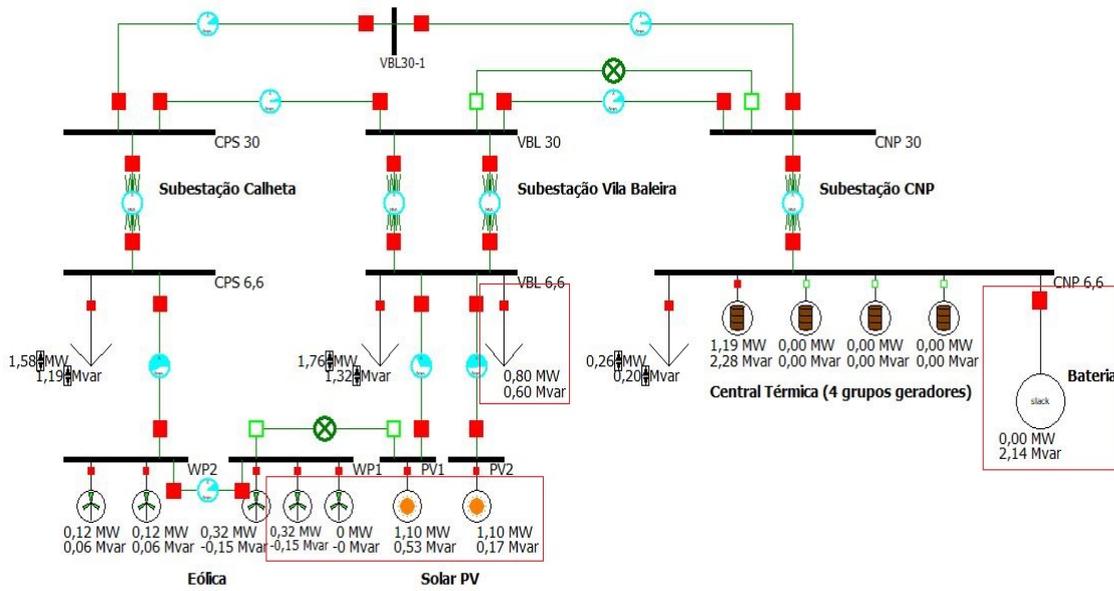


Figura 4.20: Diagrama Unifilar Com Mais Geração Renovável - Porto Santo

Foi realizada uma simulação, para a mesma semana simulada no caso base (secção 4.1), de modo a verificar o bom funcionamento do sistema de energia elétrico em termos de perfis de tensão e também apurar a existência de alguma sobrecarga nas linhas. Para este caso, a central dessalinizadora ainda apresenta o regime de funcionamento inicial, sem controlo.

A figura 4.21 diz respeito à geração renovável dessa semana, com valores de potência naturalmente mais elevados que no caso base.

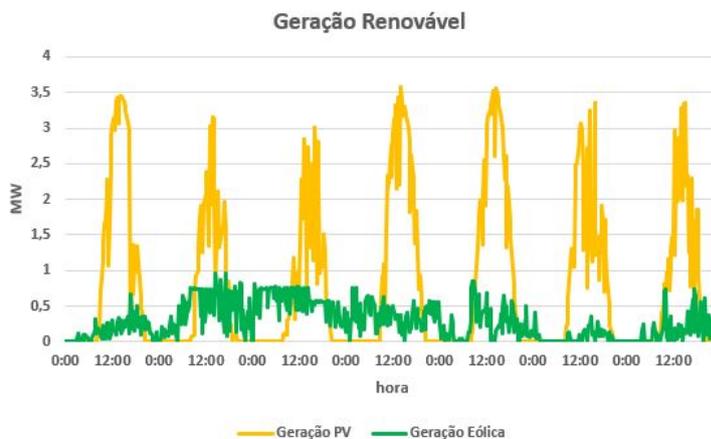


Figura 4.21: Geração Renovável para a semana simulada

Pela observação dos gráficos dos perfis de tensão (figuras 4.22 e 4.23) é possível concluir que os valores se encontram sempre dentro da gama admissível para a semana simulada, não se identifi-

cando qualquer problema.

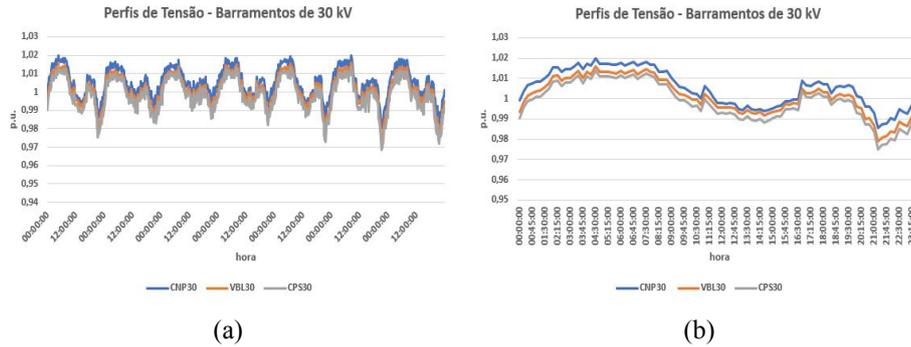


Figura 4.22: Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 30 kV

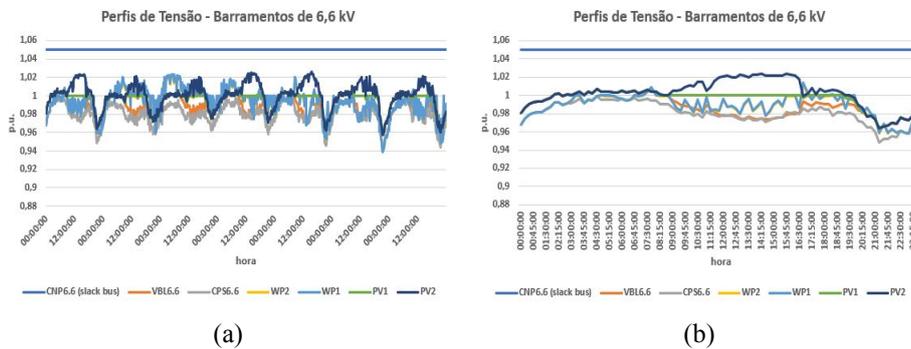


Figura 4.23: Perfis de tensão semanal (a) e de um dia (b) para os barramentos a 6.6 kV

Ao nível de sobrecarga nas linhas e transformadores, não se observou qualquer sobrecarga contudo, a linha que une o barramento PV2 ao barramento de 6,6 kV da subestação de Vila Baleira (VBL 6.6) encontra-se, durante as horas onde há maior produção fotovoltaica, com uma corrente que chega a atingir 87% da corrente máxima admissível, estipulada nos 188 A. A figura 4.24 representa um extrato dos dados da corrente dessa linha, no período mais crítico durante essa semana, obtidos após a simulação em *software*.

Time	11 (PV2) TO 5 (VBL 6,6) CKT 1 Amps From
13:45:00	163,14036560
14:00:00	164,22590637
14:15:00	164,22517395
14:30:00	163,75498962
14:45:00	162,22305298
15:00:00	160,11970520
15:15:00	157,48371887
15:30:00	154,46836853
15:45:00	149,97824097
16:00:00	146,10548401
16:15:00	141,74507141
16:30:00	127,62677002

Figura 4.24: Extrato de Dados Sobre a Corrente

Esta análise permite perceber que, caso se aumente com a capacidade de produção PV, é necessário substituir esta linha por uma com maior corrente máxima admissível, de modo a garantir a segurança e fiabilidade do sistema.

