

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Avaliação do Impacto da Integração de Produção
Dispersa de Origem Renovável na Rede Eléctrica
de Santiago - Cabo Verde**

José Autílio Moreira da Silva

VERSÃO FINAL

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

Orientador: Prof. Doutor Carlos Coelho Leal Moreira
Co-orientador: Prof. Doutora Fernanda Resende

Janeiro de 2011

Resumo

Hoje em dia tem-se assistido uma crescente preocupação na mudança de paradigma no que concerne à produção de energia eléctrica a nível mundial e também em Cabo Verde. Esta mudança de paradigma tem por base a produção de electricidade a partir de fontes renováveis, uma vez que a energia renovável é a matriz do desenvolvimento sustentável da sociedade moderna.

Nesta dissertação é avaliado o impacto da integração de Produção Dispersa (PD) de Origem Renovável na Rede Eléctrica de Santiago - Cabo Verde. A instalação de pequenas unidades de produção de electricidade em diferentes pontos da rede eléctrica exige o desenvolvimento de estudos que identifiquem eventuais situações de perda de estabilidade na rede na sequência de perturbações com origem no recurso renovável. A capacidade da rede aceitar mais ou menos integração da produção dispersa de origem renovável está directamente relacionada com a estabilidade/desvios de frequência que possam ser observados na rede na sequência dessas perturbações.

Assim sendo, a análise efectuada passa pela identificação de modelos dinâmicos adequados à representação do comportamento dos diversos elementos constituintes da rede eléctrica, quer sejam máquinas convencionais, quer sejam sistemas de geração de origem renovável, nomeadamente parques eólicos e parques solares fotovoltaicos. Os modelos adoptados foram então integrados em ambiente *Matlab/Simulink®*, permitindo constituir uma plataforma de simulação dinâmica de redes isoladas com produção de origem renovável.

A avaliação do impacto resultante da integração de produção renovável incidiu sobre a ilha de Santiago, procedendo-se para tal a uma caracterização detalhada de cenários de operação críticos, bem como de perturbações para as quais é necessário garantir condições de estabilidade, nomeadamente no que se refere a desvios de frequência que podem ocorrer na rede na sequência de determinadas perturbações. As perturbações seleccionadas consistem em variações de produção de origem renovável, resultantes da variação do recurso natural que lhes está associado. Procedeu-se ainda à avaliação da necessidade de serem instalados dispositivos de armazenamento de energia do tipo volante de inércia para garantia de condições de estabilidade da rede em face das perturbações consideradas.

Abstract

Today there has been a growing concern in the paradigm shift regarding to power generation worldwide and also in Cape Verde. This paradigm shift is based on the power generation from renewable sources since it is the matrix of the sustainable development of modern society.

This dissertation evaluates the impact of the integration of Distributed Generation of Renewable Sources in the Electrical Network of Santiago - Cape Verde. The installation of small units of production in different parts of the grid requires the development of studies to identify possible cases of loss of stability in the network as a result of disturbance with origin in renewable resource.

The network capacity to accept more or less integration of distributed generation from renewable sources is directly related to the stability/frequency deviations that can be seen on the network as a result such disturbances.

Thus, the analysis involves the identification of dynamic models suitable to represent the behavior of the different components of the grid, whether conventional machines, whether electric power generation from renewable sources, including wind farms and solar photovoltaic parks. The adopted models were then integrated into a **Matlab/Simulink®** software allowing a platform for dynamic simulation of isolated systems with production from renewable sources.

The impact resulting from the integration of renewable production was focused on the island of Santiago, by carrying a detailed characterization of critical operating scenarios, as well as disruption to which it is necessary to ensure conditions of stability, particularly in relation to frequency deviations that may occur in the network as a result of certain disorders. It was also performed an assessment to evaluate the need of installing energy storage devices of the flywheel type to ensure a network stability due to the considered disruption.

Agradecimentos

Aproveito este espaço para agradecer a todas as pessoas que contribuíram, directa ou indirectamente, para que a realização desta dissertação chegasse a bom porto, nomeadamente às seguintes:

Ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira, uma palavra de agradecimento pelos ensinamentos científicos tão importantes na minha progressão académica e pela superior orientação ao longo da elaboração desta dissertação.

À minha co-orientadora, Professora Doutora Fernanda de Oliveira Resende, pela preciosa orientação ao longo deste trabalho.

Ao meu colega Gilson Cândido pela sua preciosa ajuda e companheirismo ao longo do curso e em particular na fase final deste projecto.

Ao meu colega e amigo Odair José Tavares “Zez” pelo inestimável auxílio prestado na organização desta dissertação.

Aos meus pais e irmãos, uma palavra de apreço, pelo apoio incondicional e incentivo a todos os níveis, para que este projecto fosse concretizado.

Finalmente, uma palavra especial para a minha namorada Nadir Sena, que esteve sempre presente nos momentos menos bons que atravessei ao longo da realização desta dissertação.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação	1
1.2 - Objectivo do trabalho.....	2
1.3 - Organização do trabalho.....	2
Capítulo 2	5
Integração da Produção Dispersa na Rede Eléctrica.....	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Problemática do Sector Eléctrico em Cabo Verde	8
2.3 - PD de Origem Renovável na Ilha de Santiago - Cabo Verde	10
2.3.1 - Energia Eólica	10
2.3.2 - Turbinas eólicas ou Aerogeradores	13
2.3.3 - Energia Solar	15
2.3.3.a - Tecnologia Solar fotovoltaica	16
2.4 - Efeito da Integração da PD de Origem Renovável nas Redes Isoladas	19
2.4.1 - Perfil de tensão nos barramentos	20
2.4.1 - Perdas	20
2.4.2 - Congestionamento nos ramos e correntes de curto-circuito	21
2.4.3 - Intermitência da fonte renovável	21
2.4.4 - Estabilidade da Frequência	22
2.5 - Sumário e conclusões	23
Capítulo 3	25
Modelos de Simulação.....	25
3.1 - Introdução.....	25
3.2 - Máquina Diesel e Regulador de Velocidade	26
3.3 - Máquina Síncrona e Sistema de regulação de Tensão	27
3.3.1 - Modelo matemático da máquina síncrona	28
3.3.2 - Regulador de tensão/Excitação.....	30

3.4 - Parque Solar	31
3.4.1 - Modelo do painel Fotovoltaico	32
3.5 - Parque Eólico	36
3.6 - Máquina assíncrona e Turbina Eólica	36
3.6.1 - Máquina assíncrona	36
3.6.2 - Modelo matemático da máquina assíncrona	37
3.6.3 - Turbina Eólica	39
3.7 - Volante de Inércia (<i>Flywheel</i>)	40
3.8 - Modelização das cargas	42
3.9 - Modelização das linhas de transmissão	43
3.10 - Sumário e Conclusões	43
Capítulo 4	45
Desenvolvimento da Plataforma de Simulação Dinâmica em Ambiente Matlab/Simulink®	45
4.1 - Introdução	45
4.2 - Grupo diesel	46
4.3 - Máquina Diesel e Regulador de Velocidade	47
4.4 - Máquina Síncrona	48
4.5 - Sistema de regulação de Tensão	50
4.6 - Parque Solar	52
4.7 - Parque Eólico	54
4.8 - Turbina eólica	54
4.9 - Máquina Assíncrona	56
4.10 - Volante de Inércia	58
4.11 - Cargas	60
4.12 - Linhas de transmissão	61
4.13 - Aspecto Geral da Rede Eléctrica de Santiago no Simulink (Plataforma de Simulação)	63
4.14 - Sumário e conclusões	65
Capítulo 5	67
Impacto da Integração da PD de Origem Renovável na Rede Eléctrica de Santiago	67
5.1 - Introdução	67
5.2 - Descrição do Sistema Eléctrico da Ilha de Santiago - Cabo Verde	68
5.3 - Definição dos cenários e das Perturbações	71
5.3.1 - Cenários de rede	71
5.3.2 - Perturbações	73
5.4 - Resultados das simulações	75
5.4.1 - Cenário de vazio para o ano de 2012	75
5.4.2 - Cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia	78
5.4.3 - Cenário de ponta para o ano de 2012	82
5.5 - Sumário e Conclusões	85
Capítulo 6	87
Conclusões e trabalhos futuros	87
6.1 - Conclusões	87
6.2 - Trabalhos futuros	88
Referências	89
Anexo	91

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura convencional da exploração do S.E.E (adaptado de [4])	6
Figura 2.2 - Estrutura moderna da exploração do S.E.E (adaptado de [4])	7
Figura 2.3 - Crescimento médio da produção de energia eléctrica nos últimos 5 anos em Cabo Verde (adaptado de [5])	10
Figura 2.4 - Evolução da potência eólica instalada anualmente entre 1996 e 2009 [6]	11
Figura 2.5 - Estrutura do parque eólico onshore (a) e offshore (b)	12
Figura 2.6 - Representação esquemática da turbina de eixo vertical e horizontal	13
Figura 2.7 - Ligação da máquina assíncrona em gaiola de esquilo directamente à rede (adaptado de [7])	14
Figura 2.8 - Ligação da máquina assíncrona em gaiola à rede através de conversores (adaptado de [7])	15
Figura 2.9 - Ligação de máquina assíncrona duplamente alimentado à rede (adaptado de [7])	15
Figura 2.10 - Esquema ilustrativo das diferentes combinações das células FV	16
Figura 2.11 Sistema fotovoltaico isolado (adaptado do [8])	17
Figura 2.12 - Sistema fotovoltaico ligado à rede [8]	18
Figura 2.13 - Diagrama do inversor ligado à rede (adaptado do [8])	18
Figura 3.1 - Diagrama de bloco do regulador de velocidade e da Máquina Diesel (Modelo Matlab/ Simulink)	26
Figura 3.2 - Diagrama de uma máquina síncrona de rotor cilíndrico	28
Figura 3.3 - Diagrama de uma máquina síncrona de pólos salientes	28
Figura 3.4 - Modelo eléctrico equivalente da máquina síncrona (eixo q e d) [16]	29
Figura 3.5 - Diagrama de bloco do regulador de tensão IEEE tipo 1 [16]	30
Figura 3.6 - Modelo do parque solar em ambiente Matlab/Simulink®	32
Figura 3.7 - Circuito eléctrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica [11]	32
Figura 3.8 - Característica I-V e I-P de uma célula fotovoltaica (adaptado de [11])	33
Figura 3.9 - Variação da característica I-V da célula com a radiação (adaptado de [11])	34

Figura 3.10 - Variação da característica I-V da célula com a temperatura (adaptado de [11])	34
Figura 3.11 - Esquema de ligação dos sistemas fotovoltaicos [11].....	35
Figura 3.12 - Modelo do parque eólico em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	36
Figura 3.13 - Esquema do rotor em gaiola de esquilo (a) e bobinado (b)	37
Figura 3.14 - Modelo eléctrico da máquina assíncrona (eixo q e d) [16]	38
Figura 3.15 - Modelização da turbina eólica em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®.....	39
Figura 3.16 - Curva de potência da turbina eólica.....	39
Figura 3.17 - Diagrama de bloco do volante de inércia [11]	40
Figura 3.18 - Característica de funcionamento de um volante de inércia [11].....	41
Figura 3.19 - Digrama de bloco do volante de inércia em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	42
Figura 3.20 - Modelo das cargas em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®.....	43
Figura 3.21 - Modelo das linhas em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	43
Figura 4.1 - Diagrama esquemático do Grupo Diesel (unidade de produção convencional) em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®.....	46
Figura 4.2 - Implementação da máquina diesel e regulador de velocidade [16]	47
Figura 4.3 - Parâmetros da máquina diesel e regulador de velocidade.....	48
Figura 4.4 - Parâmetros usados na configuração da máquina síncrona	49
Figura 4.5 - Implementação do regulador de tensão IEEE tipo 1 [16]	50
Figura 4.6 - Parâmetros do regulador de tensão	51
Figura 4.7 - Implementação do parque solar em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	53
Figura 4.8 - Interface da configuração da potência produzida pelo parque solar em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	53
Figura 4.9 - Diagrama esquemático do parque eólico em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	54
Figura 4.10 Implementação da turbina eólica em ambiente <i>Matlab/Simulink</i> ®	55
Figura 4.11 - Característica da turbina eólica	55
Figura 4.12 - Configuração da variação da velocidade do vento	56
Figura 4.13 - Parâmetros da máquina assíncrona	57
Figura 4.14 - Volante de inércia	58
Figura 4.15 - Implementação do volante de inércia.....	59
Figura 4.16 - Parâmetros do volante de inércia.....	59

Figura 4.17 - Implementação das cargas	60
Figura 4.18 - Implementação das cargas	61
Figura 4.19 - Implementação das linhas de transmissão.....	62
Figura 4.20 - Impedância das linhas de transmissão.....	62
Figura 4.21 - Rede eléctrica de Santiago na plataforma de simulação no ambiente Matlab/Simulink@.....	64
Figura 5.1 - Mapa da ilha de Santiago, com a localização das seis centrais termoeléctrica [19]	68
Figura 5.2 - Esquema unifilar da rede eléctrica de Santiago	70
Figura 5.3 - Variação da velocidade do vento em 28% no parque eólico	73
Figura 5.4 - Variação da potência activa prevista devido à variação da velocidade do vento em 28%	74
Figura 5.5 - Variação da velocidade do vento em 36% no parque eólico	74
Figura 5.6 - Variação da potência activa esperada devido à variação da velocidade do vento em 36%	74
Figura 5.7 - Variação da potência activa produzida pelo parque solar.....	75
Figura 5.8 - Variação da frequência do sistema	76
Figura 5.9 - Potência activa e reactiva produzida pelos aerogeradores	76
Figura 5.10 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G5	77
Figura 5.11 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G6	77
Figura 5.12 - Tensão aos terminais dos aerogeradores.....	78
Figura 5.13 - Variação da frequência do sistema com volante de inércia	79
Figura 5.14 - Potência activa e reactiva produzida pelos aerogeradores com volante de inércia.....	79
Figura 5.15 - Potência activa e reactiva produzida pelo G5 com volante de inércia	80
Figura 5.16 - Potência activa e reactiva produzida pelo G6 com volante de inércia	80
Figura 5.17 - Potência produzida pelo volante de inércia.....	81
Figura 5.18 - Tensão aos terminais dos aerogeradores com volante de inércia	81
Figura 5.19 - Variação da frequência do sistema	82
Figura 5.20 - Potência activa e reactiva produzida pelos aerogeradores.....	83
Figura 5.21 - Potência activa produzida pelo parque solar	83
Figura 5.22 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G3	84

Figura 5.23 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G4.....	84
Figura 5.24 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G5.....	84
Figura 5.25 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G6.....	85
Figura 5.26 - Tensão aos terminais dos aerogeradores	85

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Repartição de potência (kW) pelos centros produtores em 31 de Dez. de 2009 (adaptado de [5])	8
Tabela 5.1 - Valores nominais, mínimos técnicos e ano de entrada em serviço de cada gerador.....	72
Tabela 5.2 - Nível de produção renovável, despacho dos geradores convencionais e reserva do sistema.	73
Anexos Tabela 1 - Parâmetros dos geradores.....	91
Anexos Tabela 2 - Parâmetros dos transformadores.....	92
Anexos Tabela 3 - Cargas do sistema.....	92
Anexos Tabela 4 - Parâmetros das linhas.....	93

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas e símbolos (ordenados por ordem alfabética)

AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
AGC	<i>Automatic Generation Control</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CA/CC	Conversor CA/CC
CC/CA	Conversor CC/CA
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
ELECTRA	Empresa Pública de Electricidade e Água de Cabo Verde
EWEA	<i>European Wind Energy Association</i> (Associação Europeia da Energia Eólica)
GB	<i>Gear Box</i> (Caixa de Velocidade)
GA	Gerador Assíncrona
BC	Baterias de Condensadores
MAT	Muito Alta Tensão
MG	Micro-Geração
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
MR	Micro-Redes
MT	Média Tensão
PD	Produção Dispersa
SEE	Sistemas Eléctricos de Energia

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Motivação

O sistema electroprodutor em Cabo Verde baseia-se fundamentalmente na exploração, em rede isolada, de centrais eléctricas equipadas com geradores síncronos accionados por motores de combustão interna que utilizam como combustível o gasóleo e o fuel [1].

A preocupação com a segurança de abastecimento, juntamente com preocupações de índole ambiental (alterações climáticas, preservação da natureza), bem como o aumento da procura de electricidade, aspectos relativos à sustentabilidade e às dificuldades crescentes na construção de infra-estruturas de transportes e distribuição aliados à necessidade de diversificação das fontes de energia são os grandes impulsionadores do desenvolvimento da Produção Dispersa (PD), nomeadamente a de origem renovável.

O acesso à electricidade é hoje ainda negado a cerca de 2000 milhões de pessoas em muitas regiões do mundo. A PD pode fornecer uma resposta imediata a esta carência, uma vez que pode dispensar uma rede eléctrica de grande extensão e recorrer a pequenos sistemas autónomos para injeção da energia produzida na rede [2].

Ultimamente tem-se assistido um crescente interesse pela PD a nível mundial e Cabo Verde não quer perder a oportunidade de se modernizar a nível energético. No intuito de cumprir as metas internacionalmente estipulados, no que diz respeito à emissão de gases com efeito de estufa, o governo pretende dar um novo estímulo ao desenvolvimento dos recursos renováveis, fomentando a utilização das fontes endógenas de energia, nomeadamente a energia solar e eólica através da concretização dos seguintes projectos:

- Construção de um parque solar de 8 MW na ilha de Santiago;
- Construção um parque eólico de 14 MW na ilha de Santiago;
- Construção de um parque eólico de 8 MW na ilha do Sal;
- Construção de um parque eólico de 6 MW na ilha de São Vicente;

- Construção de um parque eólico de 4 MW na ilha de Boavista.

O governo Cabo-Verdiano tem como objectivo subir a participação das energias renováveis no arquipélago para 50% até 2020, superando os actuais 2%. Até ao final de 2011, Cabo Verde deverá alcançar uma taxa de penetração de cerca de 4% tendo em conta os projectos em curso.