Com o aumento da geração renovável realizado e sem controlo da central dessalinizadora foi possível libertar um grupo térmico durante algumas horas dos dias simulados, reduzindo os custos de exploração, bem como a emissão de gases para a atmosfera. Contudo, deixou-se de verificar a condição N-1 na operação do SEE. Os gráficos de geração térmica para um dia da semana simulada e para a semana na totalidade encontram-se representados na figura 4.25.

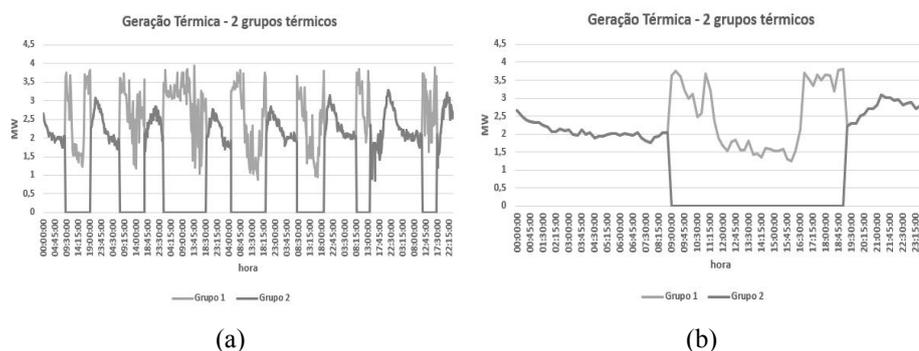


Figura 4.25: Geração Térmica semanal (a) e de um dia (b) para a semana de simulada

4.3.1 Integração de Armazenamento no SEE de Porto Santo

A introdução de um sistema de armazenamento na rede de Porto Santo pode trazer consigo algumas vantagens para o SEE. A sua implementação pode contribuir para a disponibilização de serviços de sistema essenciais ao bom funcionamento do SEE, como por exemplo reservas, aspeto ainda mais relevante em sistemas isolados como é o caso de Porto Santo. Como não há qualquer interligação com outro sistema elétrico, a reserva tem de ser suportada pelos geradores térmicos, disparando assim os custos de operação (sobretudo se estes estiverem apenas a fornecer reservas). A utilização de armazenamento pode disponibilizar de forma quase instantânea a potência necessária para a reserva girante, permitindo assim libertar, pelo menos, um grupo térmico. Além disto, é possível operar o sistema elétrico com um grupo ou sem qualquer grupo, em situações de emergência, até que seja possível colocar outro grupo térmico em serviço (um grupo térmico demora cerca de 15 minutos a arrancar). Este sistema pode cooperar em conjunto com os grupos térmicos com o objetivo de colmatar as grandes variações da geração renovável e assim permitir aumentar a sua penetração no sistema eletroprodutor. Também o deslastre de um grupo térmico pode deixar de ter problemas ao nível do critério N-1 se houver armazenamento com capacidade adequada.

Foi introduzido na rede um sistema de armazenamento (rodeado a vermelho na figura 4.20) com

uma potência de 4 MW (potência equivalente à de um grupo térmico) e com uma capacidade de armazenamento de 3 MWh. Esta bateria pode estar a funcionar à plena carga durante 45 minutos.

Como o *PowerWorld* não possui um modelo de bateria embutido para estudos em regime estacionário, o armazenamento foi modelado recorrendo a um gerador comum, que liga ou desliga em determinados momentos e que fornece ou absorve potência. Convencionou-se que se o sinal for positivo quer dizer que a bateria está a descarregar, se for negativo significa que a bateria está a carregar.

Para simular o uso do armazenamento, importa saber o estado de carga da bateria, isto é, é necessário calcular o SoC (*State of Charge*) da bateria para cada intervalo de tempo. As equações de carga (4.2) e descarga (4.3) da bateria são assim definidas [30]:

$$E(t + 1) = E(t) + \Delta t \cdot P_t^{E,c} \cdot \eta_c \quad (4.2)$$

$$E(t + 1) = E(t) - \Delta t \cdot P_t^{E,d} / \eta_d \quad (4.3)$$

onde $E(t)$ corresponde à energia armazenada na bateria no instante t , $P_t^{E,c}$ e $P_t^{E,d}$ correspondem à potência absorvida e fornecida, respetivamente, pela bateria durante o período t e Δt corresponde à duração de cada intervalo. η_c e η_d representam a eficiência de carga e descarga, respetivamente.

O SoC representa a razão entre a energia armazenada no instante t e a energia armazenável nominal (E_N):

$$SoC(t) = \frac{E(t)}{E_N} \cdot 100 \quad (4.4)$$

De maneira a prolongar a vida útil da bateria, foi definido um SoC mínimo, onde a bateria não pode descarregar para além desse valor. Normalmente, o SoC mínimo é estabelecido em 20% [30].

Por isto, a bateria poderá carregar ou descarregar no intervalo $20\% < SoC < 100\%$.

Para a criação dos diferentes cenários e no que diz respeito ao despacho da bateria, é importante referir que o estado de carga da bateria tem de fazer um ciclo diário, ou seja, a gestão feita da carga da bateria de um dia tem de voltar ao estado inicial considerado, o que significa que a quantidade de energia absorvida pela bateria tem de ser igual à descarregada.

4.3.1.1 Armazenamento do Excesso de Renovável

Uma das finalidades que se pretende com a utilização do armazenamento é acomodar a natureza intermitente da geração renovável. Ao introduzir baterias nos SEE passa a ser possível armazenar os eventuais excedentes de geração renovável que possam vir a ocorrer em algumas horas do dia e, assim, evitar o *curtailment* da geração renovável, isto é, evitar retirar de serviço os geradores renováveis. Essa energia armazenada pode ser depois utilizada noutros períodos, fazendo assim o balanço entre a geração e a procura. No caso da ilha de Porto Santo e com o aumento hipotético de geração renovável, pode existir excesso sobretudo nos meses fora da época turística, onde a carga baixa significativamente. Este excesso verifica-se nas horas de maior radiação solar, devido à capacidade instalada de geração PV.

A figura 4.26 representa um dia de outubro, onde se exemplifica o armazenamento do excesso de energia renovável na bateria, aproveitando tudo o que é gerado, evitando recorrer ao *curtailment* e, assim, melhorar a eficiência do SEE.

É importante salientar que, no início do dia, se considerou que o SoC da bateria era mínimo (20%) e que não se realizou qualquer descarga.

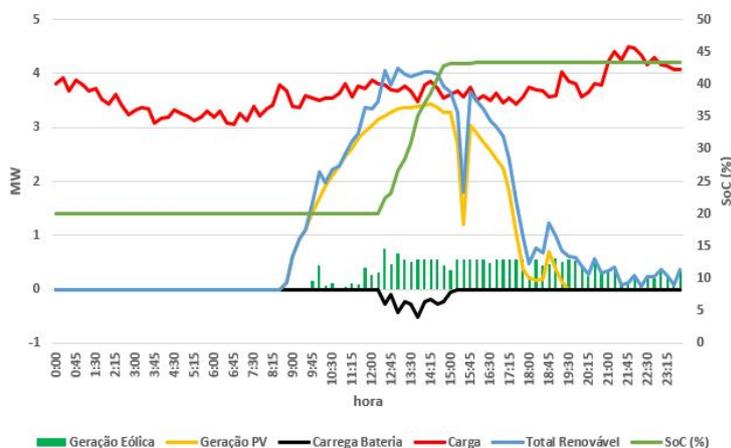


Figura 4.26: Exemplo de um dia com excesso renovável e seu armazenamento

4.3.1.2 Melhoria de Eficiência dos Grupos Geradores da Central Térmica

Para além de ser possível armazenar o excesso de energia proveniente das fontes de energia renovável as baterias podem servir para melhorar a eficiência da central térmica da ilha. Isto é possível porque o consumo específico das unidades geradoras dispara quando estas funcionam a potências muito mais baixas que a potência nominal. Então, quando o contributo dos geradores convencionais é baixo, devido à elevada geração renovável, pode-se fazer com que os geradores térmicos produzam

mais do que o necessário, armazenando o excesso nas baterias. Se for possível, pode-se inclusive evitar o seu funcionamento, utilizando as baterias para cobrir a procura. É importante salientar que o uso de baterias acarreta perdas e a sua carga/descarga tem impacto na sua vida útil. Isto leva a que o ganho de eficiência nos grupos térmicos tenha de compensar o uso do armazenamento. A figura 4.27 representa a curva do consumo específico dos geradores da central térmica da ilha de Porto Santo, comprovando o que foi dito anteriormente. Os dados usados para a construção do gráfico foram fornecidos pela EEM.

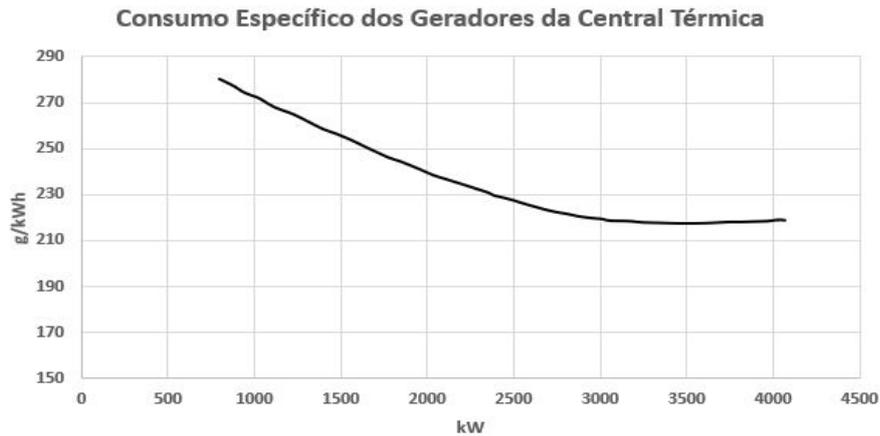


Figura 4.27: Consumo Específico dos Geradores da Central Térmica

De forma a comprovar que é possível reduzir o consumo específico da central térmica, aumentando a produção dos grupos geradores e armazenando o excesso foi selecionado um dia de março, criando um cenário de funcionamento do SEE com utilização de armazenamento. O gráfico da figura 4.28 tem representado a carga, que inclui a central dessalinizadora sem controlo, a geração renovável para esse dia e o diagrama de carga/descarga da bateria.

Pela observação da figura 4.28, é possível verificar que a bateria começa a armazenar energia por volta das 10h30min devido ao aumento propositado da produção do grupo gerador em serviço. Nesse momento, o grupo gerador estava quase no mínimo da sua produção, e por isso a sua eficiência era baixa, tal como indica a figura 4.27. Quando a bateria atinge o seu estado máximo de carga, esta começa a descarregar, sendo possível ter o sistema a funcionar apenas com a bateria e com energia proveniente de fontes renováveis, sensivelmente entre as 12h45min e as 16h30min. Importa realçar que a curva cinzenta do gráfico da figura 4.29 foi calculada tendo em conta a carga e a geração renovável disponível. Fisicamente, os grupos térmicos não podem funcionar com potências abaixo dos 0,8 MW. Para esses casos, estariam sempre a gerar 0,8 MW, onde o balanço seria feito recorrendo às baterias, que armazenariam energia para utilizar mais tarde, ou ao *curtailment* da geração renovável.

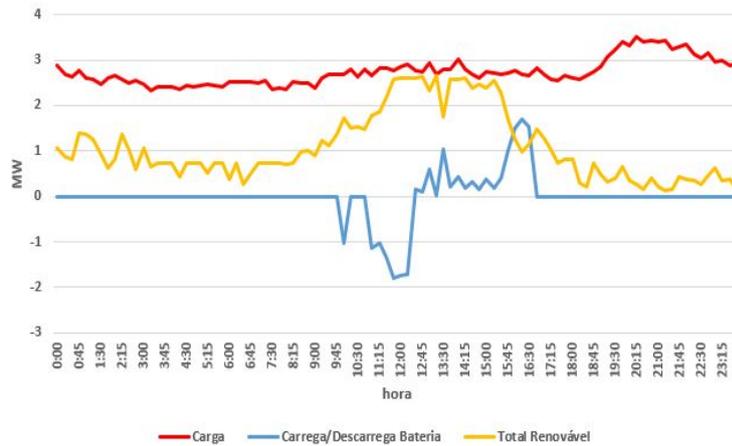


Figura 4.28: Carga, Geração Renovável e Utilização de Bateria para um dia



Figura 4.29: Geração térmica para o dia simulado

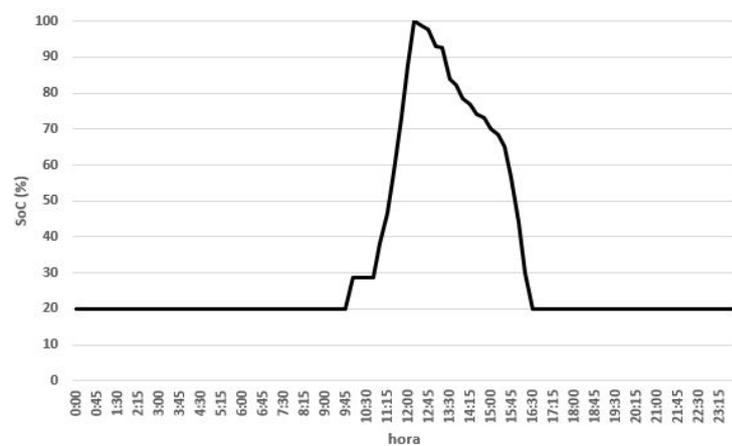


Figura 4.30: Estado de Carga (SoC) da bateria para o dia simulado

De modo a perceber se o cenário criado não traz problemas ao nível dos parâmetros em regime permanente, introduziu-se todos os dados relativos ao dia simulado no PW, incluindo o despacho da

bateria para esse dia de modo a extrair os parâmetros após correr a simulação.

Na figura 4.31 estão representados os perfis de tensão para os diferentes barramentos da rede.

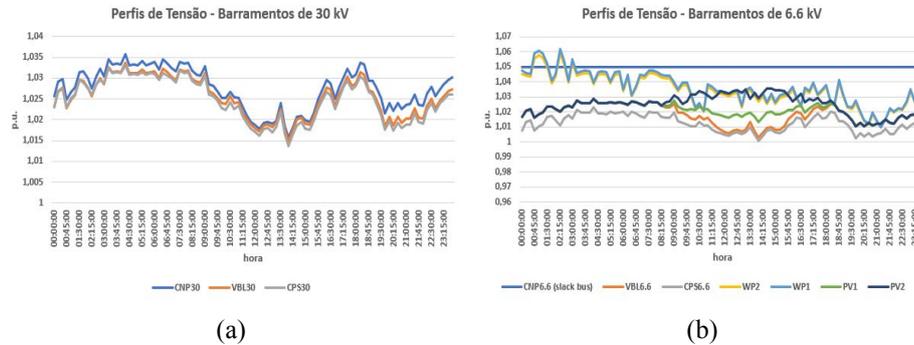


Figura 4.31: Perfis de Tensão Para os Barramentos de 30 kV (a) e Perfis de Tensão Para os Barramentos de 6,6 kV (b) Para o Dia Simulado

A observação dos resultados da simulação não revelam qualquer problema ao nível de perfis de tensão. Relativamente ao fluxo de potências nas linhas também não se verificou qualquer anomalia. Importa referir que o facto de durante um certo período de tempo não existir qualquer grupo térmico conectado ao sistema pode trazer problemas ao nível da estabilidade transitória, nomeadamente no controlo da frequência. Este tipo de estudo está incluído na secção de trabalhos futuros, inerente a este trabalho.