1.2 - Objectivo do trabalho

Tendo em consideração aspectos de índole técnica que são factores limitadores da integração de produção de origem renovável em redes isoladas, este trabalho tem como objectivo principal a avaliação do impacto que a integração de produção dispersa de origem renovável poderá causar na Rede Eléctrica da Ilha de Santiago - Cabo Verde. Diferentes cenários de exploração dos recursos renováveis e de carga foram tidos em consideração no sentido de garantir a robustez do sistema face à integração dos projectos previstos.

A avaliação do impacto que os diferentes cenários de exploração dos recursos possam causar na rede foi feita através do estudo em regime dinâmico. Estudo este que consiste em:

- Construção do modelo dinâmico para a rede eléctrica de Santiago - Cabo Verde;
- Implementação do modelo dinâmico;
- Definição dos cenários de exploração e das perturbações a analisar;
- Avaliação do comportamento da frequência da rede na presença de perturbações.

Todo o estudo de simulação dinâmica foi realizado com recurso ao software de simulação dinâmica *Matlab/Simulink®* a partir do qual foi possível simular a perda parcial ou total da produção renovável e avaliar o impacto que estas causam na rede eléctrica.

1.3 - Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos, cujos conteúdos são descritos, de forma sucinta, nesta secção.

O primeiro Capítulo trata-se de um capítulo introdutório e serve para explicar a motivação, a necessidade e os objectivos pretendidos com este trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica relativamente à integração de produção dispersa nas redes eléctricas, bem como uma abordagem da temática energias renováveis na ilha de Santiago - Cabo Verde, dando-se especial ênfase à Energia Eólica e Solar e aos constrangimentos que as mesmas poderão causar em termos da exploração de redes isoladas.

No Capítulo 3 é feita a apresentação dos modelos de simulação dinâmico necessário à realização dos estudos de comportamento dinâmico da rede eléctrica da ilha de Santiago em

face de integração de produção de origem renovável. Assim sendo, são descritos os modelos de simulação dinâmica para as máquinas térmicas convencionais, bem como para as fontes de produção de origem renovável.

De seguida, no Capítulo 4 ilustra-se a implementação dos modelos de simulação descritos no Capítulo 3 em ambiente **Matlab/Simulink®**, tendo por objectivo a sua integração e a construção de uma plataforma de simulação do comportamento dinâmico da rede de Santiago. O estudo dos diferentes cenários que permitem obter uma percepção detalhada do impacto da integração da produção renovável na rede eléctrica de Santiago - Cabo Verde é feito no Capítulo 5.

O Capítulo 6 é dedicado à apresentação das principais conclusões inerentes ao desenvolvimento desta dissertação, bem como alguns trabalhos complementares a desenvolver no futuro.

Capítulo 2

Integração da Produção Dispersa na Rede Eléctrica

2.1 - Introdução

Os Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) tiveram um desenvolvimento baseado numa estrutura hierarquizada que consistia nos seguintes níveis: produção, transmissão e distribuição de energia eléctrica. Toda a energia produzida nos centros electroprodutores (tipicamente centrais térmicas e hidroeléctricas) é então transportada a grandes distâncias até aos consumidores, passando pelas redes de transporte e distribuição. Esta estrutura é, ainda nos dias de hoje, a base do SEE em praticamente todos os países. Na figura 2.1 está ilustrado um diagrama simplificado de um SEE baseado numa exploração tradicional só com produção centralizada.

Aspectos relacionados com preocupações de índole ambiental, bem como o desenvolvimento tecnológico têm proporcionado o surgimento de novas tecnologias de produção, com potências nominais relativamente baixas, com elevados níveis de eficiência e impactos ambientais bastante limitados, quando comparado com as tecnologias convencionais [2]. Estas novas tecnologias de produção são usualmente designadas como Produção Dispersa (PD) e consistem na produção em pequena escala de energia eléctrica com recurso, fundamentalmente, a fontes renováveis, ou produção de energia eléctrica com recurso a combustíveis fósseis em aplicações de co-geração, de forma a aumentar substancialmente a eficiência global do sistema.

As potências nominais das unidades da PD variam desde algumas dezenas de kW até às dezenas de MW e encontram-se normalmente ligados nas redes de distribuição de Alta Tensão (AT), Média Tensão (MT) e mais recentemente às redes de distribuição de Baixa Tensão (BT), sendo-lhe atribuída actualmente a designação de Micro-Geração (MG).

A integração da PD nas redes de distribuição tem conduzido a que a produção da energia deixasse de ser uma actividade exclusiva dos grandes centros produtores. Como consequência

directa, as redes de distribuição deixaram de ser passivas e passaram a ser consideradas redes activas, devido à possibilidade de serem estabelecidos fluxos de potência bidireccionais, situação que põe em causa o conceito convencional de exploração deste tipo de redes onde o fluxo de potência era unidireccional (desde o nível da distribuição em AT e MT até aos respectivos consumidores). Na figura 2.2 está ilustrado o diagrama simplificado do um SEE com produção centralizada e uma forte integração de PD.

Muitos estudos indicam que, para além de desempenhar o seu papel de produtor de energia eléctrica, a PD pode também ser aproveitada de modo a contribuir para a melhoria da qualidade de serviço do sistema, através do fornecimento de serviços de sistema, por exemplo sob a forma de suporte de tensão/potência reactiva, bem como regulação primária e secundária de frequência [3].

A PD é hoje um vector de desenvolvimento dos SEE, podendo vir a assumir-se como um novo paradigma da produção e consumo de electricidade. No presente, ainda não é em geral competitiva com a produção centralizada, a qual beneficia de importantes economias de escala [2]. Presume-se que no futuro próximo este novo paradigma de produção de electricidade possa vir a conquistar alguma cota do mercado graças aos apoios concedidos pelo governo, bem como em resultado da maturação tecnológica e redução do custo das tecnologias de PD.

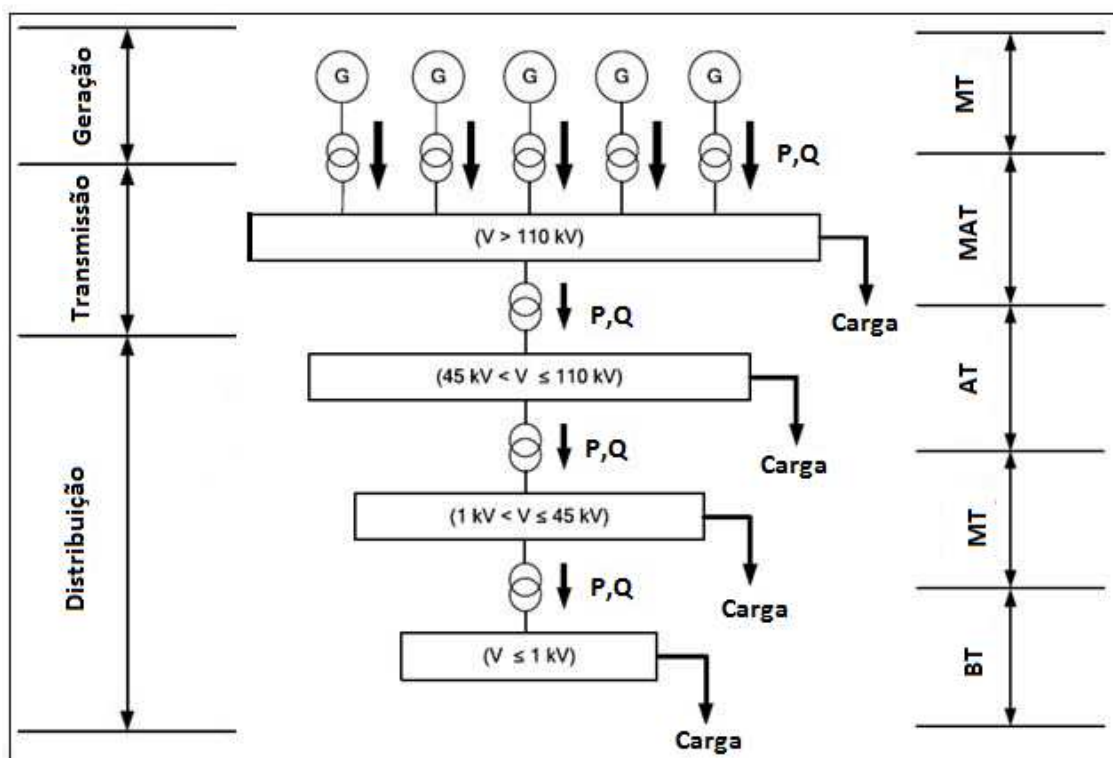


Figura 2.1 - Estrutura convencional da exploração do S.E.E (adaptado de [4])

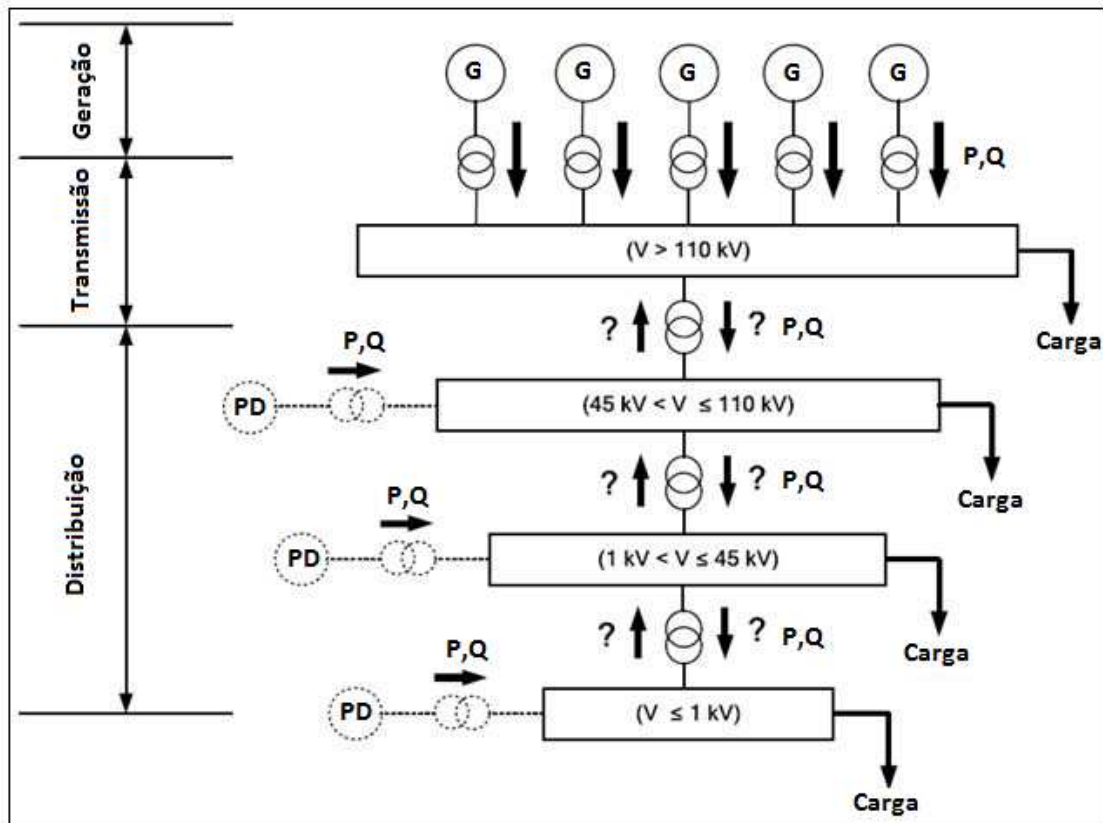


Figura 2.2 - Estrutura moderna da exploração do S.E.E (adaptado de [4])

A PD tem revelado uma importância crucial na exploração do SEE, em especial sobre as redes de distribuição, em resultado da sua participação activa na diminuição das perdas na rede em que se inserem, bem como na possibilidade de contribuir para a redução de congestionamentos em determinados ramos da rede de onde resulta um benefício directo em termos de deferimento de investimento no reforço/expansão da rede [2]. O arquipélago de Cabo Verde, devido à sua boa condição climática, temperatura média anual de 24 °C e boas condições de vento nos pontos mais altos, possui excelentes condições para o aproveitamento da energia eólica e solar. A insularidade e descontinuidade do território nacional aliado a inexistência de jazidas de petróleo e gás natural colocam enormes desafios no sector energético em Cabo Verde, pelo que a exploração dos recursos renováveis e consequentemente a sua integração nos SEE das ilhas de Cabo Verde parece ser uma das possíveis soluções. Na secção 2.2 é feita uma breve caracterização da problemática do sector eléctrico em Cabo Verde. Na secção 2.3 é efectuada a descrição da PD de origem renovável com potencial de integração na ilha de Santiago - Cabo Verde, sendo de seguida analisados na secção 2.4 os principais efeitos resultantes da integração da PD de origem renovável nas redes isoladas.

2.2 - Problemática do Sector Eléctrico em Cabo Verde

A produção, transporte e distribuição de energia eléctrica em Cabo Verde é assegurada pela ELECTRA, S.A.R.L - Empresa Pública de Electricidade e Água - que também é a empresa responsável pela dessalinização da água do mar para o consumo da população.

Segundo dados da ELECTRA, apenas 2% da produção da energia eléctrica em Cabo Verde é de origem renovável, sendo a restante parte da produção assegurada pela exploração, em rede isolada, de centrais eléctricas equipadas com geradores síncronos accionados por motores de combustão interna, utilizando como combustível o gasóleo, fuel óleo 180 e fuel óleo 380. As oportunidades que são oferecidas à população Cabo-Verdiana são desiguais, na medida em que o acesso à energia eléctrica em Cabo Verde não está ao alcance de todos, estando longe de se atingir a totalidade da electrificação do país. Actualmente, segundo dados da ELECTRA, cerca de 89,4% do território nacional já se encontra coberto pela rede de transporte e distribuição de energia, sendo que na maior e mais populosa ilha do país (Santiago) a taxa de cobertura é de apenas 76,9%. De acordo com [5], a potência instalada nos centros produtores da ELECTRA a nível nacional, no final do ano 2009, totalizava cerca de 85,342 MW, repartida por centrais térmicas (83,242 MW) e eólicas (2,1 MW). Na tabela 2.1 apresenta-se a caracterização dos centros electro-produtores em todas as ilhas de Cabo Verde, quer em termos quantitativos, quer em termos da tecnologia empregue na produção (dados referentes a 31 de Dezembro de 2009).

Tabela 2.1 - Repartição de potência (kW) pelos centros produtores em 31 de Dez. de 2009 (adaptado de [5])

Ilha	Unidade de Produção	Tecnologia de Produção	
		Diesel (kW)	Eólica (kW)
Santo Antão	Porto Novo	1800	
	Ribeira Grande	3800	
	Total	5600	
São Vicente	Matiota	10909	900
	Lazareto	7440	
	Total	18349	900
São Nicolau	Ribeira Brava	736	
	Tarrafal	2220	
	Total	2956	
Sal	Palmeira	9040	300
	Total	9040	300
Boavista	Sal Rei	2136	
	Norte	212	
	Total	2348	
Maio	Porto Inglês	1376	
	Total	1376	
Santiago	Praia Gamboa	5000	900
	Palmarejo	26043	
	Assomada	3850	
	Ribeira da Barca	120	

	Tarrafal ST Santa Cruz Total	1360 2176 38549	900
Fogo	São Filipe Mosteiros Cova Figueira Total	3000 800 168 3968	
Brava	Favetal Total	1056 1056	
	Produção total	83242	2100

O crescimento médio da produção de energia eléctrica nos últimos 5 anos é de cerca de 6% ao ano e encontra-se ilustrado na figura 2.3. Em relação ao ano 2008 registou-se um crescimento de 3,2%. Esse aumento foi suportado fundamentalmente com recurso à produção a Fuel Óleo 180.

Num país como Cabo Verde em que um simples gesto, como beber um copo de água, depende do combustível fóssil, porque é preciso dessalinizar a água do mar para consumo, é urgente uma mudança de paradigma no que concerne à produção de energia eléctrica. A utilização de combustível fóssil na produção de energia eléctrica não só contagia pela negativa o desenvolvimento do país, devido ao peso que o custo do mesmo representa na economia real, mas também pela emissão de gases nocivos com consequências irreversíveis para o meio ambiente. Desta forma, o desenvolvimento de Cabo Verde está seriamente comprometido devido à escassez de água e ao elevado custo de produção de energia eléctrica.

O crescimento económico de Cabo Verde está fortemente dependente das oscilações dos preços do petróleo nos mercados internacionais, mas a sua localização geográfica assegura-lhe uma disponibilidade de recursos renováveis, nomeadamente sol e vento, que potencia um aumento da sua independência em termos energéticos, permitindo deste modo obter poupanças assinaláveis na importação de combustível.

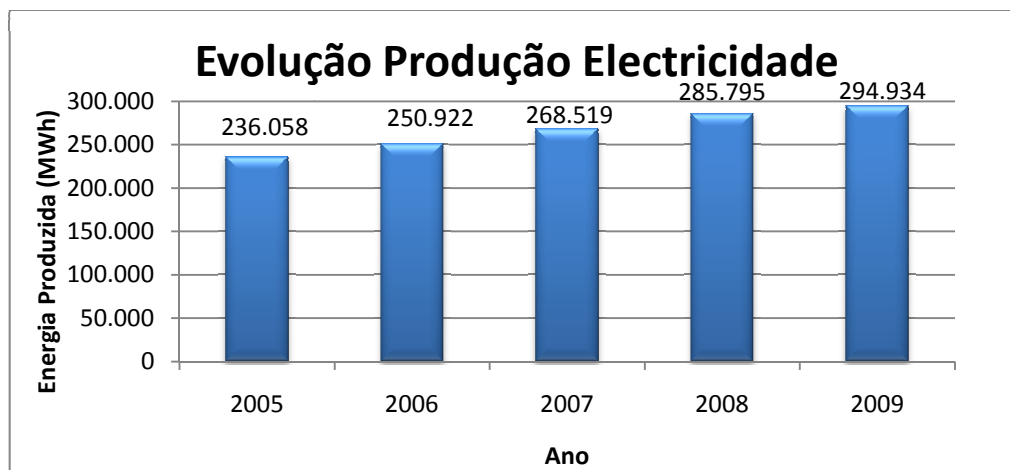


Figura 2.3 - Crescimento médio da produção de energia eléctrica nos últimos 5 anos em Cabo Verde
(adaptado de [5])

2.3 - PD de Origem Renovável na Ilha de Santiago - Cabo Verde

De uma forma geral, a PD envolve meios de pequeno porte, usando energias renováveis (eólica, solar, mini-hídrica, biomassa, geotérmica, ondas e marés, parte biodegradável dos resíduos agrícolas, urbanos ou industriais) ou microturbinas, pilhas de combustível e motores alternativos produzindo electricidade, calor e frio em cogeração, operados por produtores independentes, pelas empresas concessionárias ou pelos consumidores finais [2].