Através da criação deste cenário percebe-se facilmente que a introdução do armazenamento no sistema traz consigo várias vantagens. Em primeiro lugar, é possível melhorar a eficiência da central térmica, reduzindo os consumos de combustível da mesma, pois foi possível aumentar a produção quando os grupos funcionavam com potências próximas do seu mínimo (sensivelmente entre as 10h30min e as 12h00min). Em segundo lugar foi possível desligar todos os grupos geradores da central térmica, durante um certo período de tempo (entre as 12h45 e as 16h30min), reduzindo a emissão de gases com efeito de estufa e tirando o máximo partido das fontes de energia renovável e da bateria, apesar de se deixar de verificar a condição N-1.

4.3.1.3 Uso de Armazenamento em Conjunto com o Controlo da Central Dessalinizadora

A utilização conjunta do armazenamento de energia em baterias com o controlo da central dessalinizadora pode trazer vantagens adicionais, quer do ponto de vista do SEE, quer do ponto de vista da operação da dessalinizadora. A figura 4.32 ilustra a composição do SEE final da ilha, incluindo o armazenamento e o controlo das unidades da central dessalinizadora [31].

A grande finalidade da gestão integrada de todos os recursos presentes na figura 4.32 é conseguir utilizar o máximo possível de energia renovável, sem recorrer ao *curtailment* e reduzir ou anular o funcionamento da central térmica. Para tal, deve-se mover os períodos de funcionamento da central dessalinizadora para horas onde há excesso de energia renovável. Se a central não puder funcionar nesses períodos, quer devido aos limites dos reservatórios, quer por manutenções forçadas, esse excesso poderá ser armazenado no sistema de baterias. Caso a carga total seja ainda inferior à geração renovável, com a dessalinizadora a funcionar à sua potência nominal, esse excesso deverá ser armazenado. Se, por outro lado, a geração renovável não for suficiente para cobrir as necessidades da central dessalinizadora, ou recorre-se apenas às baterias, se for suficiente, ou recorre-se às baterias e aos geradores convencionais.

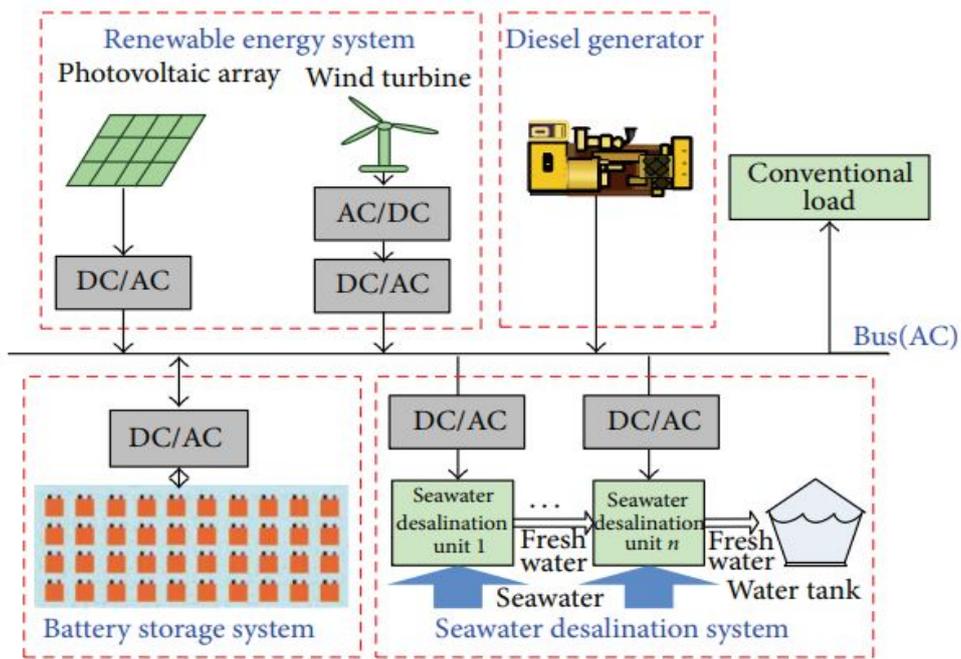


Figura 4.32: Esquema Completo dos Recursos do SEE da Ilha de Porto Santo [31]

Matematicamente, é possível caracterizar o descrito até aqui. O gráfico da figura 4.33 representa um exemplo de uma semana de maio, com excesso e déficit de produção renovável ao longo dos dias. Este gráfico contém as curvas mais relevantes e que permitem agendar o funcionamento da central dessalinizadora. Com o funcionamento da central agendado, é possível ajustar a carga/descarga do armazenamento e o funcionamento da geração térmica, caso necessário, garantindo o equilíbrio do SEE.

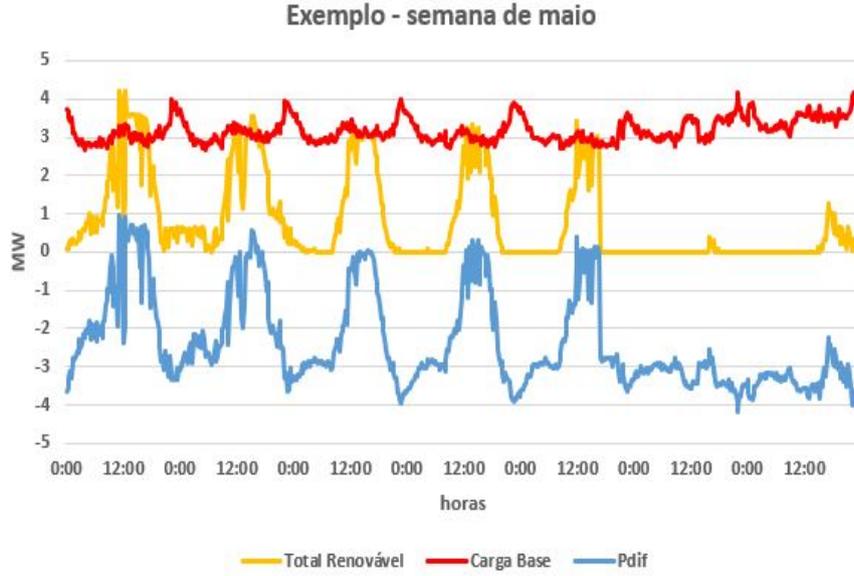


Figura 4.33: Exemplo - semana de maio - Dados da Carga Base, Geração Renovável e P_{dif}

A diferença entre a geração renovável disponível e carga base da ilha (sem incluir a central dessalinizadora), pode ser expressa como:

$$P_{dif}(t) = P_{Eolica}(t) + P_{PV}(t) - P_{Carga}(t) \quad (4.5)$$

onde $P_{Eolica}(t)$ é a potência gerada a partir do vento, $P_{PV}(t)$ é a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos e P_{Carga} é a potência da carga base, sem a central dessalinizadora, para o instante t .