Neste capítulo será feita uma referência às fontes de energias renováveis técnica e economicamente viáveis de serem exploradas em Cabo Verde e que foram alvo de análise neste trabalho, nomeadamente energia eólica e solar. Na subsecção 2.3.1 é efectuada uma descrição da energia eólica. Na subsecção 2.3.2 é feita uma descrição da energia solar, das tecnologias fotovoltaicas e da integração deste tipo de aproveitamento na rede.

2.3.1 - Energia Eólica

A energia eólica deriva da energia cinética do deslocamento de massas de ar, geradas pelas diferenças de temperatura na superfície do planeta, resultando da associação da radiação solar incidente no planeta com o movimento de rotação da terra. De uma forma grosseira, mas aceitável, pode-se dizer que a energia eólica é a energia solar com características modificadas. Assim como outras formas de energia, nomeadamente a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos em aplicações diversas que envolvem a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica, como por exemplo:

- Bombagem de água;

- Moagem de grãos.

O vento é uma energia limpa e inesgotável. Segundo dados da Associação Europeia da Energia Eólica (ou na literatura anglo-saxónica, *European Wind Energy Association - EWEA*), a nível mundial houve um crescimento de cerca de trinta e um por cento (31%) em 2009, somando 37,5 GW de potência instalada, perfazendo um total de 157,9 GW de potência instalada [6].

A nível mundial o líder na produção da energia com recurso a energia cinética dos ventos é os Estados Unidos da América, com cerca de 35.159 MW de potência instalada, seguidos pela China com cerca de 25.104 MW de potência instalada. Na Europa os líderes destacados são a Alemanha e a Espanha com uma potência instalada de 25.777 e 19.149 MW respectivamente, segundo as estatísticas da Global Wind Energy Council - GWEC, relativo a 2009. Na figura 2.4 está ilustrado a evolução da potência eólica instalada anualmente entre 1996 e 2009.

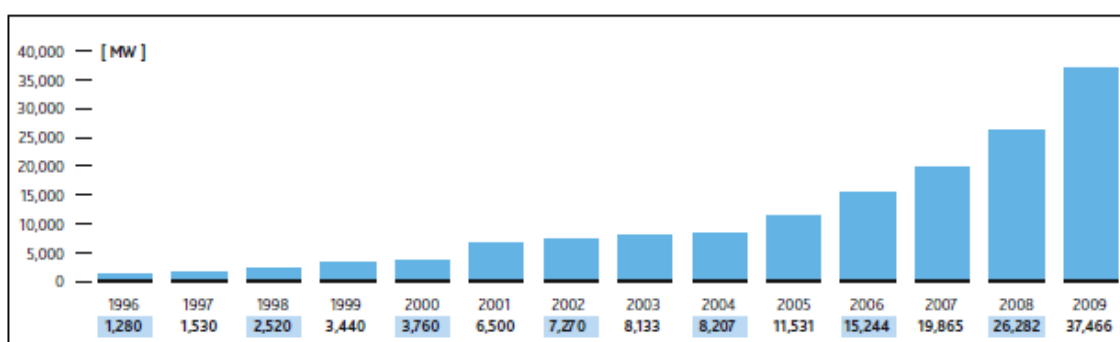


Figura 2.4 - Evolução da potência eólica instalada anualmente entre 1996 e 2009 [6]

A maturação da tecnologia, a escalada do preço dos combustíveis e a consciência ambiental explicam a tendência sempre crescente da potência eólica instalada. A energia eólica é hoje a tecnologia de produção de electricidade em franco crescimento, contudo, existem grandes parques eólicos que saem fora do âmbito da PD por apresentarem uma potência instalada superior a 200 MW. Como já foi feito referência no Capítulo 1, está prevista a construção de quatro parques eólicos em Cabo Verde totalizando 32 MW de potência instalada, distribuído pelas ilhas de Santiago (14MW), Sal (8 MW), São Vicente (6 MW) e Boavista (4 MW).

As primeiras tentativas da geração da energia eléctrica a partir da energia eólica remontam o século XIX, mas só na década de 1970, um século mais tarde, devido à crise internacional de petróleo, é que houve interesse efectivo e investimentos suficientes para desenvolvimento das tecnologias e aplicação dos equipamentos a uma escala comercial. A produção da energia eléctrica a partir da energia eólica depende sempre da velocidade do vento. A intensidade do vento é variável de local para local, ou seja, é variável no tempo e no

espaço. Por isso antes da construção de um parque eólico são realizados diversos estudos com o objectivo de avaliar a regularidade do vento do local. Hoje em dia, a instalação do parque eólico é feito não só na terra (onshore), como também é feito no mar (offshore). O objectivo de instalar parques eólicos offshore é claramente o de maximizar a produção, devido ao facto de existirem menos barreiras físicas e velocidades de ventos mais “atractivos” no mar. A figura 2.5 mostra a estrutura típica de um parque eólico onshore (a) e offshore (b).



Figura 2.5 - Estrutura do parque eólico onshore (a) e offshore (b)

De uma forma geral, um sistema de produção eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas:

- Sistemas isolados;
- Sistemas híbridos;
- Sistemas interligados.

Os sistemas isolados, são sistemas de produção de energia de pequena dimensão, que operam desligados da rede eléctrica, destinados a suprir necessidades energéticas de pequenas comunidades. Estes tipos de sistemas, em geral, usam alguma forma de armazenamento de energia com vista a aumentar a eficiência do mesmo.

Os sistemas híbridos são aqueles que apresentam várias fontes de produção de energia nomeadamente: turbinas eólicas, máquinas diesel, módulos fotovoltaicos, entre outros. Estes funcionam também desligados da rede eléctrica convencional. Os sistemas híbridos, devido às suas características, têm capacidade para alimentar um número significativo de consumidores.

Os sistemas interligados, como o próprio nome sugere, são sistemas que funcionam interligados à rede eléctrica. Estes sistemas utilizam grandes números de aerogeradores de grande porte para a produção de energia eléctrica, sendo toda a produção injectada

directamente na rede. Neste tipo de sistema é dispensável o recurso ao sistema de armazenamento de energia. Este último tipo de sistema é o que melhor enquadra no âmbito desta dissertação, pois aqui é avaliada o impacto da PD de origem renovável na rede eléctrica.

Cada um dos sistemas acima mencionados necessita de diversos componentes que em conjunto com os aerogeradores, constituem um sistema eólico.

A conversão da energia cinética do vento em energia eléctrica é feita com recurso aos aerogeradores. Os aerogeradores são geradores eléctricos integrado no eixo de uma turbina eólica cuja função é converter a energia eólica em energia eléctrica.

2.3.2 - Turbinas eólicas ou Aerogeradores

As turbinas eólicas, também conhecidas por aerogeradores, são responsáveis pela conversão da energia cinética do vento em energia rotativa no eixo principal, que por sua vez é convertida em energia eléctrica através da utilização de máquinas eléctricas. Existem basicamente dois tipos de turbinas de acordo com o posicionamento dos eixos:

- Turbinas eólicas de eixo vertical;
- Turbinas eólicas de eixo horizontal.

Esta última é a mais utilizada em gerações de energia eólica. A descrição detalhada de cada um dos tipos de turbina sai fora do âmbito desta dissertação, mas a título exemplificativo na figura 2.6 estão representados os dois tipos de turbinas.

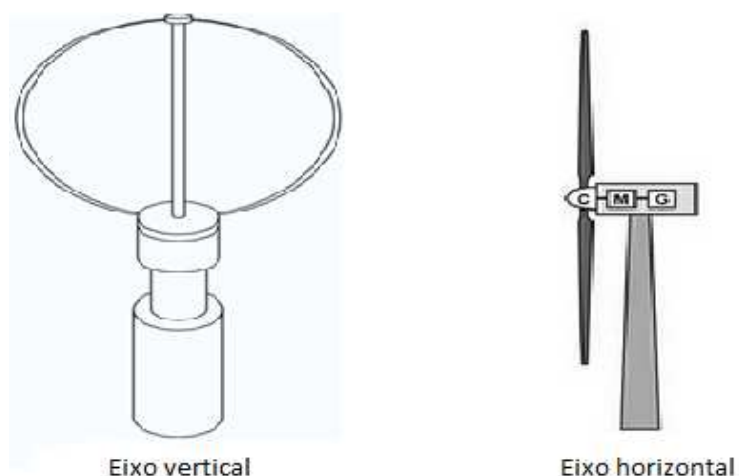


Figura 2.6 - Representação esquemática da turbina de eixo vertical e horizontal

Existem fundamentalmente três tipos de turbina eólica (ou aerogeradores, como são habitualmente designados) com aplicação no aproveitamento eólico, a saber:

- Máquinas assíncronas (com e sem controlo do ângulo de pitch);
- Máquinas assíncronas duplamente alimentadas (*Doubly fed induction wind generators*);
- Máquinas síncronas de velocidade variável.

Nesta tese deu-se maior destaque aos aerogeradores integrando máquinas assíncronas, pois o modelo desenvolvido para o parque eólico foi inspirado neste tipo de máquinas, sendo assim não será apresentado qualquer modelo de ligação à rede das máquinas síncronas de velocidade variável.

Existem diferentes formas de efectuar a ligação das máquinas assíncronas à rede eléctrica, dependendo da tecnologia utilizada. Estão apresentados nas figuras que se seguem alguns exemplos de ligação das máquinas assíncronas à rede:

- Máquinas assíncronas de rotor em gaiola de esquilo directamente ligadas à rede.
- O esquema de ligação à rede deste tipo de máquinas encontra-se ilustrado na figura 2.7.

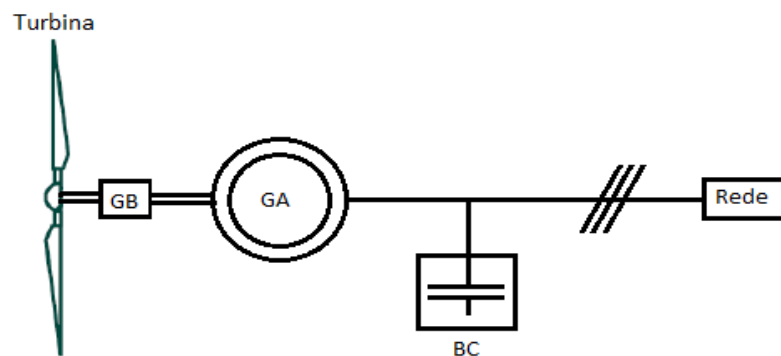


Figura 2.7 - Ligação da máquina assíncrona em gaiola de esquilo directamente à rede (adaptado de [7])

- Máquinas assíncronas de rotor em gaiola de esquilo ligado à rede por meio de conversores de electrónica de potência.

O esquema unifilar representativo deste tipo de ligação encontra-se na figura 2.8.

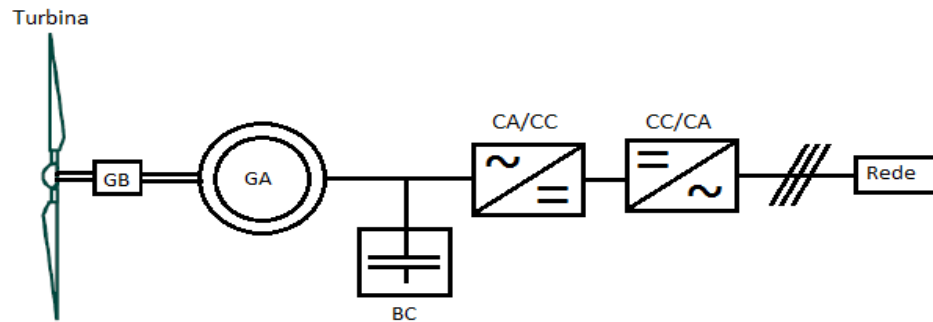


Figura 2.8 - Ligação da máquina assíncrona em gaiola à rede através de conversores (adaptado de [7])

- Máquinas assíncronas duplamente alimentadas ligadas à rede por meio de conversores de electrónica de potência.

As máquinas assíncronas duplamente alimentadas apresentam o estator ligado directamente à rede de energia eléctrica e o rotor ligado à rede de energia através de conversores CA/CC/CA. A figura que se segue ilustra a forma como estas máquinas são ligadas à rede.

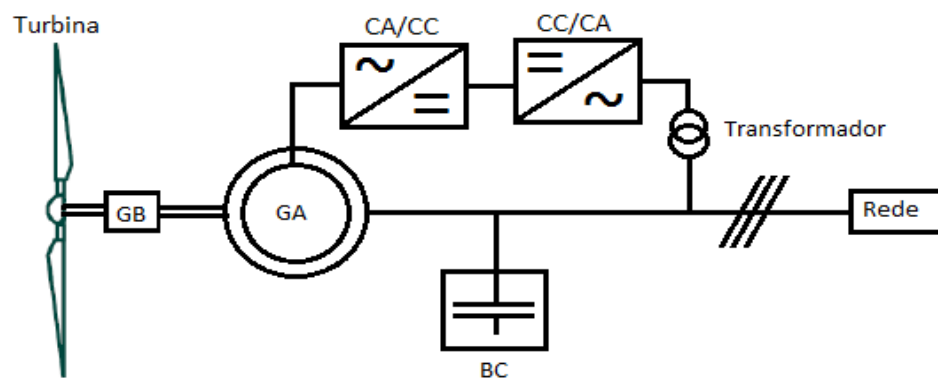


Figura 2.9 - Ligação de máquina assíncrona duplamente alimentada à rede (adaptado de [7])

Todos os modelos de ligação das máquinas assíncronas à rede aqui representados, integram uma caixa de velocidade (*Gear Box*) na sua constituição, devido à necessidade de adaptar a velocidade da turbina à velocidade de sincronismo da máquina de indução (tipicamente 1500 rpm).

2.3.3 - Energia Solar

O Sol sempre foi uma fonte de energia desde os primórdios da humanidade, sendo que a sua energia fornecida na forma de radiação é a base de toda a vida na Terra. Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma mínima parte (aproximadamente duas partes por milhão) da radiação solar emitida atinge a superfície da Terra. Esta radiação corresponde a uma quantidade de energia de 1×10^{18} kWh/ano [8]. No entanto, a quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra corresponde, aproximadamente, a dez mil

vezes à procura global de energia. Assim, basta utilizar apenas 0,01% desta energia para satisfazer a procura energética total da humanidade.

Depois de muitos avanços tecnológicos, hoje em dia, a energia solar pode ser utilizada como energia primária na produção de electricidade, graças ao efeito fotovoltaico, de acordo com os princípios descritos nas secções seguintes.

2.3.3.a - Tecnologia Solar fotovoltaica

A descoberta do efeito fotovoltaico remonta ao século XIX, mais concretamente ao ano de 1839, sendo atribuído ao físico francês Alexandre Becquerel. Em 1958, foi lançado o primeiro satélite com um dispositivo de produção de energia de base fotovoltaica. No início, a tecnologia fotovoltaica era uma tecnologia extremamente dispendiosa, sendo por isso usada somente em aplicações especiais. No entanto, a crise petrolífera de 1973 e a catástrofe provocada pelo acidente da central nuclear de Chernobyl em 1986 forçaram a investigação de novas fontes de energia. Graças às incansáveis investigações levadas a cabo, já é possível, actualmente, utilizar tecnologia fotovoltaica para produção de energia a nível doméstico.

Nos sistemas fotovoltaicos a radiação solar é convertida em energia eléctrica com recurso a dispositivos do tipo semiconductor que reagem ao efeito foto-eléctrico [9].

Uma vez que cada célula produz uma corrente contínua de intensidade relativamente fraca, procede-se à sua associação para obter, após encapsulamento, um conjunto denominado módulo fotovoltaico, cuja potência máxima varia entre 50 a 100W. O agrupamento de módulos, colocados numa mesma estrutura de suporte, forma um array de painel com potências superiores. Na figura 2.10 está ilustrado o esquema da célula, do módulo ou painel e do array fotovoltaico.

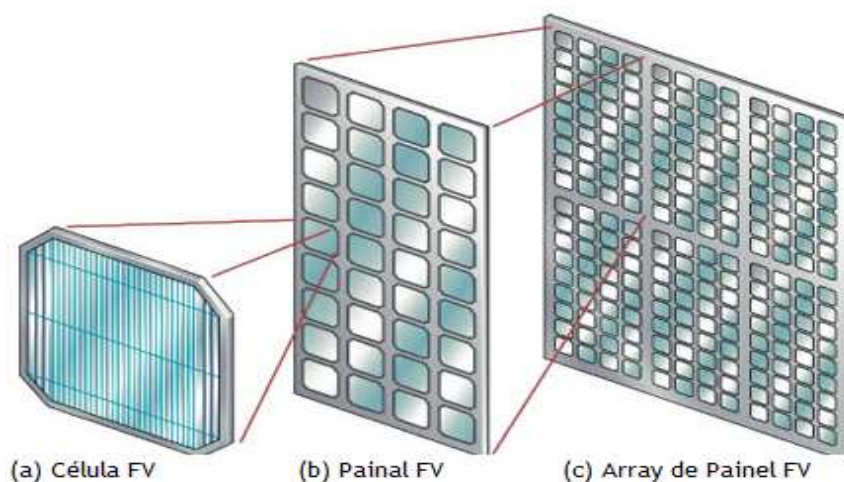


Figura 2.10 - Esquema ilustrativo das diferentes combinações das células FV

De acordo com os requisitos funcionais e operacionais de cada SEE, os sistemas fotovoltaicos dividem-se em dois grupos:

- Sistemas isolados;
- Sistemas ligados à rede.