Conhecendo P_{dif} e comparando este valor com o valor mínimo de potência de funcionamento da central dessalinizadora (P_{dessal_min}), se:

$$P_{dif}(t) \leq P_{dessal_min}(t) \quad (4.6)$$

então, se a central dessalinizadora tiver de funcionar nesse período, ela deve funcionar na sua potência mínima, se for suficiente para suprimir a procura de água. Se a potência $P_{dif}(t)$ for deficitária para a procura total nesse instante, deve-se recorrer ao sistema de armazenamento, caso esteja disponível, onde a potência de descarga é dada por:

$$P_t^{E,d} = P_{Carga}(t) + P_{dessal}(t) - (P_{Eolica}(t) + P_{PV}(t)) \quad (4.7)$$

Importa realçar que para a equação (4.7) se estão a excluir as perdas no sistema.

Através das equações (4.5) e (4.7) retira-se que:

$$P_t^{E,d} = P_{Carga}(t) + P_{dessal}(t) - (P_{dif}(t) + P_{Carga}(t)) \quad (4.8)$$

e, finalmente:

$$P_t^{E,d} = P_{dessal}(t) - P_{dif}(t) \quad (4.9)$$

Em períodos de indisponibilidade do armazenamento, devido à sua descarga total, deve-se recorrer à geração convencional.

Comparando P_{dif} com o valor máximo de potência de funcionamento da central de dessalinização (P_{dessal_max}), se:

$$P_{dif}(t) > P_{dessal_max}(t) \quad (4.10)$$

a central dessalinizadora deve funcionar à sua potência nominal, mesmo não havendo necessidade de água nesse instante. Utilizam-se, neste caso, os reservatórios para armazenar água e utilizá-la noutros períodos. Nesta situação, é possível anular o funcionamento por parte dos geradores convencionais. Tal como descrito atrás, se mesmo assim ainda existir algum excesso de energia, este deve ser armazenado, se possível. A potência absorvida pela bateria será dada por:

$$P_t^{E,c} = P_{dif}(t) - P_{dessal}(t) \quad (4.11)$$

Utilizando todos os recursos à disposição do SEE da ilha e tirando o máximo partido das suas potencialidades, quer seja de forma isolada, quer seja de forma integrada, é possível maximizar o uso de energias limpas e minimizar o uso de energia proveniente da central térmica, reduzindo consumos e emissão de gases poluentes. Desta forma, a coordenação do uso do armazenamento em conjunto com o controlo da central dessalinizadora torna-se num pilar fundamental para um melhor e mais eficiente SEE neste local.

Capítulo 5. Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

O trabalho aqui apresentado teve como grande objetivo a análise dos impactos que o uso do armazenamento e ações de gestão de carga podem ter, em pequenos sistemas elétricos de energia isolados e com reduzida inércia natural, como é o caso do sistema da ilha de Porto Santo. Essa análise de impactos traduziu-se num estudo quer ao nível das variáveis de controlo do SEE (especificamente ao nível de tensões nos barramentos e nível de carga nos diferentes elementos da rede), quer ao nível da redução do consumo de combustíveis e emissão de gases poluentes, resultantes do uso da geração térmica convencional. Para além disto, analisou-se ainda o potencial que o armazenamento e a gestão controlada de uma central dessalinizadora têm na acomodação de mais fontes de energia renovável intermitente e, verificou-se que o seu impacto de uma forma geral, é positivo.

Relativamente à gestão controlada de cargas, identificou-se no caso específico da ilha de Porto Santo, a central dessalinizadora, que devido às suas características e influência no diagrama de carga da ilha, tinha todas as potencialidades para ser usada como carga controlável. Verificou-se que através do seu controlo e utilizando os reservatórios de água como sistemas de armazenamento de energia é possível suavizar as flutuações resultantes da intermitência das renováveis, sem constrangimentos ao nível das tensões e na carga dos diferentes elementos da rede. A suavização dos diagramas permitiu reduzir as perdas ativas no SEE.

No que diz respeito ao armazenamento, também foram identificadas melhorias no SEE com a sua introdução. Neste trabalho analisou-se as possibilidades de utilização do armazenamento num cenário de expansão da capacidade instalada de geração renovável, com o grande objetivo de utilizar apenas energia proveniente de fontes renováveis. Através da utilização de um sistema de armazenamento com as características idênticas ao já instalado na ilha, provou-se que é possível armazenar o excesso de energia renovável que pode ocorrer em algumas horas do dia, bem como melhorar a eficiência da central térmica, quando esta funciona a baixas potências. Com a utilização deste recurso, é possível concluir que se reduzem os consumos de combustível e ainda se minimiza a emissão de gases poluentes através da minimização das horas de funcionamento da central térmica. Contudo, a capacidade de armazenamento das baterias utilizadas para o aumento de renovável realizado é, de

certo modo, reduzida. Nas simulações realizadas, o excesso de renovável foi, por vezes, superior à capacidade de armazenamento e também não foi possível cobrir por um maior período a diferença entre a renovável disponível e a carga da ilha. Deve-se, por isso, considerar um possível aumento dessa capacidade de armazenamento, caso se realize um aumento da produção renovável na ilha de Porto Santo.

Em suma, é possível afirmar que o alargamento da capacidade instalada de fontes de energia renovável em vez das tradicionais centrais térmicas, em pequenos sistemas isolados, como é o caso da ilha de Porto Santo traz consigo vantagens contudo, é necessário estudar os diferentes fenómenos e adotar medidas que possam permitir integrar essas fontes sem prejuízo para a segurança e fiabilidade do SEE. Esses estudos e medidas englobam todas as estratégias que foram aqui abordadas e muitas outras, que estão descritas na secção seguinte. É imperativo caminhar para um futuro sustentável, no que à produção e consumo de energia elétrica diz respeito, mas tendo sempre como foco a estabilidade dos SEE e a comodidade dos seus utilizadores.

5.2 Trabalho Futuro

De modo a dar continuidade ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, a criação de algoritmos que possam controlar a central dessalinizadora em conjunto com o armazenamento, de forma automática, aplicando as estratégias aqui abordadas, seria mais um importante desenvolvimento para aplicar no caso real da ilha de Porto Santo.

Para além disto, sugere-se uma análise ao nível da estabilidade transitória para diferentes níveis de penetração de renováveis, partindo do uso dos modelos já utilizados neste trabalho. Para isso, um dos objetivos seria simular diversos eventos que possam ocorrer nos diferentes elementos do sistema de energia elétrico e perceber como é a resposta da frequência para instantes diferentes. Nesta análise em regime transitório seria também importante avaliar o contributo dos sistemas de armazenamento, bem como ações de gestão de carga para a manutenção/reposição do valor nominal da frequência. Para isso, seria necessário a construção de modelos fidedignos das baterias utilizadas.

Outro aspeto importante e que poderia ser alvo de um estudo mais aprofundado seria a análise da viabilidade económica da introdução de um maior capacidade instalada de geração renovável, viabilidade essa que não foi tida em conta na realização do presente trabalho.

Bibliografia

- [1] E. Association, *EU Energy Policy to 2050*. Ewea. [Online]. Available: <https://books.google.pt/books?id=HyWEI1cqXboC>
- [2] H. Vasconcelos, C. Moreira, A. Madureira, J. P. Lopes, and V. Miranda, “Advanced control solutions for operating isolated power systems: examining the portuguese islands.” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 25–35, 2015.
- [3] A. S. L. Hugo Branco, Rui Castro, “Battery energy storage systems as a way to integrate renewable energy in small isolated power systems,” in *Energy for Sustainable Development*, vol. 43, 2018, pp. 90–99.
- [4] D. Lew, L. Bird, M. Milligan, B. Speer, X. Wang, E. Carlini, A. Estanqueiro, D. Flynn, E. Gomez-Lazaro, N. Menemenlis, A. Orths, C. Cantor, J. Smith, L. Soder, P. Sorensen, and Y. Yoh, “Wind and solar curtailment,” October 2013.
- [5] R. Torabi, A. Gomes, and F. Morgado-Dias, “The duck curve characteristic and storage requirements for greening the island of porto santo,” in *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*, July 2018, pp. 1–7.
- [6] G. Delille, B. François, and G. Malarange, “Dynamic frequency control support: A virtual inertia provided by distributed energy storage to isolated power systems,” in *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*. IEEE, 2010, pp. 1–8.
- [7] Y.-K. Wu, T.-C. Lee, T.-Y. Hsieh, and W.-M. Lin, “A review of technical requirements for high penetration of wind power systems,” *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 2, no. 12, p. 11, 2014.
- [8] K. Samarakoon, J. Ekanayake, and N. Jenkins, “Investigation of domestic load control to provide primary frequency response using smart meters,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 282–292, 2012.
- [9] D. Kottick, M. Blau, and D. Edelstein, “Battery energy storage for frequency regulation in an island power system,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 8, no. 3, pp. 455–459, 1993.