Um sistema fotovoltaico isolado, destina-se a utilização em instalações remotas, sem possibilidade de ligação à rede eléctrica. Este sistema é tipicamente composto por:

1. Painel fotovoltaico
2. Regulador de carga
3. Acumulador
4. Carga

A figura 2.11 ilustra o esquema do sistema fotovoltaico isolado

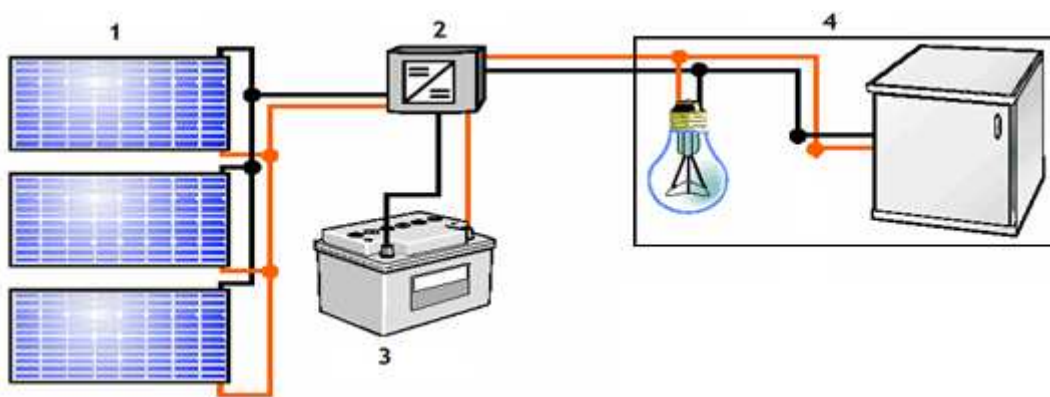


Figura 2.11 Sistema fotovoltaico isolado (adaptado do [8])

Em geral, a utilização de acumuladores obriga a que se torne indispensável a utilização de um regulador de carga adequado que faça a gestão do processo de carga, de forma a proteger e garantir uma elevada fiabilidade e um maior tempo de vida útil dos acumuladores [8].

Um sistema fotovoltaico ligado à rede é composto, normalmente, pelos seguintes componentes, tal como ilustrado na figura 2.12 [8]:

1. Painel fotovoltaico (vários módulos fotovoltaicos dispostos em série e em paralelo, com estrutura de suporte e de montagem)
2. Caixa de junção (equipada com dispositivos de protecção e interruptor de corte principal DC)
3. Cabos DC
4. Inversor
5. Mecanismo de protecção e aparelho de medida



Figura 2.12 - Sistema fotovoltaico ligado à rede [8]

Estes tipos de sistemas fotovoltaicos ligados à rede são projectados para funcionar em complementaridade com a rede, ou seja: toda a energia produzida pelo sistema será injectada na rede quando a produção for superior ao consumo e, absorvida quando o consumo for superior.

Este sistema representa uma fonte complementar do SEE convencional e, está ligado à rede eléctrica por meio de inversores, pois a sua produção é em corrente contínua (DC). Os inversores devem satisfazer as exigências de segurança e qualidade de serviço para que a operacionalidade da rede não seja posta em causa. A figura 2.13 ilustra a estrutura típica de um inversor ligado à rede.

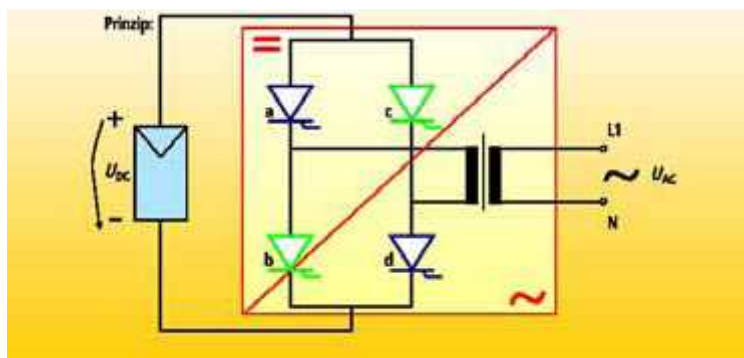


Figura 2.13 - Diagrama do inversor ligado à rede (adaptado do [8])

Segundo [8], os actuais inversores são capazes de desempenhar as seguintes funções:

- Converter a corrente DC proveniente do sistema fotovoltaico em corrente alternada (AC), de acordo com os requisitos técnicos e de segurança que estão estipulados para a ligação à rede;
- Ajustar o ponto operacional do sistema fotovoltaico, de forma a maximizar a sua produção;

- Servir de dispositivo de protecção AC e DC (por exemplo: protecção de polaridade, protecção contra sobrecargas e protecção de interligação com rede receptora).

A instalação dos sistemas isolados é recorrente em Cabo Verde. A inexistência de rede eléctrica em diversos pontos do arquipélago faz deste tipo sistema um sistema bastante utilizado em Cabo Verde. Actualmente existem projectos de grandes parques solares, que funcionam interligados à rede eléctrica, a serem desenvolvidos em Cabo Verde. Como já foi referido na secção 1.1 do Capítulo 1, está prevista a construção de um parque solar de 8 MW de potência a instalar na ilha de Santiago.

É de referir que os sistemas interligados são sistemas de maior interesse neste trabalho, pois o objectivo é estudar o impacto que a PD de origem renovável provoca na rede eléctrica da ilha de Santiago.

2.4 - Efeito da Integração da PD de Origem Renovável nas Redes Isoladas

A integração da PD de origem renovável nas redes eléctricas altera substancialmente aspectos relacionados com a sua exploração, fundamentalmente devido ao aparecimento de unidades de produção em locais da rede onde tal não havia sido previsto, podendo resultar numa alteração substancial dos fluxos de potência. O fluxo de potência, cujo único sentido era dos centros electro-produtores para os consumidores, nos sistemas convencionais, agora pode-se fazer no sentido contrário de modo a escoar toda a produção localizada ao nível das redes de distribuição, e por conseguinte próxima dos locais de consumo.

Como foi referido no capítulo 1, as redes eléctricas isoladas, como é o caso da rede eléctrica das ilhas de Cabo Verde, caracterizam-se pelo seu elevado custo de produção de electricidade, por basearem a sua produção na utilização de centrais eléctricas equipadas com motores de combustão interna. Estes motores accionam geradores síncronos, utilizando como combustível o gasóleo e o fuel, que são adquiridos no mercado internacional com elevado custo associado. Por outro lado, as ilhas de Cabo Verde possuem boas condições de vento e sol, que, se forem aplicadas na produção de electricidade, poderão reduzir a dependência de combustível fósseis e assim contribuir para o desenvolvimento da economia local [10]. Estes factores contribuíram para o interesse na instalação de alguns parques eólicos e solares nas diferentes ilhas do arquipélago.

Para além de outros efeitos sobre as redes eléctricas, nomeadamente no que se refere ao comportamento das tensões nos nós, níveis de congestionamento dos ramos e perdas, os sistemas de produção de energia eléctrica de origem renovável, como sejam a produção eólica e solar podem provocar problemas de segurança dinâmica nas redes eléctricas isoladas.

Desta forma, a integração dessas fontes de energia está sujeita a algumas restrições técnicas que condicionam a sua integração na rede eléctrica. As redes isoladas são menos robustas, quer por possuírem baixas constantes de inércia, quer por não disporem de suporte proveniente de interligações com SEE vizinhos, quando comparadas com as redes interligadas. A segurança na operação do SEE é uma prioridade, por isso, é necessário adoptar medidas adicionais, nomeadamente controlo de frequência e gestão de reservas do sistema para garantir uma operação segura. Para tal, é fundamental operar o sistema com um número adequado de máquinas síncronas convencionais, que permitam que o sistema apresente níveis de reserva primária adequada, de tal forma que os seus sistemas de regulação de frequência permitam fazer face a perturbações que resultem num desequilíbrio entre a produção e o consumo [10].

2.4.1 - Perfil de tensão nos barramentos

As empresas de distribuição têm a obrigação de garantir a continuidade de serviço aos seus clientes e prestar um serviço de qualidade com nível de tensão dentro dos valores especificados.

A integração da PD nas redes de distribuição modifica o perfil de tensão devido às injeções de potência. O aumento da tensão ΔV na rede de distribuição, devido à integração da PD é dado pela seguinte expressão [11]:

$$\Delta V = \frac{P \times R + X \times Q}{V} \quad (2.1)$$

Onde:

V: Tensão nominal da rede

P: Potência activa injectada pela PD

Q: Potência reactiva injectada pela PD

R: Resistência da rede

X: reactância da rede

É possível observar que tanto a injeção de potência activa como a reactiva influenciam a magnitude da tensão na rede. A integração de PD na rede de distribuição, provoca um aumento nos perfis de tensão, comparativamente com a situação em que nenhuma unidade de PD está ligada à rede.

2.4.1 - Perdas

De acordo com [11] o impacto da PD sobre as perdas do sistema de distribuição tem sido abordado por diversos autores. As entidades reguladoras implementam políticas de incentivo

para as empresas de distribuição de modo a serem economicamente eficientes e reduzir as perdas de energia. Normalmente, os incentivos para redução de perdas das empresas de distribuição consistem na diferença de custo entre as perdas reais e padrão definidas pelas entidades reguladoras através de modelos de referência. A gestão adequada das unidades de PD pode trazer benefícios efectivos à operação do sistema ao nível da redução das perdas nas linhas e consequentemente melhorias de qualidade de serviço e deferimento de investimento no reforço de redes. A instalação das unidades de PD na proximidade do centro de consumo, permite reduzir as perdas energéticas ao nível da transmissão, o que se traduz num aumento da eficiência.

2.4.2 - Congestionamento nos ramos e correntes de curto-circuito

Muitos estudos revelam que a integração de elevadas quantidades de produção eólica e/ou solar nas redes eléctricas isoladas pode provocar congestionamento nalguns ramos da rede de transportes e, consequentemente, estes passarão a ser explorados mais próximo dos seus limites técnicos.

Estes congestionamentos acontecem porque, numa situação de perturbação com perda de produção eólica e/ou solar, os sistemas de regulação primária actuam, nos primeiros segundos após a ocorrência de perturbação, provocando assim o aumento da produção convencional necessária para compensar a perda de produção eólica e/ou solar. Este contributo é dado pelas máquinas convencionais e que disponham de reserva primária.

2.4.3 - Intermitência da fonte renovável

Segundo [10], os aproveitamentos eólicos e solares têm como característica o facto de estarem sujeitos a variações de produção que não são controláveis e que são de previsão bastante limitada, podendo estas terem como origem os seguintes fenómenos:

- Intermitência do vento, que se traduz na ocorrência de flutuações da produção eólica como resultado de turbulências da velocidade do vento ou de ocos de vento;
- Saída de serviço dos geradores eólicos, devido à velocidade do vento atingir valores que ultrapassem os limites mínimos ou máximos de operação;
- Saída de serviço de parques eólicos, na sequência da ocorrência de curto-circuitos na rede receptora que provoquem a actuação das protecções de mínimo de tensão deste tipo de aproveitamento;
- Intermitência da radiação solar, que se traduz na ocorrência de flutuações da produção, devido a alteração das condições climáticas;
- Saída de serviço do parque solar, devido a ocorrência de curto-circuitos na rede receptora.

Todos os fenómenos descritos atrás, poderão ocasionar a ocorrência de perda de segurança dinâmica do sistema, sendo portanto necessário acautelar devidamente a quantidade da produção eólica e solar a injectar na rede, de modo a garantir a estabilidade do sistema. O valor de penetração eólica e solar explorada influenciam os critérios de reserva primária adoptados neste tipo de sistemas e está directamente relacionado com a estabilidade de frequência, tal como seguidamente se descreve.

2.4.4 - Estabilidade da Frequência

A instalação de elevados volumes de produção eólica, com características de operação muito diferentes das provenientes das centrais convencionais, em redes isoladas, como é o caso das ilhas de Cabo Verde, pode provocar problemas de segurança dinâmica. No sentido de obviar este problema, muitos estudos têm sido feitos com o intuito de avaliar a capacidade das redes isoladas operarem com elevadas parcelas de produção eólica sem perda de qualidade de serviço e segurança de operação.

Para garantir uma operação segura dos sistemas isolados é indispensável a adopção de medidas adicionais, nomeadamente as que dizem respeito ao controlo de frequência e uma gestão adequada de reservas do sistema. A segurança de operação está usualmente dependente da necessidade de avaliar qual é impacto, em termos do desvio de frequência (1,5 Hz nas redes isoladas de dimensão muito pequena, como Cabo Verde), que determinadas perturbações provocam nas redes isoladas. A gestão dos sistemas eléctricos isolados com elevadas penetrações de produção eólica obriga a que o programa de exploração da produção seja realizado quase em tempo real [10].

Segundo o estudo realizado em [12], operar as redes isoladas com um número mínimo de máquinas convencionais robustas, com constantes de inércias apropriadas e adequados sistemas regulação de frequência e tensão, para manter o equilíbrio entre a produção e consumo na presença de perturbação é a preocupação de qualquer operador do sistema.

De acordo com o mesmo estudo, existem inúmeras perturbações capazes de provocar a saída de serviço dos parques eólicos, nomeadamente variações rápidas de vento ou a ocorrência de um curto-circuito que conduza à actuação de relés de mínimo de tensão dos parques eólicos que estejam a operar na vizinhança do defeito. Este último tipo de perturbação apresenta um nível de severidade superior ao primeiro, por além de conduzir a um comportamento mais severo da frequência em regime transitório, contribui também para a redução da margem de estabilidade transitória do S.E.E.

Do estudo realizado em [1] concluiu-se que o sistema eléctrico isolado está mais vulnerável à possibilidade de ocorrência de problemas de estabilidade de frequência do que de problemas de estabilidade transitória.

A variação dos recursos renováveis nas redes isoladas, nomeadamente a solar devido à passagem de uma nuvem e a eólica devido à ocorrência de rápidas variações de vento (oco do vento) comprometem a estabilidade da frequência se a rede não dispuser de uma constante de inércia “consistente” e uma reserva capaz de suportar a intermitência do recurso renovável. Por vezes torna-se necessário recorrer aos dispositivos de armazenamento de energia, tais como volante de inércia (*flywheel*) para garantir a segurança da rede.

O trabalho realizado nesta dissertação incide fundamentalmente na análise do comportamento da frequência da rede na presença de variação dos recursos renováveis, com vista a determinar a quantidade máxima de energia eléctrica produzida a partir de fontes renováveis que a rede é capaz de suportar sem causar problemas de estabilidade de frequência.

2.5 - Sumário e conclusões

Neste capítulo foi feita uma abordagem das questões relacionadas com a mudança de paradigma de operação do SEE resultante da integração da PD de origem renovável. Foram, também, apresentados aspectos relativos ao sistema eléctrico de Cabo Verde, o conceito da PD e as perspectivas da sua integração na rede eléctrica. Por último, foram apresentados os principais impactos resultantes da integração da PD de origem renovável, com especial destaque para aspectos relacionados com a segurança dinâmica das redes isoladas e para a necessidade do estudo dinâmico dessas redes em face da integração de PD de origem renovável.

Concluiu-se desse modo que a integração da PD na rede eléctrica altera toda a filosofia da exploração da rede, pelo facto destas passarem a ter o fluxo de potência nos dois sentidos. Por além de alterar o fluxo de potência na rede, a PD contribui para a melhoria da qualidade de serviço, através de fornecimento de serviços de sistema sob a forma de controlo de tensão e frequência.

No capítulo seguinte será feito uma descrição dos modelos matemáticos dos diferentes componentes que constituem a rede eléctrica de Santiago utilizada no estudo dinâmico no *Matlab/Simulink®*.

Capítulo 3

Modelos de Simulação

3.1 - Introdução

No capítulo 2 foram abordados os principais motivos que levaram ao aparecimento da PD e, conseqüentemente, a sua integração nos SEE. Adicionalmente, foram também abordados diversos aspectos relativos à sua integração em redes eléctricas isoladas, tendo em especial atenção questões relacionadas com problemas de estabilidade de frequência. A produção e injeção de electricidade na rede de distribuição veio revolucionar o conceito de exploração dos SEE. Para que esta mudança de paradigma não ponha em causa a segurança do sistema é necessário avaliar a influência que as unidades de PD exercem sobre a rede. Do ponto de vista da estabilidade de frequência, essa avaliação exige o estudo do comportamento dinâmico da rede eléctrica, sendo para tal exigida a utilização de modelos matemáticos que reflectam o comportamento dinâmico dos diferentes componentes da rede: unidades térmicas convencionais e unidades de produção de origem renovável.

Tal como descrito no capítulo anterior, as unidades de produção de origem renovável a instalar no SEE em estudo nesta dissertação são os sistemas solar fotovoltaico e os sistemas eólicos, por apresentarem um forte potencial de desenvolvimento em Cabo Verde. Consequentemente, a modelização dinâmica das fontes de produção de origem renovável incide sobre estas tecnologias. É ainda importante referir que a modelização adoptada para cada componente da rede eléctrica foi orientada ao desenvolvimento de uma plataforma de simulação dinâmica de redes eléctricas isoladas em ambiente *Matlab/Simulink®*, tal como será descrito no Capítulo 4.

Assim sendo, na secção 3.2 é apresentado o modelo de simulação da máquina diesel e do regulador de velocidade. Na secção 3.3 é feita uma breve caracterização da máquina síncrona e o seu sistema de regulação de tensão e nas subsecções 3.3.1 e 3.3.2 são apresentados os respectivos modelos de simulação dinâmica. Na secção 3.4 é feita uma definição sintética do parque solar, enquanto na subsecção 3.4.1 é apresentado o modelo matemático do painel

fotovoltaico. Na secção 3.5 é apresentado o conceito do parque eólico. Na secção 3.6 é apresentado uma descrição das máquinas assíncronas e turbinas eólica. Os conceitos sobre o volante de inércia e o seu modelo matemático são apresentados na secção 3.7. Os modelos das cargas e linhas de transmissão são apresentados nas secções 3.8 e 3.9, respectivamente. Por último, na secção 3.10, são apresentados os resumos e as conclusões.

3.2 - Máquina Diesel e Regulador de Velocidade

As máquinas diesel e os reguladores de velocidade a elas associados têm um papel preponderante na análise de estabilidade dos sistemas isolados [13]. De acordo com [2], os SEE em corrente alternada funcionam com frequência e tensão constantes. Estas grandezas têm assim que ser reguladas, para o que se utilizam sistemas de controlo em malha fechada.