- [10] P. Penkey, N. Gaul, B. K. Johnson, and H. L. Hess, "Sizing and location identification for an electrical energy storage system in a renewable microgrid," in *2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, Oct 2016, pp. 83–88.
- [11] A. C. da Silva, "Utilização de sistemas de armazenamento de energia para melhoria das condições de estabilidade de redes isoladas," Master's thesis, Faculdade Engenharia Universidade do Porto, 2015.
- [12] P. Medina, A. W. Bizuayehu, J. P. Catalão, E. M. Rodrigues, and J. Contreras, "Electrical energy storage systems: technologies' state-of-the-art, techno-economic benefits and applications analysis," in *System sciences (HICSS), 2014 47th Hawaii international conference on*. IEEE, 2014, pp. 2295–2304.
- [13] E. dos Açores, "Edainforma," 2019, Último acesso em 11/02/2020. [Online]. Available: https://www.eda.pt/Mediateca/Publicacoes/Lists/EDAINFORMA/Attachments/160/EDAINFORMA_167_ABR%202019.pdf
- [14] ERSE, *MANUAL DE PROCEDIMENTOS DA GESTÃO GLOBAL DO SISTEMA DO SETOR ELÉTRICO*, 1st ed., ERSE, Rua Dom Cristóvão da Gama n.º 1-3.º 1400-113 Lisboa, 4 2014.
- [15] ENTSO-E, "P1-policy 1: Load-frequency control and performance," 2009, Último acesso em 10/02/2020. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf
- [16] A. Etxegarai, P. Eguia, E. Torres, A. Iturregi, and V. Valverde, "Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1501–1514, 2015.
- [17] E. Nycander and L. Söder, "Review of european grid codes for wind farms and their implications for wind power curtailments," in *17th International Wind Integration Workshop Stockholm, Sweden| 17–19 October 2018*, 2018.
- [18] C. Roberts, "Review of international grid codes," *Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL Report: LBNL-2001103*, 2018.
- [19] A. Basit, A. D. Hansen, I. Margaritis, and J. C. Hansen, "A review of grid requirements for wind farm in denmark and china," in *China wind power 2012 conference*, 2012.
- [20] C. C. Chistolini, "Development of a modelling tool for analysis of specified renewable energy penetration scenarios. case study of porto santo, madeira," Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2018.

- [21] D. de Estudos e Planeamento, “Caracterização da rede de transporte e distribuição em at e mt,” 2018, Último acesso em 30/12/2019. [Online]. Available: https://www.eem.pt/media/412438/caract_sepm_2018.pdf
- [22] C. para a Inovação em Engenharia Electrotécnica e Energia, “Tres - transição para um modelo energético sustentável,” 2012, Último acesso em 16/10/2019. [Online]. Available: https://www.dropbox.com/sh/32fkau112thuqvww/AAA1x434t-vtLySxKBHDLgzqa/Projetos/TRES?dl=0&preview=TRES-Estabilidade+Dinamica+das+redes_fase+1.pdf&subfolder_nav_tracking=1
- [23] I. A. S. Valente, “Integração de bancos de baterias em redes elétricas isoladas,” Master’s thesis, Universidade da Madeira, 2015.
- [24] F. Mohammadi, M. Sahraei-Ardakani, and Y. Al-Abdullah, “Coordinated operation of power generation and water desalination,” 09 2018.
- [25] A. Águas e Resíduos da Madeira, “Dessalinização - uma solução de futuro?” 2017, Último acesso em 30/12/2019. [Online]. Available: <https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/regioes/madeira/nunopereira.pdf>
- [26] —, “Central dessalinizadora do porto santo e redes de distribuição de Água,” 2019, Último acesso em 23/12/2019. [Online]. Available: https://poseur.portugal2020.pt/media/41662/central-dessalinizadora-do-porto-santo_arm.pdf
- [27] R. Torabi, A. Gomes, and F. M. Dias, “Demand management for load smoothing in small power systems: the case of porto santo island,” in *2019 International Conference in Engineering Applications (ICEA)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [28] J. Gonçalves, “Alternativas integradas para sistemas elétricos isolados mais sustentáveis – o caso de porto santo,” Master’s thesis, Universidade de Coimbra, 2018.
- [29] L. M. C. Gouveia, “Projeto de ligação elétrica entre a ilha da madeira e a ilha do porto santo,” Master’s thesis, Universidade da Madeira, 2018.
- [30] K. Le Dinh, “Coordinated bess control for improving voltage stability of a pv-supplied micro-grid,” 09 2013.
- [31] Q. Tang, N. Liu, and J. Zhang, “Optimal operation method for microgrid with wind/pv/diesel generator/battery and desalination,” *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, 2014.

Anexos

ANEXO A - Características dos Grupos Geradores da Central Térmica

Grupo	Grupos desativados	Grupos Ativos
Potência do motor (cv)	7200	5880
Tipo	Diesel	Diesel
Construtor	Milress	Sulzer
Potência do Gerador (kVA)	6431	5160
Potência efetiva (kW)	3500	4000
Tensão (V)	6600	6600
Tipo de Corrente	AC	AC
Frequência (Hz)	50	50
Construtor	Brush	Leroy Sommer
Ano de Montagem	1992	1998/2001/2008

Tabela 1: Características técnicas dos grupos electrogéneos da Central Térmica do Porto Santo