Em condições normais de operação, a frequência é uma grandeza de carácter global que deve ser mantida dentro de uma gama muito estreita, tipicamente $\pm 0,1\%$ do valor nominal. A regulação de frequência está intimamente ligada com a manutenção do equilíbrio entre a produção e o consumo de potência activa.

Na regulação de frequência-potência activa são utilizados os reguladores de carga-velocidade dos grupos geradores. O regulador de velocidade é um dispositivo mecânico ou electromecânico, utilizado para controlar automaticamente a velocidade do motor diesel através da injeção de mais ou menos combustível. O regulador mede a velocidade de rotação do grupo, compara-a com o valor de referência e actua sobre a válvula de admissão do combustível da máquina primária, variando a respectiva potência mecânica e, por conseguinte, a potência activa fornecida pelo gerador [2].

Relativamente à modelização da máquina diesel, esta é normalmente modelizada por uma função de transferência de primeira ordem, que relaciona o consumo do combustível com a potência mecânica da máquina [14].

O modelo da máquina diesel e do respectivo regulador de velocidade utilizado neste estudo encontra-se representado na figura 3.1.

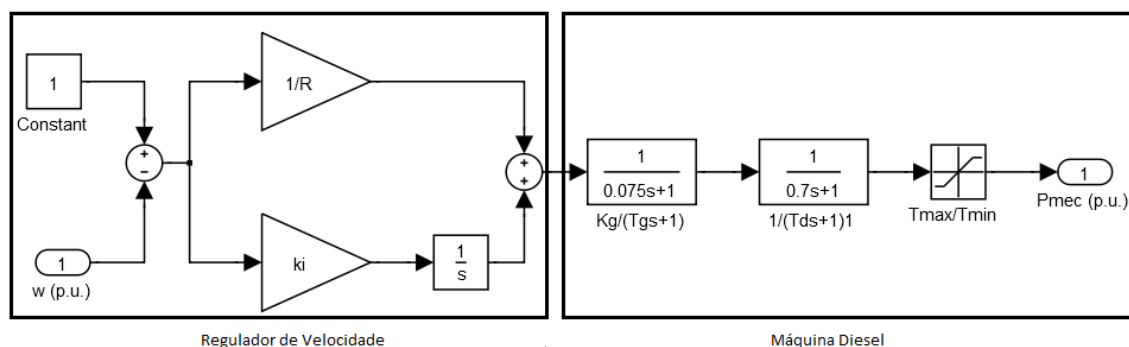


Figura 3.1 - Diagrama de bloco do regulador de velocidade e da Máquina Diesel (Modelo Matlab/Simulink)

Em que:

K_i : Ganho integral do controlador (p.u.kW/p.u.Hz)

R : Estatismo (p.u.Hz/p.u.kW)

K_g : Ganho do regulador de velocidade (p.u.kW/p.u.Hz)

T_g : Constante de tempo do regulador de velocidade (s)

T_d : Constante de tempo da máquina diesel (s)

T_{max} : Binário máximo fornecido pela máquina diesel (p.u.)

T_{min} : Binário mínimo fornecido pela máquina diesel (p.u.)

“ P_{mec} (p.u.)”: Potência mecânica fornecido pela máquina diesel (p.u.)

“Constant 1”: Valor de referência da frequência da rede (1 p.u.)

“ W (p.u.)”: Valor da frequência dos geradores

Note-se que a diferença entre W (p.u) e “Constant 1” permite calcular o desvio da frequência relativamente ao valor de referência 1 p.u..

3.3 - Máquina Síncrona e Sistema de regulação de Tensão

A máquina síncrona, o transformador trifásico e a linha de transmissão e distribuição de energia eléctrica constituem os componentes básicos de um SEE [15]. A máquina síncrona apresenta a flexibilidade de poder funcionar como motor ou como gerador, sendo que no funcionamento como motor recebe a designação de motor síncrono e no modo de funcionamento como gerador normalmente se designa por alternador.

A designação “síncrona” deve-se ao facto do campo girante no entreferro ter a mesma velocidade angular que a do rotor e desta máquina, em regime estacionário, funcionar com velocidade e frequência constantes, em sincronismo com todas as outras ligadas a mesma rede [2].

Em estudos de estabilidade de frequência de SEE, é fundamental uma modelização adequada da máquina síncrona. Na biblioteca *SimPowerSystems* do **Matlab/Simulink®** encontram-se diferentes tipos de modelos que podem ser usados numa grande variedade de estudos. Existem, basicamente dois tipos de representação do modelo para as máquinas síncronas:

- Modelo para máquinas síncronas de rotor cilíndrico;
- Modelo para máquinas síncronas de pólos salientes.

A velocidade de rotação das máquinas síncronas de rotor cilíndrico varia tipicamente entre 1500rpm e 3000rpm e são muito usados nas centrais térmicas. As máquinas síncronas de pólos salientes apresentam uma baixa velocidade de rotação (60 rpm a 750rpm) e são usados

nas centrais hidroeléctricas. Os diagramas esquemáticos dos rotores das máquinas síncrona de rotor cilíndrico e de pólos salientes encontram-se representados nas figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

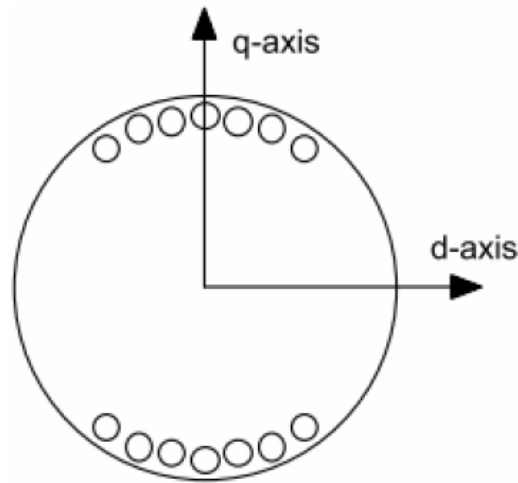


Figura 3.2 - Diagrama de uma máquina síncrona de rotor cilíndrico

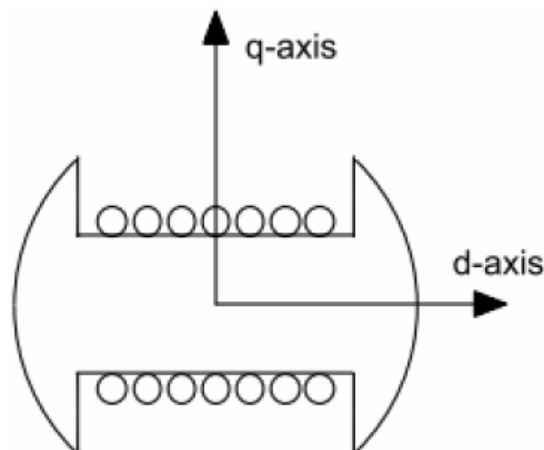


Figura 3.3 - Diagrama de uma máquina síncrona de pólos salientes

3.3.1 - Modelo matemático da máquina síncrona

O modelo da máquina síncrona utilizado tem em consideração o campo do estator e o efeito dos enrolamentos amortecedores. O circuito eléctrico equivalente, ilustrado na figura 3.4, está representado num referencial d-q, cuja referência se encontra fixa no rotor, rodando assim à mesma velocidade deste. Todos os parâmetros e grandezas eléctricas do rotor estão referidos ao estator [16].

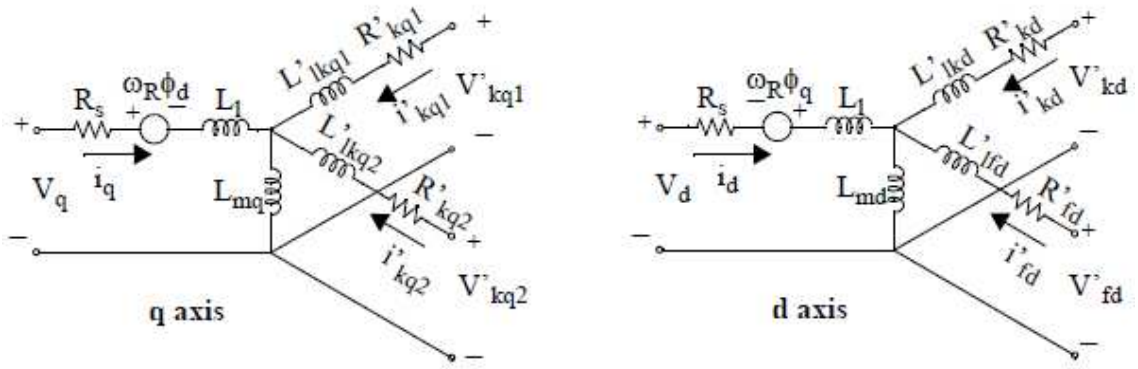


Figura 3.4 - Modelo eléctrico equivalente da máquina síncrona (eixo q e d) [16]

As equações que descrevem o comportamento eléctrico das tensões da máquina síncrona são as que se seguem:

$$\begin{aligned}
 V_d &= R_s \times i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_R \times \varphi_q \\
 V_q &= R_s \times i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q - \omega_R \times \varphi_d \\
 V'_{fd} &= R'_{fd} \times i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi_d \\
 V'_{kd} &= R'_{kd} \times i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd} \\
 V'_{kq1} &= R'_{kq1} \times i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1} \\
 V'_{kq2} &= R'_{kq2} \times i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

O cálculo do fluxo é feito de acordo com a seguinte equações:

$$\begin{aligned}
 \varphi_d &= L_d \times i_d + L_{md} \times (i'_{fd} + i'_{kd}) \\
 \varphi_q &= L_q \times i_q + L_{mq} \times i'_{kq} \\
 \varphi'_{fd} &= L'_{fd} \times i'_{fd} + L_{md} \times (i_d + i'_{kd}) \\
 \varphi'_{kd} &= L'_{kd} \times i'_{kd} + L_{md} \times (i_d + i'_{fd}) \\
 \varphi'_{kq1} &= L'_{kq1} \times i'_{kq1} + L_{mq} \times i_q \\
 \varphi'_{kq2} &= L'_{kq2} \times i'_{kq2} + L_{mq} \times i_q
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Em que os parâmetros, expressos em p.u., têm o significado que se segue:

R_s : resistência do estator

i_d : intensidade da corrente, eixo d

i_q : intensidade da corrente, eixo q

ω_R : velocidade de rotação nominal do rotor

φ_d : fluxo, eixo d

φ_q : fluxo, eixo q

Como todas as máquinas eléctricas rotativas, para além do comportamento eléctrico, o modelo terá de incluir uma parte que descreve também o comportamento mecânico. A equação que se segue contempla a componente do comportamento mecânico da máquina síncrona.

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - K_d \times \Delta\omega(t)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_o$$
(3.3)

Em que:

$\Delta\omega$: Desvio de velocidade (p.u.)

H: Constante de inércia (s)

T_m : Binário electromecânico (p.u)

K_d : Coeficiente de atrito (p.u.)

$\omega(t)$: Velocidade do rotor (p.u)

ω_o : Velocidade síncrona (tipicamente 1 p.u.)

3.3.2 - Regulador de tensão/Excitação

Os reguladores de tensão dos grupos geradores são utilizados na regulação de tensão ao terminal da respectiva máquina ou na regulação da tensão do barramento de saída do conjunto de máquina síncrona e respectivo transformador elevador de tensão. É sabido que os geradores síncronos produzem ou consomem potência reactiva, dependendo da corrente de excitação. A corrente de excitação é assegurada pelo sistema de excitação, que fornece uma corrente contínua ao enrolamento rotórico da máquina. Na figura 3.5 está representado o diagrama de bloco do regulador de tensão. O regulador de tensão/excitação utilizado consiste no modelo disponibilizado na biblioteca *SimPowerSystems* do **Matlab/Simulink®**.

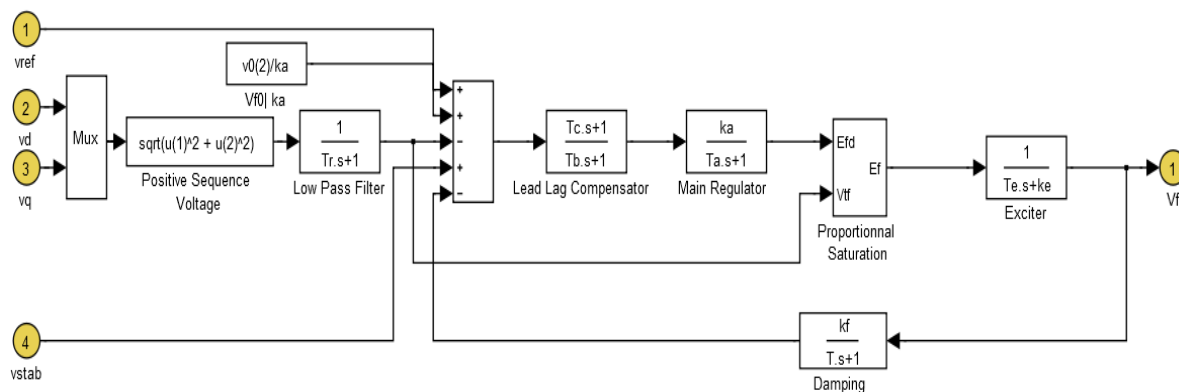


Figura 3.5 - Diagrama de bloco do regulador de tensão IEEE tipo 1 [16]

A tensão V_{ref} é a tensão de referência e V_{stab} representa a tensão que pode ser disponibilizado por um PSS (*Power System Stabilizer*). O compensado *lead lag*, caracterizado pelas constantes de tempo T_b e T_c , destina-se a reduzir o ganho a altas frequências, minimizando desse modo a influência negativa do regulador no amortecimento do sistema.

A malha de realimentação definida pelo ganho k_f e constante de tempo T_f , também denominada malha de estabilização, é responsável por assegurar a estabilidade da regulação de tensão. O amplificador é caracterizado pelo ganho K_a e a constante de tempo T_a , em conjunto com valores máximos e mínimos de saída [13].

De acordo com o modelo disponível na biblioteca *SimPowerSystems*, a excitatriz pode ser representada pela equação seguinte equação (3.4):

$$\frac{V_f}{E_f} = \frac{1}{T_e s + K_e} \quad (3.4)$$

A equação 3.4 representando a função de transferência entre a saída V_f e a entrada do regulador E_f .

A tensão de saída do gerador, após rectificação e filtragem, é conduzida ao regulador que a compara com o valor de referência. O erro é amplificado e aplicado ao sistema de excitação, que constitui o elemento de potência do sistema de controlo. O regulador pode ainda, receber sinais de entradas auxiliares, destinados a melhorar o desempenho do mesmo em regime transitório, mediante o amortecimento das oscilações do rotor resultante de desequilíbrios entre as potências mecânicas e eléctricas.

3.4 - Parque Solar

Um parque solar é o agrupamento de um conjunto de painéis solares fotovoltaicos com uma estrutura bem definida, cujo propósito é a produção de energia eléctrica através da conversão da radiação solar em electricidade. Na figura 3.6 encontra-se representado o diagrama esquemático do modelo do parque solar utilizado no ambiente *Matlab/Simulink®* para o estudo de estabilidade da rede eléctrica da ilha de Santiago em face a uma perturbação.

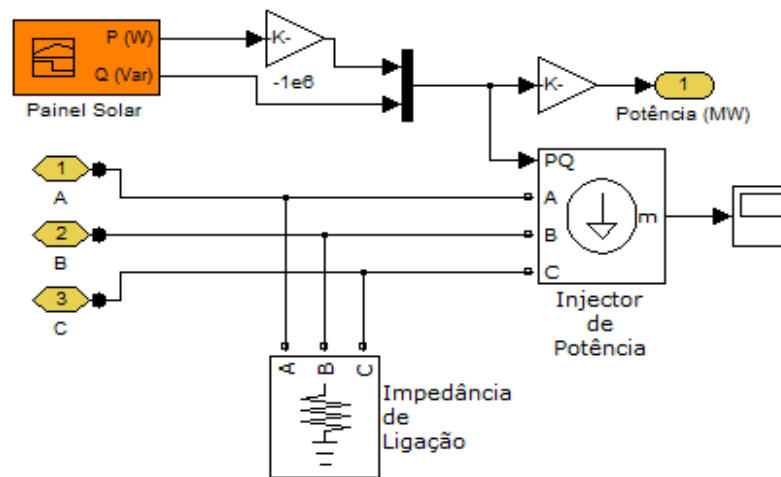


Figura 3.6 - Modelo do parque solar em ambiente Matlab/Simulink®

Cada um dos blocos presentes no modelo tem o significado explicado a seguir:

“Painel Solar”: Modeliza a potência produzida pelo painel (W)

“Ganho K”: Converte a potência produzida em W para MW

“Impedância de ligação”: permite estabelecer a ligação do injetor de potência à rede

“A, B, C”: Fases a, b e c das linhas de interligação com o resto do sistema

“Injector de potência”: injecta a potência produzida pelo painel na rede

3.4.1 - Modelo do painel Fotovoltaico

De entre os diferentes modelos existentes, o comportamento de uma célula fotovoltaica pode ser descrita através do circuito eléctrico equivalente apresentado na figura 3.7. Com o intuito de representar com mais rigor possível as características das células, optou-se pelo modelo detalhado.

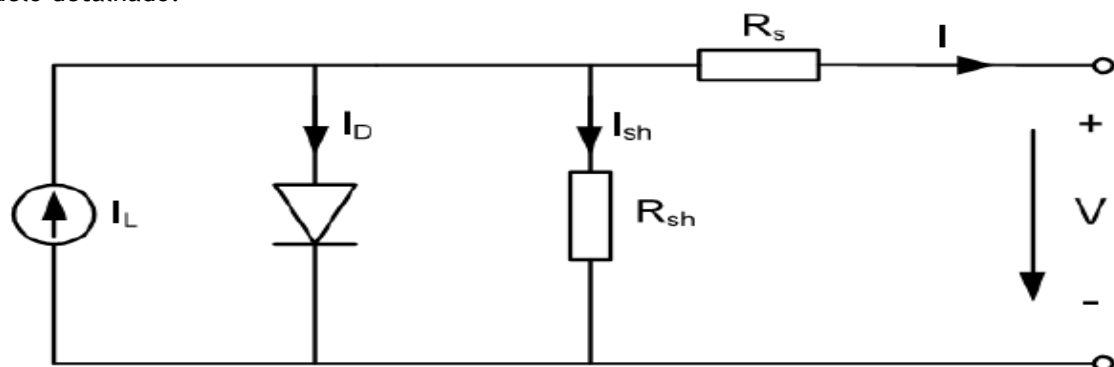


Figura 3.7 - Circuito eléctrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica [11]

A relação entre a corrente e a tensão da célula é dada pela equação:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \times \left(e^{\frac{q[V - R_s \times I]}{A \times K \times T}} - 1 \right) - \frac{V - R_s \times I}{R_{sh}} \quad (3.5)$$

Em que:

I_L : intensidade de corrente gerada pela radiação solar (fotocorrente) (A)

I_D : intensidade de corrente de díodo (A)

I_{sh} : intensidade de corrente shunt (A)

I_0 : intensidade de corrente inversa de saturação do díodo (A)

R_{sh} : resistência shunt (Ω) (modeliza a perda de corrente)

R_s : resistência Série (Ω) (modeliza a perda de tensão)

V : tensão aos terminais da carga (V)

I : intensidade da corrente na carga (A)

Q : carga do electrão (1.6×10^{-19} C)

T : temperatura da célula

K : Constante de Boltzmann (3.18×10^{-23} J.K⁻¹)

A característica corrente/tensão (I-V) e corrente/potência (I-P) de uma célula fotovoltaica genérica encontram-se apresentadas na figura 3.8. Pode-se constatar que a potência máxima que a célula fotovoltaica consegue fornecer depende do ponto de operação, ou seja, da tensão DC que é aplicada à célula. O ponto onde a potência experimenta o seu valor máximo é designado na literatura anglo-saxónica por *MPP* - *Maximum Power Point*.

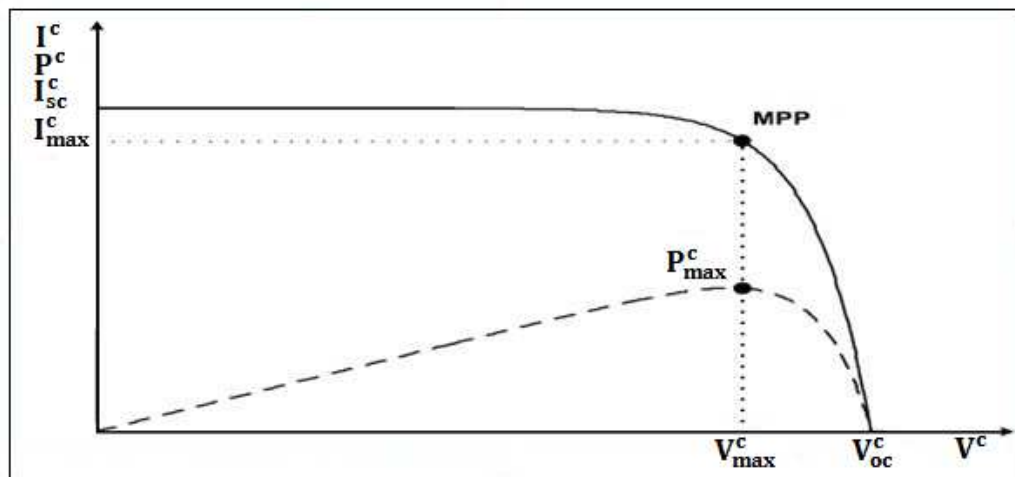


Figura 3.8 - Característica I-V e I-P de uma célula fotovoltaica (adaptado de [11])

Os fabricantes das células fotovoltaicas, normalmente, fornecem nos seus catálogos um conjunto alargado de informações relativos ao seu produto. De entre muitas outras informações contidas no catálogo pode-se destacar a variação da característica I-V com a radiação solar e temperatura.

É possível traçar um conjunto de características I-V para diferentes valores da radiação, G , considerando a temperatura constante. Na figura 3.9 está representada a variação da característica I-V com a radiação solar.

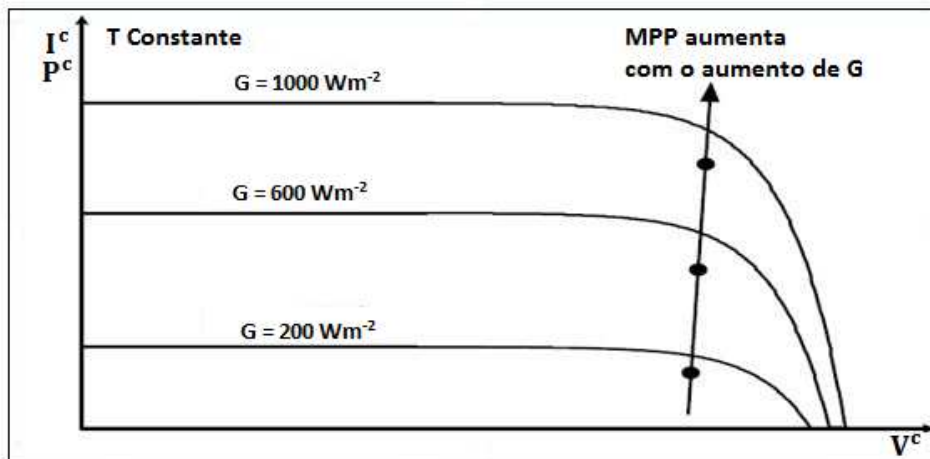


Figura 3.9 - Variação da característica I-V da célula com a radiação (adaptado de [11])

É notório que o valor da corrente, I^c_{max} , é muito afectado pela variação da radiação solar, sendo que o valor da tensão, V^c_{max} , sofre apenas uma ligeira variação. Para uma temperatura, T , constante a diminuição da radiação solar provoca uma diminuição do MPP.

A temperatura ao longo de um determinado dia é muito variável. Esta variabilidade é influenciada, fundamentalmente, pela estação do ano e pela localização geográfica. A figura 3.10 ilustra a característica I-V de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de temperatura, T , considerando a radiação solar constante.

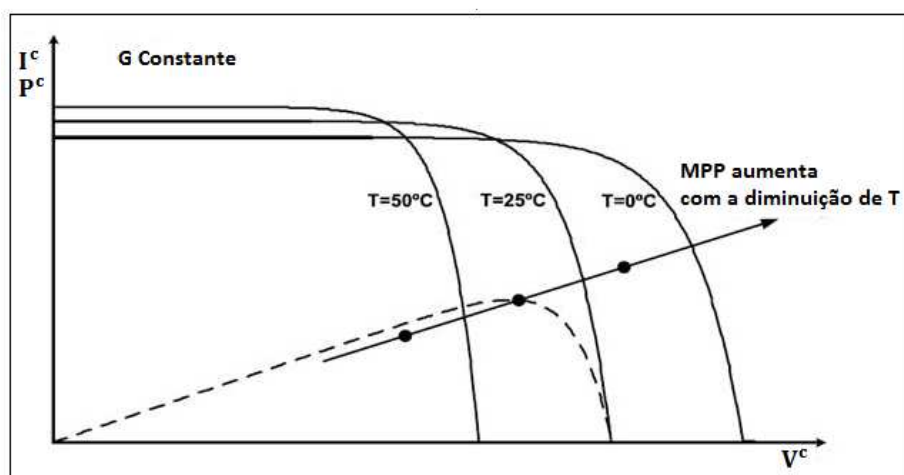


Figura 3.10 - Variação da característica I-V da célula com a temperatura (adaptado de [11])

Neste caso, é visível que para uma radiação solar, G , constante a diminuição da temperatura traduz-se num aumento do valor da tensão, $V_{\max}^c$, e consequentemente o aumento do MPP, enquanto o valor da corrente, $I_{\max}^c$, sofre apenas uma ligeira alteração.

Tendo em conta a particularidade da característica I-V da célula fotovoltaica, o inversor encontra-se equipado com um sistema de controlo de modo a assegurar a extracção da máxima potência do painel solar para diferentes condições de radiação e temperatura ambiente. Na figura 3.11 encontra-se representado a configuração típica da ligação dos sistemas fotovoltaicos à rede eléctrica.

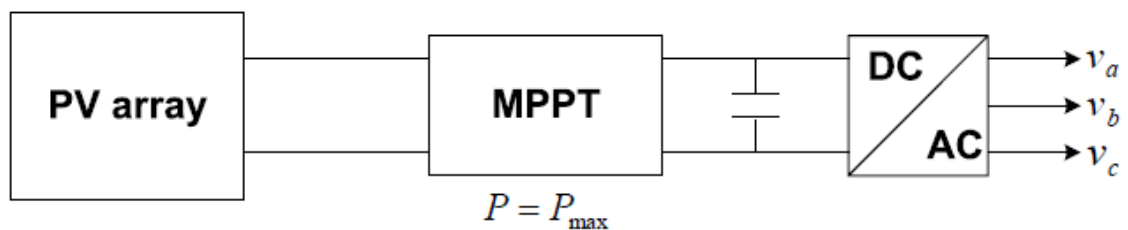


Figura 3.11 - Esquema de ligação dos sistemas fotovoltaicos [11]

3.5 - Parque Eólico

Um parque eólico é entendido como sendo um espaço, terrestre (*onshore*) ou marítimo (*offshore*), onde estão instalados um conjunto de aerogeradores com posicionamento bem definido destinados a transformar a energia eólica em energia eléctrica. Para o estudo realizado nesta dissertação o parque eólico foi modelizado de acordo com o esquema ilustrado na figura 3.12.

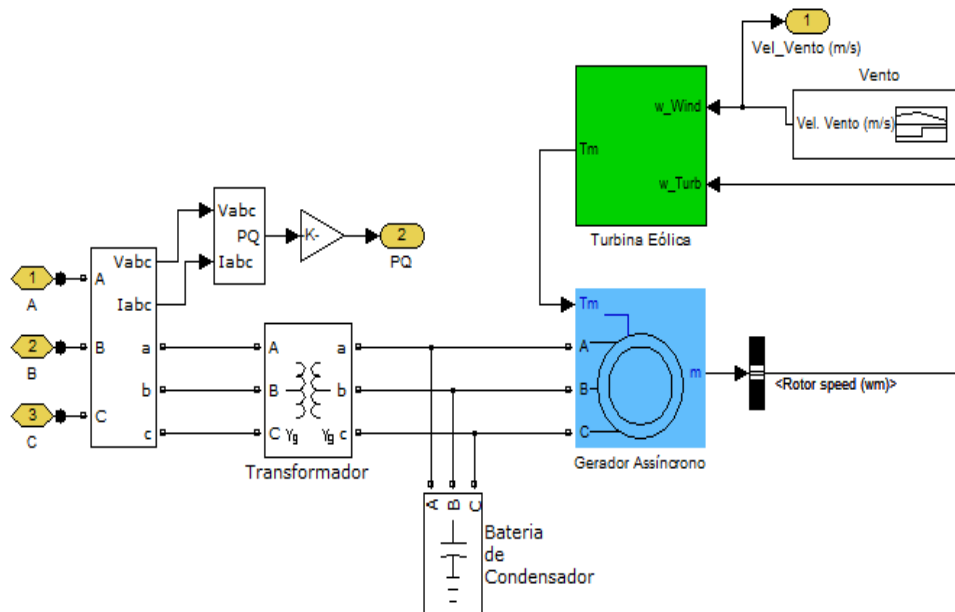


Figura 3.12 - Modelo do parque eólico em ambiente *Matlab/Simulink*®

Em que cada um dos blocos tem o significado explicado a seguir:

“Turbina eólica”: Modeliza as turbinas eólicas

“Vento”: Modeliza a velocidade aplicada às turbinas eólicas

“Gerador Assíncrono”: Modeliza o gerador equivalente do sistema

“Baterias de condensador”: Baterias de condensador para alimentar o gerador assíncrono

“Transformador”: Modeliza o transformador

3.6 - Máquina assíncrona e Turbina Eólica

3.6.1 - Máquina assíncrona

A máquina assíncrona, à semelhança de uma máquina síncrona, apresenta a vantagem de poder operar quer como gerador, quer como motor. Em comparação com as máquinas síncronas estas máquinas caracterizam-se por não possuírem um campo de excitação e por operarem a uma velocidade diferente da do sincronismo. A máquina de indução no modo de funcionamento como motor opera a uma velocidade abaixo da velocidade de sincronismo

(sub-sincronismo) e no modo de funcionamento como gerador opera a uma velocidade acima da velocidade de sincronismo (super-sincronismo). Optou-se por trabalhar com as máquinas de indução devido ao facto destas máquinas serem de simples modelização e controlo e, por não comprometer os estudos, pois o estudo é orientado apenas a variação do recurso, não foi tido em conta as cavas de tensão. O gerador assíncrono, ou gerador de indução, além de ser mais robusto, requer uma manutenção mínima, apresenta baixo custo e uma longa vida de operação. Quanto à configuração do rotor, os geradores de indução são classificados em:

- Gerador de indução de rotor bobinado;
- Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo.

Na figura 3.13 encontra-se representado, a título ilustrativo, os dois tipos de rotor que podem ser encontrados num gerador de indução (rotor bobinado e em gaiola de esquilo).

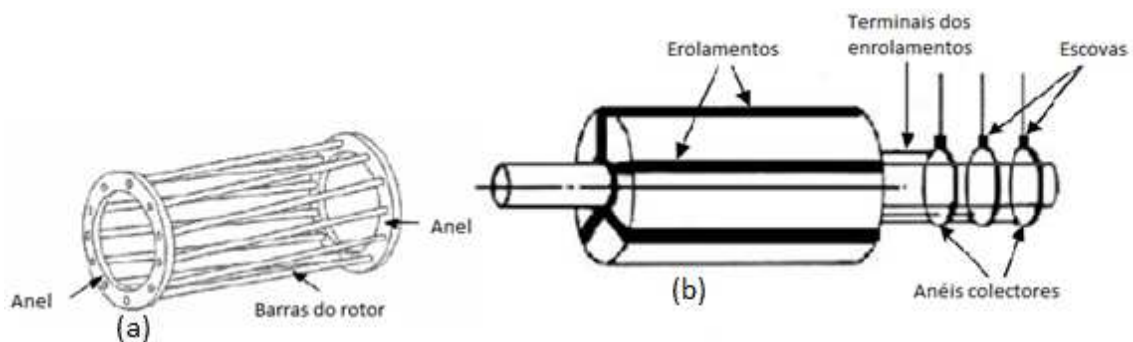


Figura 3.13 - Esquema do rotor em gaiola de esquilo (a) e bobinado (b)

A desvantagem inerente à utilização das máquinas de indução (convencionais) reside no facto destas necessitarem de consumir energia reactiva, obrigando a instalação de baterias de condensadores para compensação do factor de potência.

3.6.2 - Modelo matemático da máquina assíncrona

O circuito eléctrico equivalente de uma máquina assíncrona encontra-se ilustrado na figura 3.14. Todas as grandezas do estator e do rotor estão representados num referencial arbitrário d-q.

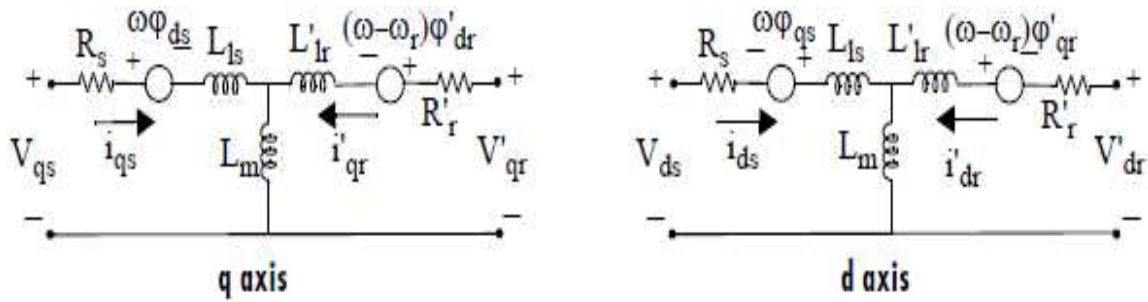


Figura 3.14 - Modelo eléctrico da máquina assíncrona (eixo q e d) [16]

O comportamento eléctrico da tensão da máquina assíncrona está caracterizado pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s \times i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \times \varphi_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s \times i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} + \omega \times \varphi_{qs} \\
 V'_{qr} &= R'_r \times i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \times \varphi'_{dr} \\
 V'_{dr} &= R'_r \times i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} + (\omega - \omega_r) \times \varphi'_{qr}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

O binário eléctrico é obtido através da seguinte expressão:

$$T_e = 1,5 \times (\varphi_{ds} \times i_{qs} - \varphi_{qs} \times i_{ds}) \tag{3.7}$$

Os fluxos são calculados do seguinte modo:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{qs} &= L_s \times i_{qs} + L_m \times i'_{qr} \\
 \varphi_{ds} &= L_s \times i_{ds} + L_m \times i'_{dr} \\
 \varphi'_{qr} &= L'_r \times i'_{qr} + L_m \times i_{qs} \\
 \varphi'_{dr} &= L'_r \times i'_{dr} + L_m \times i_{ds} \\
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L'_r &= L'_{lr} + L_m
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Onde cada um dos parâmetros, expressos em p.u., têm o significado que se segue:

R_s, L_{ls} : resistência e indutância do estator

R'_r, L'_{lr} : resistência e indutância do rotor

L_m : indutância de magnetização

L_s, L'_r : indutância total do rotor e do estator

V_{qs}, i_{qs} : tensão e corrente do estator, eixo q

V'_{qr}, i'_{qr} : tensão e corrente do rotor, eixo q

V_{ds} , i_{ds} : tensão e corrente do estator, eixo d

V'_{dr} , i'_{dr} : tensão e corrente do rotor, eixo d

φ_{qs} , φ_{ds} : fluxo no estator, eixo d e q

φ'_{qr} , φ'_{dr} : fluxo no rotor, eixo d e q

ω_m : velocidade angular do rotor

3.6.3 - Turbina Eólica

As turbinas eólicas, como já foi referido na secção 2.3.2, são responsáveis pela conversão da energia cinética do vento em energia eléctrica através do recurso às máquinas eléctricas. O diagrama de blocos representativo do modelo da turbina eólica no ambiente **Matlab/Simulink®** encontra-se representado na figura 3.15.