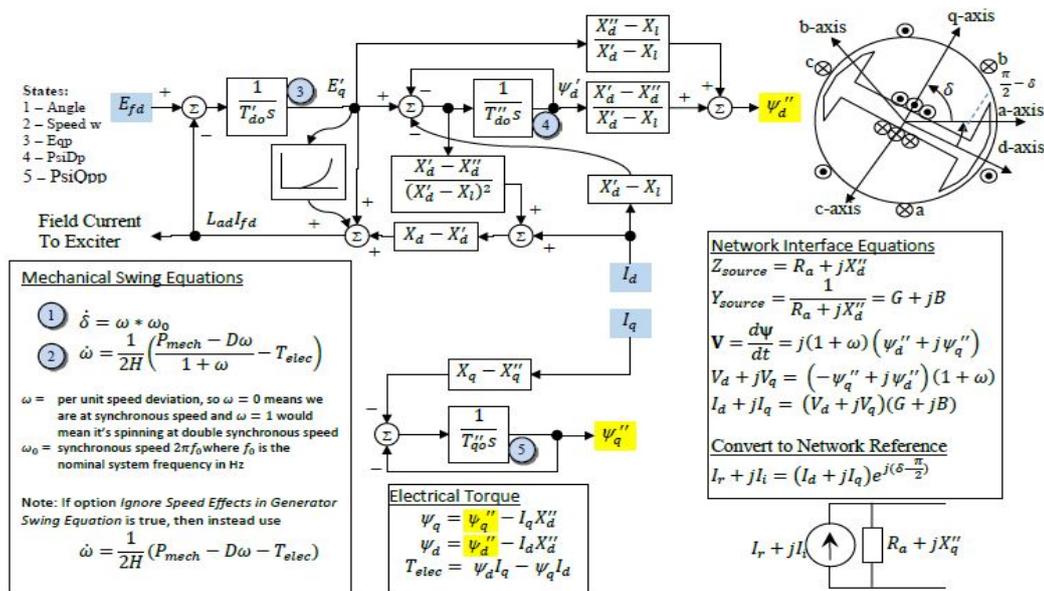


Figura 1: Diagrama de Blocos do modelo GENSA

Geradores Síncronos da Central Térmica		
Parâmetro	Abreviatura	Grupos Ativos
Tensão (kV)	Un	6,6
Potência (MVA)	Sn	5,16
Potência (MW)	Pn	4
Fator de Potência	Cos(φ)	0,8
Potência Máxima (MW)	Pmax	4
Potência Mínima (MW)	Pmin	1,7
Constante de Inércia (s) para Sb=Sn	H	7,34
Fator de Amortecimento (pu/Hz)	D	0,01
Resistência do Estator (pu)	Ra	0
Reatância do Eixo Direto (pu)	Xd	1,431
Reatância do Eixo em Quadratura(pu)	Xq	0,941
Reatância Transitória do Eixo Direto (pu)	Xd'	0,288
Reatância Subtransitória do Eixo Direto (pu)	Xd''	0,212
Reatância de fugas do estator (pu)	Xl	0,15
Constante Temporal de Regime Transitório do Eixo Direto do Rotor (s)	T'd0	2,98
Constante Temporal de Regime Subtransitório do Eixo Direto do Rotor (s)	T''d0	0,04
Constante Temporal de Regime Subtransitório do Eixo em Quadratura do Rotor (s)	T''q0	0,12
Função de Saturação do Fluxo a 1 pu	S1	1,5
Função de Saturação do Fluxo a 1,2 pu	S12	1,8

Tabela 2: Parâmetros dos geradores síncronos - Central Térmica do Porto Santo

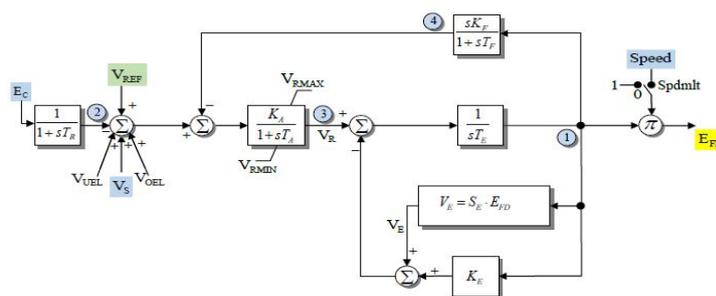


Figura 2: Diagrama de Blocos do modelo IEEE1

Excitação e Regulador Automático de Tensão (AVR) - IEEE1		
Parâmetro	Abreviatura	Grupos Ativos
Constante Temporal do Filtro Passa Baixo (s)	Tr	0,023
Ganho do Regulador	Ka	200
Constante Temporal do Regulador (s)	Ta	0,84
Limite Superior de Saída (pu)	Vrmax	3,5
Limite Inferior de Saída (pu)	Vrmin	-2,5
Ganho da Excitatriz	Ke	1
Constante Temporal da Excitatriz (s)	Te	0,3
Ganho da Retroacção Diferencial	Kf	0,12
Constante Temporal da Retroacção Diferencial (s)	Tf	0,9
Valor de EFD	E1	2,47
Saturação ao Valor E1 de EFD	S(E1)	0,035
Valor de EFD	E2	3,5
Saturação ao Valor E2 de EFD	S(E2)	0,6

Tabela 3: Dados dos reguladores de tensão - Central Térmica de Porto Santo

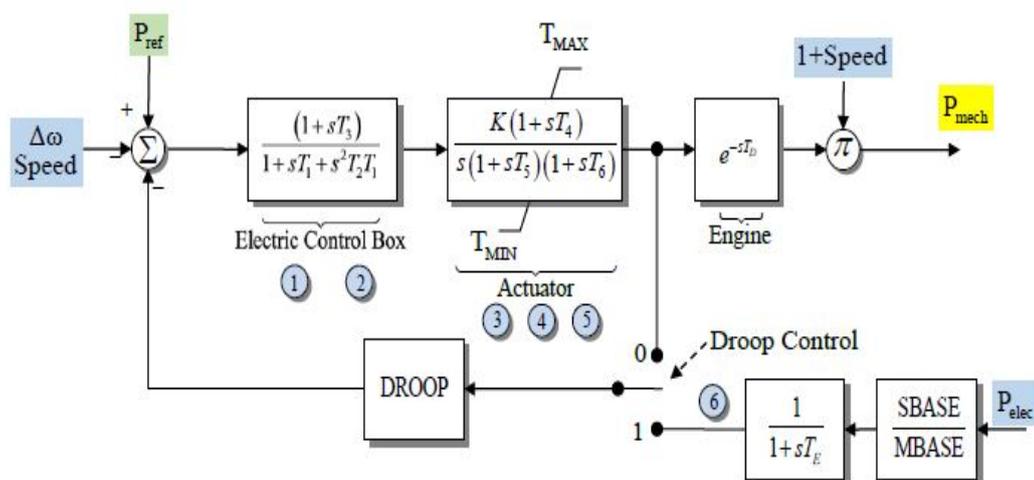


Figura 3: Diagrama de Blocos do modelo DEGOV1

Regulador Carga-Velocidade - DEGOV1		
Parâmetro	Abreviatura	Grupos Ativos
Constantes Temporais Relativas ao Sensor Elétrico de Velocidade (s)	T1	0,2
	T2	0,3
	T3	0,5
Constantes Temporais Relativas ao Atuador (s)	T4	1
	T5	0,1
	T6	0,2
Ganho do Regulador	K	10
Constante Temporal do Motor (s)	TD	0,045
Binário Máximo	Tmax	1
Binário Mínimo	Tmin	0
Escorregamento em Regime Permanente	Droop	0,07
Constante Temporal de Controlo Adicional (s)	Te	0

Tabela 4: Dados dos reguladores carga-velocidade - motores de combustão interna de Porto Santo

ANEXO B - Características dos Geradores Eólicos

Dados do Gerador Eólico (Rotor Bobinado) de 660 kW		
Parâmetro	Abreviatura	WP1 (ENEREEM)
Tensão (kV)	Un	0,69
Potência (kVA)	Sn	750
Potência Máxima (kW)	Pmax	660
Potência Mínima (kW)	Pmin	0
Reatância do Estator (pu)	XA	0,1070
Reatância de Magnetização (pu)	XM	4,427
Reatância do Rotor (pu)	X1	0,14
Resistência do Rotor (pu)	R-ROT-MACH	0,0063
Soma da Resistência do Rotor com a Resistência Externa Total (pu)	R-ROT-MAX	0,1021
Primeira Coordenada de Saturação (pu)	E1	1
Função de Saturação do Fluxo Magnético a E1	S(E1)	0
Segunda Coordenada de Saturação (pu)	E2	1,2
Função de Saturação do Fluxo Magnético a E2	S(E2)	0
Par de Coordenadas da Curva "Power-Slip"	Pref1	0
	Pref2	0,0217
	Pref3	0,8988
	Pref4	0,9
	Pref5	0,9050
Curva "Power-Slip"	Slip1	0
	Slip2	0,0054
	Slip3	0,02
	Slip4	0,04
	Slip5	0,1