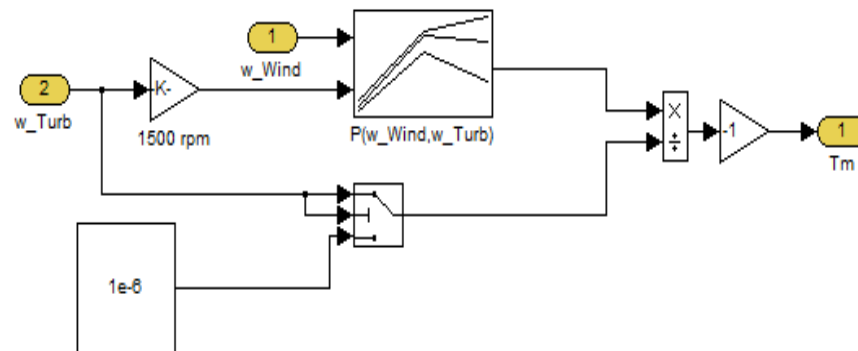


Figura 3.15 - Modelização da turbina eólica em ambiente **Matlab/Simulink®**

A variação da potência eléctrica em função da velocidade do vento define a característica mecânica de uma turbina eólica. Na figura 3.16 encontra-se ilustrada a curva de potência da turbina eólica.

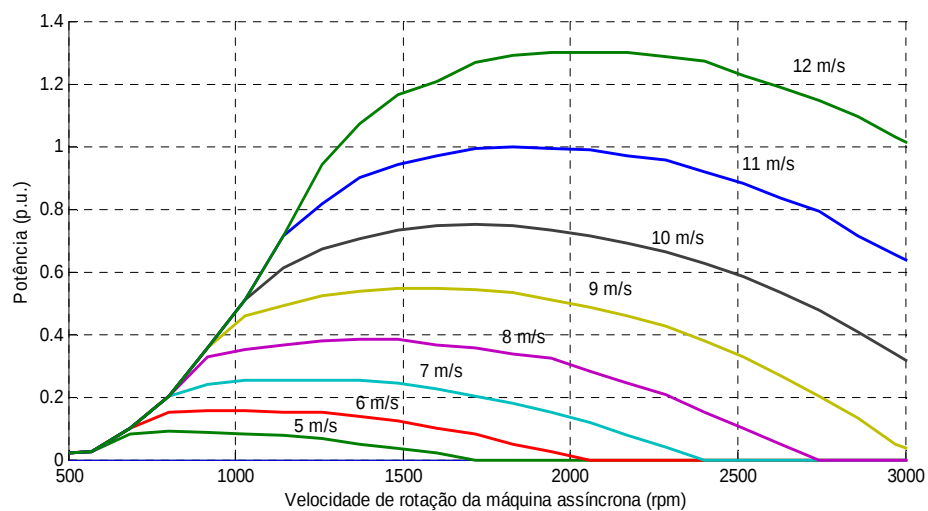


Figura 3.16 - Curva de potência da turbina eólica

3.7 - Volante de Inércia (*Flywheel*)

Um volante de inércia é um sistema de armazenamento de energia (cinética) através da rotação de um disco em torno do seu eixo. A quantidade da energia armazenada depende da massa e da geometria do disco em rotação e da velocidade de rotação, de acordo com a seguinte equação [11]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (3.9)$$

Onde:

E: energia cinética (J)

J: momento de inércia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

ω : velocidade angular ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

Quanto à velocidade de rotação os volantes de inércia são classificados em: baixa velocidade ou alta velocidade. Os volantes de baixa velocidade são normalmente feitos à base de aço e suspenso por rolamentos convencionais, enquanto os de alta velocidade são feitos de fibra de carbono e vidro, pois estes materiais aguentam o desgaste provocado pelas rotações [17]. Este último tipo de volante levanta algumas preocupações no que diz respeito às perdas por fricção. Com o objectivo de minimizar estas perdas, este tipo de volante é colocado dentro de um sistema de vácuo e suspenso por rolamentos magnéticos. Os rolamentos electromagnéticos não têm qualquer contacto com o veio do volante, não possuem partes móveis nem necessitam de lubrificação [11].

O volante de inércia tem aplicação no controlo primário de frequência, pois trata-se de um dispositivo que permite armazenar energia cinética e libertá-la rapidamente, podendo dar suporte à rede durante intervalos de tempo relativamente curtos (poucas dezenas de segundos), mas que pode ter contributo decisivo na estabilidade da frequência quando ocorrem desequilíbrios graves na rede em termos de produção/consumo. O diagrama de blocos que permite a interligação do volante de inércia à rede eléctrica está ilustrado na figura 3.17.

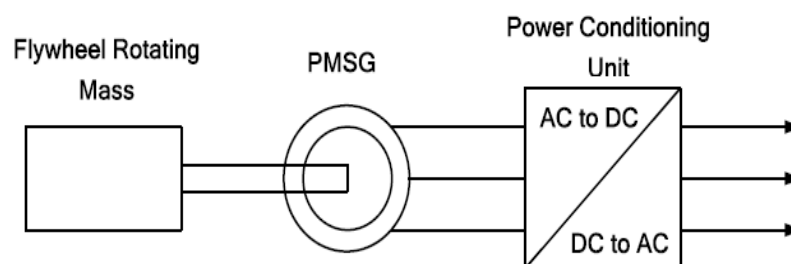


Figura 3.17 - Diagrama de bloco do volante de inércia [11]

Quando integrado numa rede eléctrica, o volante de inércia absorve ou fornece energia (energia cinética), recorrendo a uma máquina síncrona de íman permanente que funciona quer como motor, quer como gerador consoante o seu ângulo de carga. No modo de funcionamento como motor a energia eléctrica é absorvida da rede pelo estator, convertida em binário e aplicado ao rotor, aumentando a velocidade do volante. Quando em funcionamento como gerador, a energia cinética armazenada no rotor é injectada na rede eléctrica, provocando a diminuição da velocidade do volante [18].

Quando integrados na rede eléctrica na perspectiva de fornecer um serviço de sistema do tipo controlo primário de frequência, os volantes de inércia podem ser controlados no sentido de injectarem potência activa na rede de acordo com uma característica de funcionamento do tipo proporcional, ou seja: a injeção de potência activa na rede pode ser feita proporcionalmente ao desvio de frequência que é registado na rede:

$$\Delta P = k \times \Delta f \quad (3.10)$$

Dito de outra forma, a contribuição do volante de inércia para o controlo primário de frequência apenas ocorre quando a frequência da rede se desvia do respectivo valor nominal. Equacionando a possibilidade de o volante de inércia fornecer ou absorver potência da rede em função do desvio de frequência que é registado, e garantindo que os limites de operação terão de ser respeitados, o modelo operacional do volante de inércia pode ser descrito pela característica apresentada na figura seguinte:

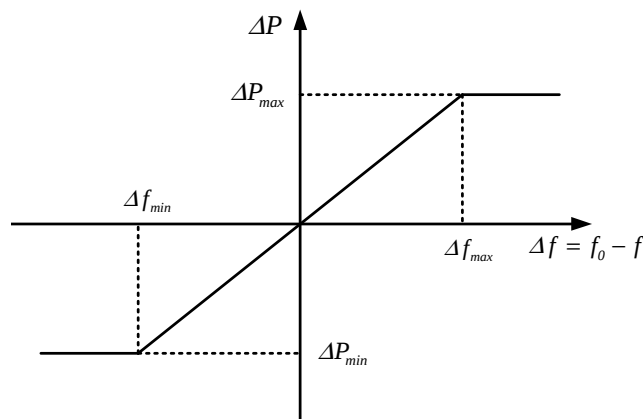


Figura 3.18 - Característica de funcionamento de um volante de inércia [11]

Tratando-se de um dispositivo de armazenamento de energia, naturalmente que apresenta uma capacidade de armazenamento finita. Assim sendo, é necessário proceder à monitorização da energia entregue/absorvida, e com base no seu estado de carga proceder:

- À interrupção de injeção de potência, sempre que a energia armazenada se aproxime de zero;

- À interrupção da absorção de potência, sempre que a energia armazenada se aproxime do limite de armazenamento.

O diagrama de blocos que representa o volante de inércia utilizado na análise dinâmica da rede eléctrica de Santiago encontra-se representado na figura 3.19, e reflecte os princípios de modelização aqui apresentados. Adicionalmente, considera-se que o dispositivo apresenta ainda uma pequena constante de tempo de resposta, representada pela função de transferência de primeira ordem apresentada na figura 3.19.

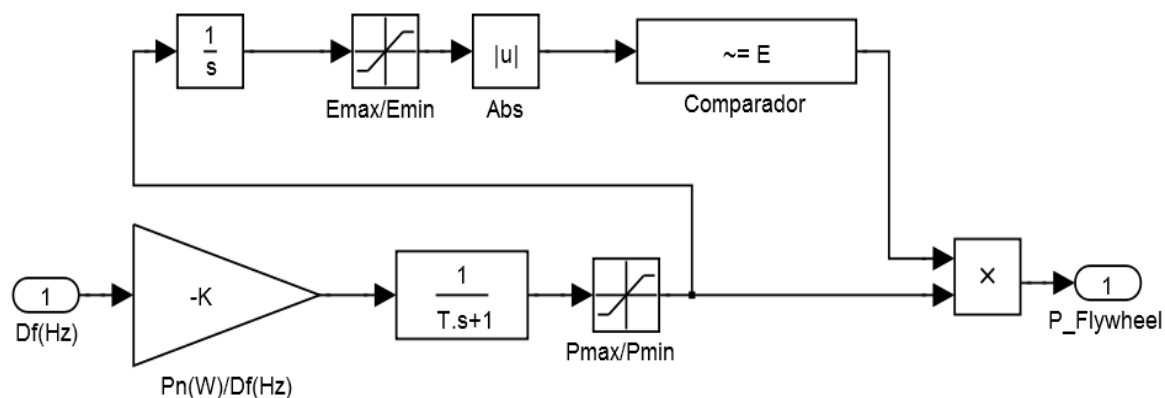
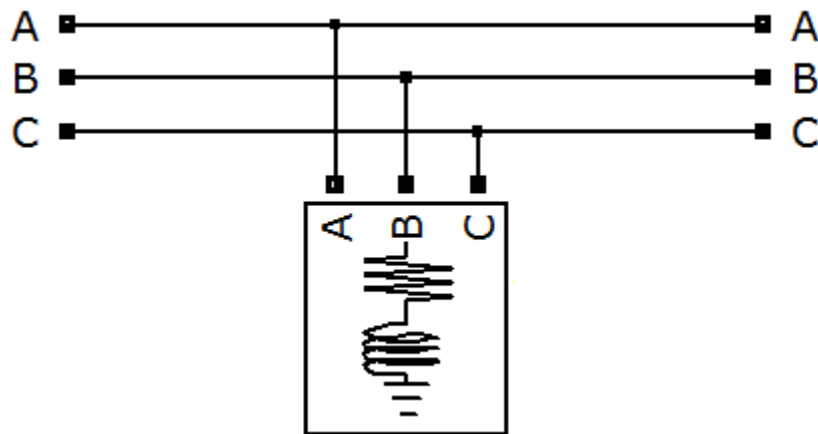


Figura 3.19 - Digrama de bloco do volante de inércia em ambiente *Matlab/Simulink®*

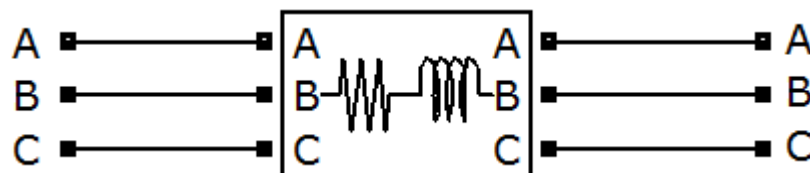
3.8 - Modelização das cargas

A modelização das cargas em ambiente *Matlab/Simulink®* foi feita através de um modelo disponível na biblioteca *SimPowerSystems*, considerando uma associação série de elementos RLC. A potência das cargas varia consoante a variação dos parâmetros RLC, que representam a potência activa (W), reactiva indutiva (var) e reactiva capacitiva (var) da carga, respectivamente. Importa referir que neste modelo a potência reactiva capacitiva foi considerada nula. As cargas encontram-se ligadas à rede através de uma configuração em estrela com o neutro ligado à terra. A figura 3.20 ilustra a modelização das cargas feitas no ambiente *Matlab/Simulink®*.

Figura 3.20 - Modelo das cargas em ambiente *Matlab/Simulink*®

3.9 - Modelização das linhas de transmissão

À semelhança da modelização das cargas, a modelização das linhas de transmissão em ambiente *Matlab/Simulink*® foi feita através de elementos RL disponível na biblioteca *SimPowerSystems* sendo desprezada a admitância shunt dos mesmos, o que não representa factor relevante para efeitos de estudos de comportamento dinâmico/estabilidade de frequência. A impedância das linhas depende dos parâmetros RL, que representam a resistência R (Ω) e a indutância L (H), respectivamente. Este modelo encontra-se representado na figura 3.21.

Figura 3.21 - Modelo das linhas em ambiente *Matlab/Simulink*®

3.10 - Sumário e Conclusões

No presente capítulo foram descritos os modelos dos principais elementos que constituem o SEE, nomeadamente as máquinas síncronas e assíncronas. Foram também apresentados os modelos utilizados para representar os demais componentes da rede eléctrica com destaque para aerogeradores, volante de inércia, cargas e linhas de transmissão. Como já fora referenciado anteriormente, o principal objecto de estudo nesta dissertação diz respeito à estabilidade dinâmica de uma rede isolada, não sendo portanto necessário adoptar modelos demasiadamente detalhados, em especial para efeitos da representação do comportamento de componentes com interfaces baseadas em electrónica de potência, dadas as baixas constantes de tempo que lhe estão associadas em comparação com as constantes de tempo

de outros elementos do sistema. No Capítulo seguinte serão implementados na plataforma de simulação do comportamento dinâmico da rede eléctrica de Santiago, perante variações de recursos renováveis, os modelos matemáticos descritos no presente Capítulo.

Capítulo 4

Desenvolvimento da Plataforma de Simulação Dinâmica em Ambiente Matlab/Simulink®

4.1 - Introdução

Depois de apresentados no Capítulo 3 aspectos relativos à modelização matemática de diversos componentes da rede, pretende-se agora descrever a integração dos modelos anteriormente descritos, de forma a ser construída a plataforma de simulação em ambiente *Matlab/Simulink®*.

De uma forma geral, os modelos dinâmicos de cada componente do SEE podem ser descritos por um conjunto de equações diferenciais que, em resultado da complexidade do sistema, têm de ser resolvidas numericamente. O ambiente de simulação *Matlab/Simulink®* proporciona naturalmente os meios para a resolução numérica das equações diferenciais que descrevem o comportamento de um dado sistema, sendo posto enfoque no desenvolvimento/integração dos modelos e interpretação dos resultados. No caso específico da modelização do comportamento de SEE, o ambiente de simulação em *Matlab/Simulink®* proporciona já a simulação no domínio fasorial (domínio das frequências), por oposição à simulação no domínio temporal.

Na secção 4.2 é apresentado o grupo diesel e os seus constituintes. Nas secções 4.3, 4.4 e 4.5 serão apresentados os detalhes da implementação da máquina diesel e regulador de velocidade, máquina síncrona e sistema de regulação de tensão respectivamente. A apresentação da implementação dos parques solar será feito na secção 4.6 e do parque eólico na secção 4.7. A implementação da turbina eólica e máquina assíncrona será apresentada nas secções 4.8 e 4.9, respectivamente. Na secção 4.10, 4.11 e 4.12 será feito a implementação do volante de inércia, das cargas e das linhas de transmissão, pela mesma ordem. O aspecto

geral da rede eléctrica da ilha de Santiago em ambiente **Matlab/Simulink®** é apresentado na secção 4.13.

4.2 - Grupo diesel

Toda a produção da energia eléctrica em Cabo Verde tem por base o grupo diesel. Neste sentido o grupo diesel é considerado o cérebro de todo o sistema eléctrico em Cabo Verde, pois a regulação da frequência da rede é da sua inteira responsabilidade. Na figura 4.1 encontra-se representado o diagrama esquemático do grupo diesel implementado no ambiente **Matlab/Simulink®** para a análise dinâmica da rede eléctrica da Ilha de Santiago - Cabo Verde.

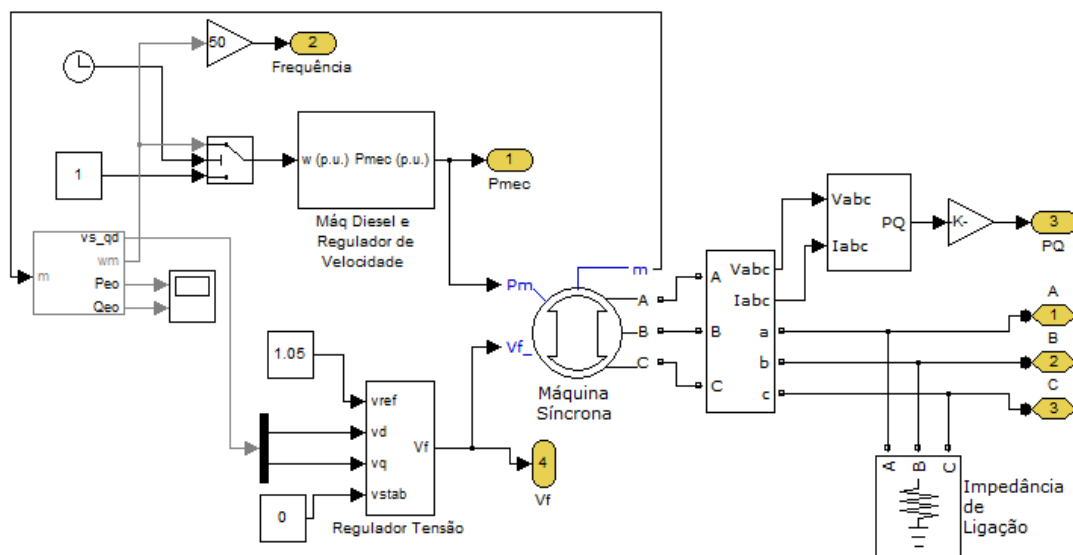


Figura 4.1 - Diagrama esquemático do Grupo Diesel (unidade de produção convencional) em ambiente **Matlab/Simulink®**

Uma simples análise do diagrama esquemático do grupo diesel permite concluir que este é constituído essencialmente por três componentes:

- Máquina diesel e regulador de velocidade;
- Máquina síncrona;
- Regulador de tensão.