Tabela 5: Dados do Gerador Eólico (Rotor Bobinado) Vestas V-47

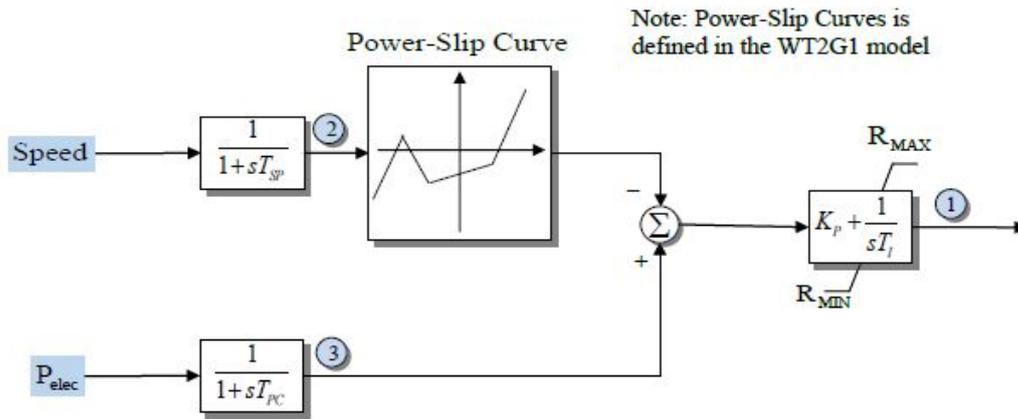


Figura 4: Diagrama de Blocos do Controlador da Resistência Rotórica

WT2E1		
Parâmetro	Abreviatura	WP1 - ENEREEM
Constantes dos Integradores	Tsp	0,05
	Tpe	0,05
	Ti	1,00
Ganho Proporcional	Kp	1,00
Máxima Resistência Externa do Rotor (pu)	Rmax	0,99
Mínima Resistência Externa do Rotor (pu)	Rmin	0,05

Tabela 6: Parâmetros do Controlador da Resistência Rotórica da Turbina Vestas-V47

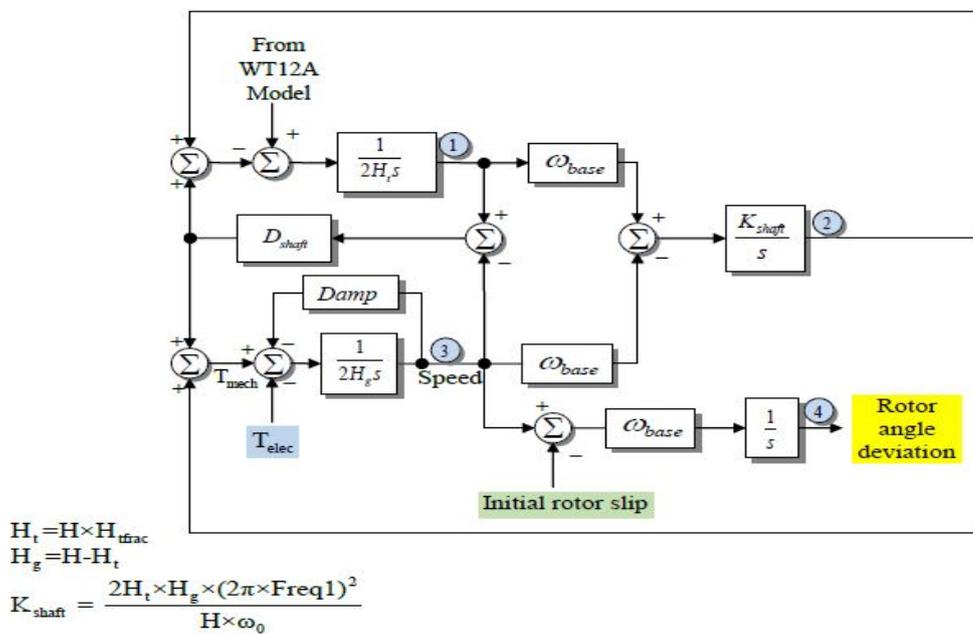


Figura 5: Diagrama de Blocos do Modelo do Veio das Turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47

WT12T1			
Parâmetro	Abreviatura	WP1 - ENEREEM	WP2 - EEM
Constante de Inércia do Rotor (s)	H	4,94	2
Fator de Amortecimento	D	0	0
Variáveis Inerentes ao Veio das Turbinas	Hfrac	0,81	0,918
	Freq1	1,5	5
	Dshaft	0,3	1

Tabela 7: Parâmetros do modelo do veio das turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47

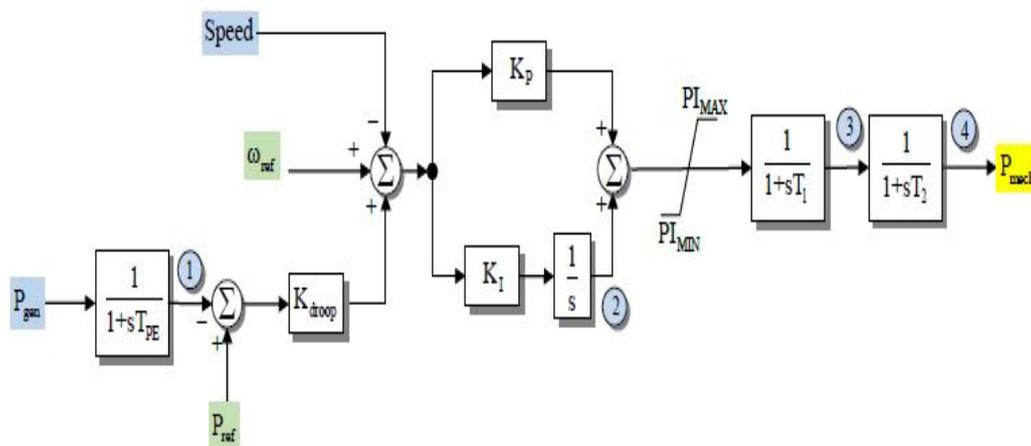


Figura 6: Diagrama de Blocos do Modelo Aerodinâmico das Turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47

WT12A1			
Parâmetro	Abreviatura	WP1 - ENEREEM	WP2 - EEM
Ganho	Droop	0,015	0,015
Ganho Proporcional PI	Kp	20	0,1
Constante de Tempo do Integrador	Ti	1	0,05
Constante Temporal (s)	T1	0,1	0,1
	T2	0,1	0,1
	Tpe	0,1	0,1
Ângulo Máximo (graus)	Pimax	1	0,910
Ângulo Mínimo (graus)	Pimin	0,250	0,250

Tabela 8: Parâmetros do modelo aerodinâmico das turbinas Vestas-V29 e Vestas-V47

Dados dos Geradores Eólicos (Indução Rotor em Gaiola) de 2*225 kW		
Parâmetro	Abreviatura	WP2 (EEM)
Tensão (kV)	Un	0,4
Potência (kVA)	Sn	250
Potência Máxima (kW)	Pmax	225
Potência Mínima (kW)	Pmin	0
Resposta Temporal Transitória em Circuito Aberto (pu)	T'	0,52
Resposta Temporal Constante Subtransitória (pu)	T''	0,00
Reatância Síncrona (pu)	X	2,49
Reatância Transitória (pu)	X'	0,28
Reatância Subtransitória (pu)	X''	0,00
Reatância de Fugas do Estator (pu)	Xl	0,11
Primeira Coordenada de Saturação	E1	1
Função de Saturação do Fluxo Magnético a E1	S(E1)	0,03
Segunda Coordenada de Saturação	E2	1,2
Função de Saturação do Fluxo Magnético a E2	S(E2)	0,179

Tabela 9: Dados dos Geradores Eólicos (Indução Rotor em Gaiola) Vestas V-29