Para além deste três componentes essenciais, da unidade de produção convencional, constam do diagrama mais alguns componentes cuja única finalidade é permitir uma ligação adequada do grupo diesel à rede eléctrica.

4.3 - Máquina Diesel e Regulador de Velocidade

O modelo da máquina diesel e regulador de velocidade, cuja descrição foi feita na secção 3.2 do capítulo 3, é de fácil implementação em *Matlab/Simulink®*, e encontra-se apresentado na figura 4.2.

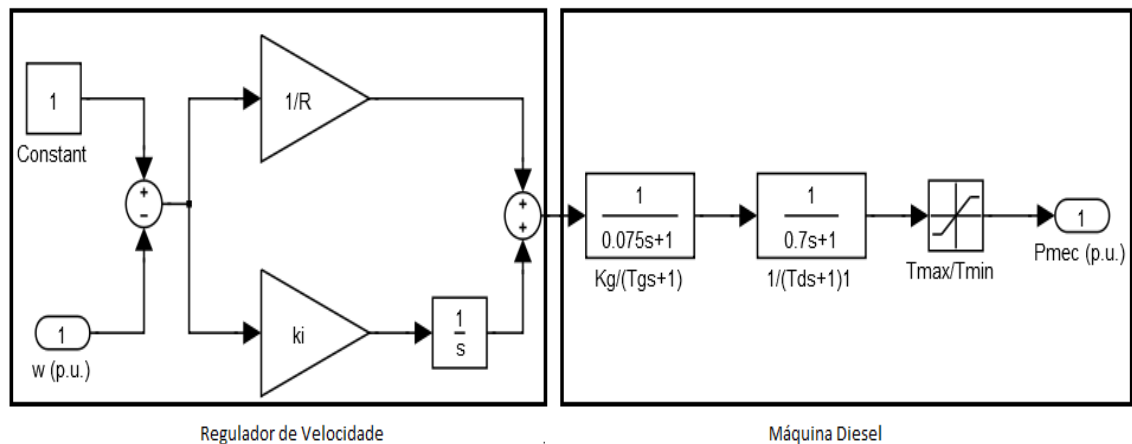


Figura 4.2 - Implementação da máquina diesel e regulador de velocidade [16]

O regulador de velocidade baseia-se num modelo clássico, recebendo como dados de entrada o ganho integral (K_i) e o estatismo (R). A activação do regulador de velocidade depende do valor do desvio de velocidade (ω - p.u.) em relação à frequência nominal (1.0 p.u.). O modelo máquina diesel e regulador de velocidade requer os seguintes parâmetros:

K_i : Ganho integral do controlador (p.u.kW/p.u.Hz)

R : Estatismo (p.u.Hz/p.u.kW)

K_g : Ganho do regulador de velocidade (p.u.kW/p.u.Hz)

T_g : Constante de tempo do regulador de velocidade (s)

T_d : Constante de tempo da máquina diesel (s)

T_{max} : Binário máximo fornecido pela máquina diesel (p.u.)

T_{min} : Binário mínimo pela máquina diesel (p.u.)

A configuração dos parâmetros é feita através do interface (*mask*) que se encontra representado na figura 4.3.

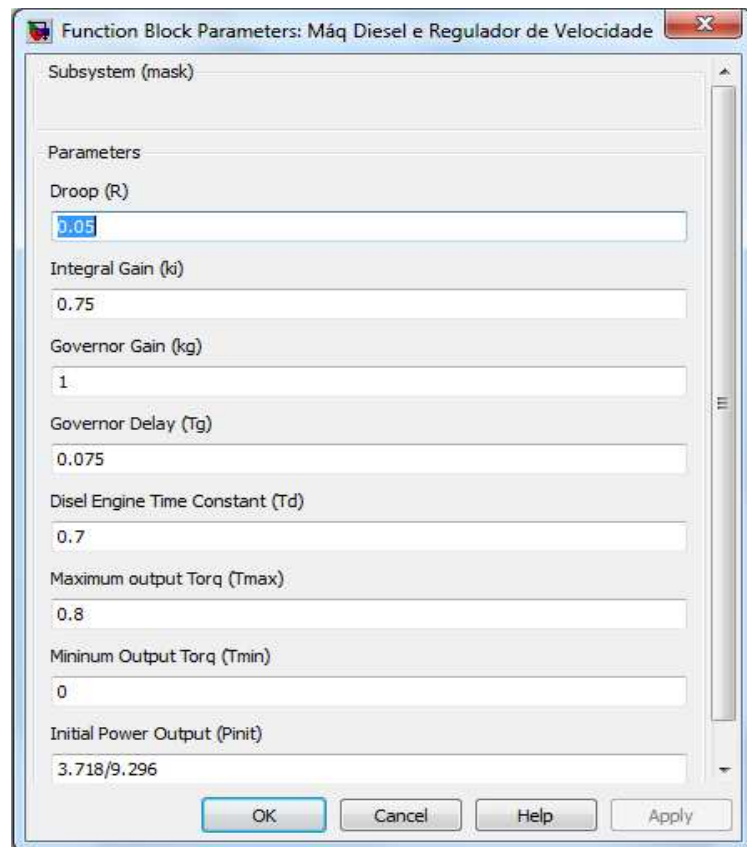


Figura 4.3 - Parâmetros da máquina diesel e regulador de velocidade

O parâmetro, valor inicial da potência de saída “*Initial Power Output (Pinit)*” que não consta no digrama esquemático da máquina diesel e regulador de velocidade é o parâmetro que permite definir a condição inicial das grupos diesel no que diz respeito ao seu despacho.

4.4 - Máquina Síncrona

O modelo da máquina síncrona utilizado na elaboração deste trabalho é o modelo disponível na biblioteca *SimPowerSystems*. Uma vez que o objectivo principal deste trabalho é a avaliação da variação de frequência devido a intermitência das fontes renováveis, é fundamental proceder a uma representação adequada destas máquinas, uma vez que o seu comportamento é responsável pela estabilidade do sistema.

Devido à impossibilidade de obter parâmetros reais para todas as máquinas do sistema eléctrico da Ilha de Santiago, optou-se por usar parâmetros típicos de máquinas com potências semelhantes às utilizadas na ilha de Santiago. Os parâmetros usados para a configuração da máquina síncrona encontram-se representados na figura 4.4.

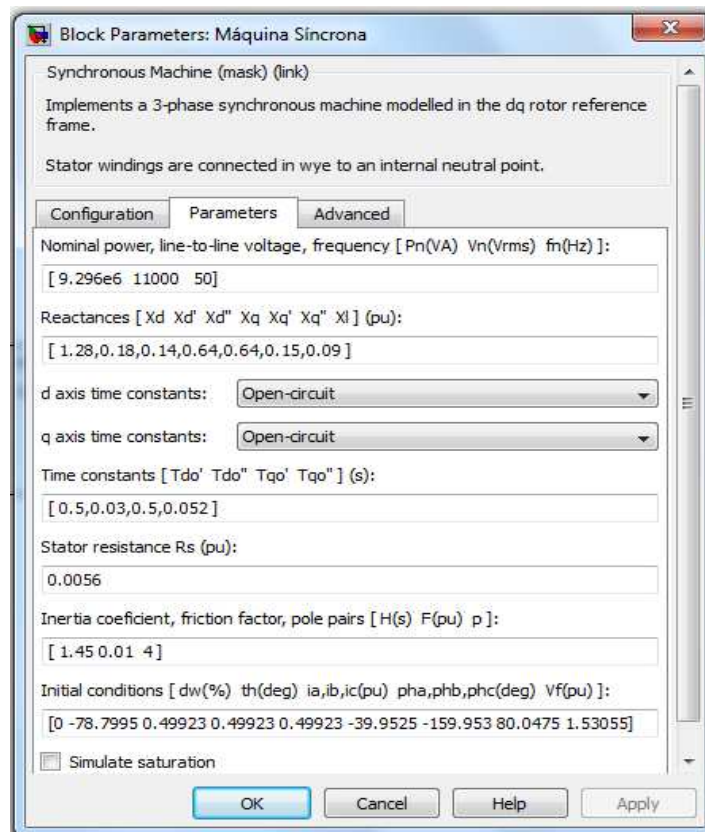


Figura 4.4 - Parâmetros usados na configuração da máquina síncrona

As diferentes variáveis de caracterização da máquina síncrona apresentam o seguinte significado:

1. Nominal power, line-to-line voltage, frequency

Potência aparente trifásica (VA), tensão composta eficaz e a frequência nominal (Hz).

2. Reactances

Reactância segundo o eixo d: síncrona X_d (p.u), transitória X_d' (p.u) e subtransitória X_d'' (p.u).

Reactância segundo o eixo q: síncrona X_q (p.u), transitória X_q' (p.u) e subtransitória X_q'' (p.u).

Reactância de fugas X_l (p.u).

3. d axis time constant e q axis time constant

Especifica para cada eixo, que tipo de constante de tempo a fornecer: circuito aberto ou curto-circuito.

4. Time constant

Constantes de tempo nos eixos d e q (s).

5. Stator resistance

Resistência dos enrolamentos do estator R_s (p.u.).

6. Inertia coefficient, friction factor, pole pairs

Constante de inércia H (s), coeficiente de atrito F (p.u.) e número de pares de pólos p .

7. Initial conditions

Desvio da velocidade inicial $d\omega$ (%), amplitude das correntes nas linhas i_a , i_b , i_c , ângulo das fases da corrente nas linhas p_{ha} , p_{hb} , p_{hc} e a tensão inicial do enrolamento de excitação V_f (p.u.). Estes parâmetros podem ser obtidos automaticamente, mediante a resolução do trânsito de potência para determinadas condições de operação da rede.

4.5 - Sistema de regulação de Tensão

O modelo do regulador de tensão utilizado é o modelo disponibilizado na biblioteca do *SimPowerSystems*. O modelo implementa um regulador de tensão IEEE tipo 1 (figura 4.5).

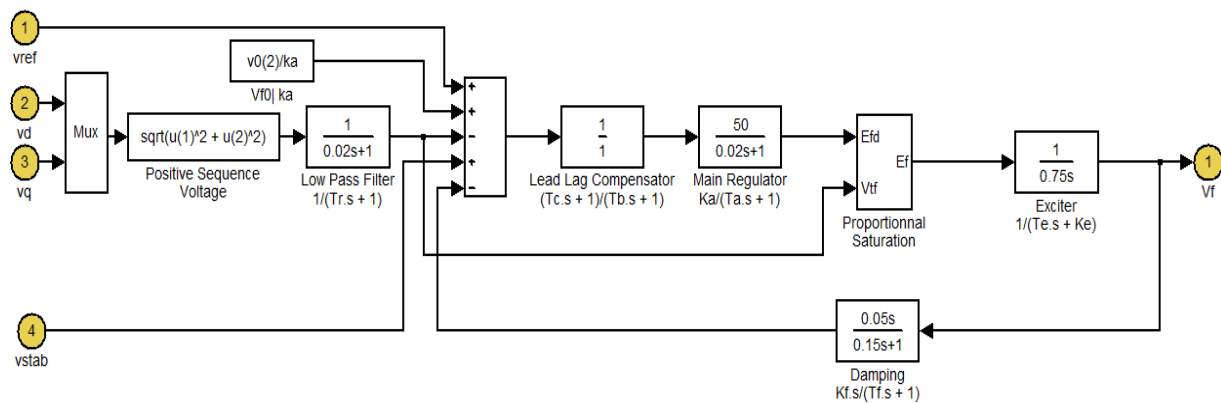


Figura 4.5 - Implementação do regulador de tensão IEEE tipo 1 [16]

A figura 4.6 ilustra os valores atribuídos a cada um dos parâmetros do regulador de tensão.

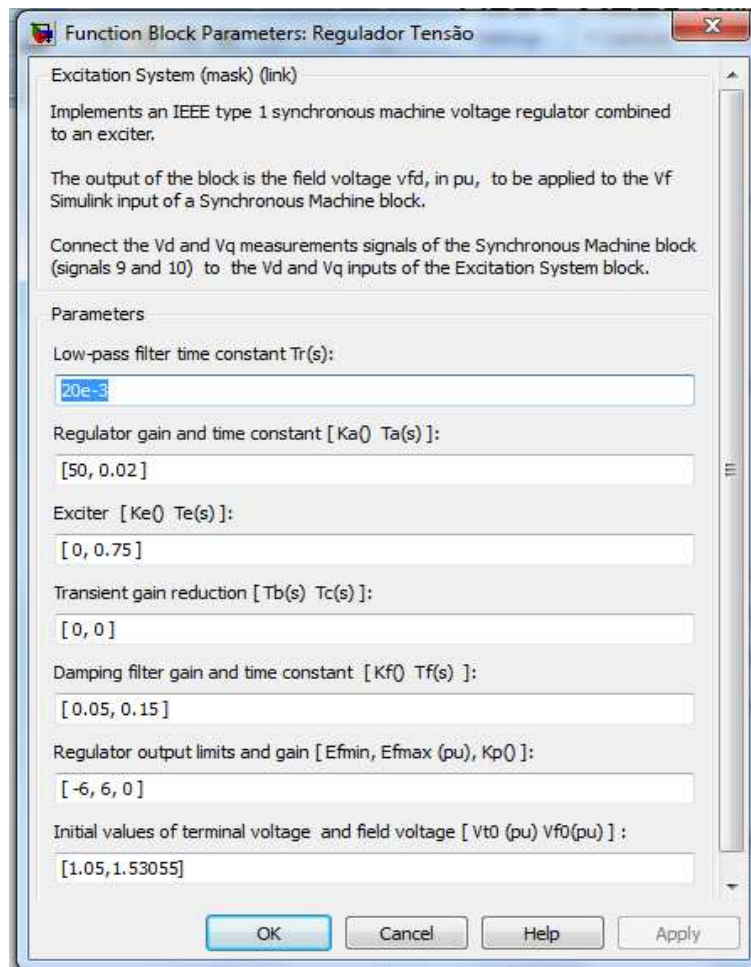


Figura 4.6 - Parâmetros do regulador de tensão

Cada um dos parâmetros do regulador de tensão tem o significado a seguir explicado:

1. *Low-pass filter time constant*

Constante de tempo T_r , em segundos, do sistema de primeira ordem que modeliza o transdutor de tensão aos terminais do estator da máquina.

2. *Regulator gain and time constant*

O ganho k_a e a constante de tempo T_a , em segundos, do sistema de primeira ordem modelizam o regulador principal.

3. *Exciter*

O ganho k_a e a constante de tempo T_e , em segundos, do sistema de primeira ordem modelizam o sistema de excitação.

4. *Transient gain reduction*

As constantes de tempo T_b e T_e , em segundos, do sistema de primeira ordem representam o compensador lead-lag.

5. *Damping filter gain time constant*

O ganho k_f e a constante de tempo T_f , em segundos, do sistema de primeira ordem modelizam o sistema de realimentação diferencial.

6. *Regulator output limits and gain*

A tensão à saída do regulador está limitada entre E_{fmax} e E_{fmin} . O limite superior, E_{fmax} , varia consoante o valor do ganho K_p . Se o ganho K_p for nulo o limite superior é constante e igual a E_{fmax} , caso contrário, se o ganho K_p for positivo o limite superior é variável e igual ao produto entre a tensão aos terminais do estator rectificada V_{tf} e o ganho K_p .

7. *Initial values of terminal voltage and field voltage*

V_{t0} (p.u.) e V_{f0} (p.u.) representam valores iniciais da tensão aos terminais do estator e a aplicada ao enrolamento de campo, respectivamente. Tal como para a máquina síncrona, o cálculo destas condições iniciais pode ser realizado automaticamente, após a resolução do problema de trânsito de potência para uma determinada configuração da rede.

4.6 - Parque Solar

O diagrama esquemático da implementação do modelo do parque solar no ambiente *Matlab/Simulink®* encontra-se representado na figura 4.7. O parque solar é constituído fundamentalmente por:

- Paine solar;
- Injector de potência.

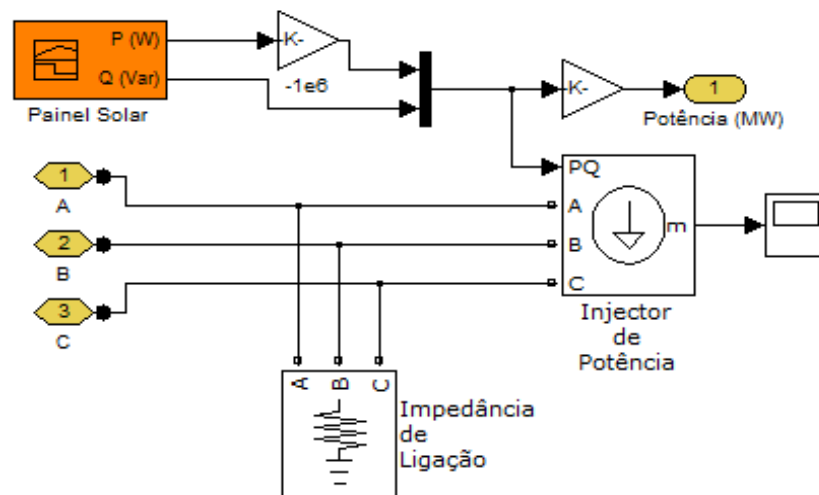


Figura 4.7 - Implementação do parque solar em ambiente **Matlab/Simulink®**

O bloco denominado por “painel solar” modeliza o comportamento do painel solar, de acordo com a modelização assumida no Capítulo 3. Toda a potência activa produzida pelo painel solar é injectada na rede com recurso ao injectador de potência. É ainda assumido que o parque solar funciona com factor de potência unitário.

O injectador de potência é representado por modelo não linear simulado por uma fonte de corrente. Tratando-se de uma fonte de corrente, em termos de implementação, este não pode ser conectado directamente à rede devido à presença de indutâncias em série com essa fonte de corrente. Assim, torna-se necessário ultrapassar esta situação, mediante a introdução de uma pequena carga resistiva em paralelo com o injectador de potência a fim de permitir a sua ligação à rede. A variação da potência produzida pelo parque solar é feita através da interface representado na figura 4.8.

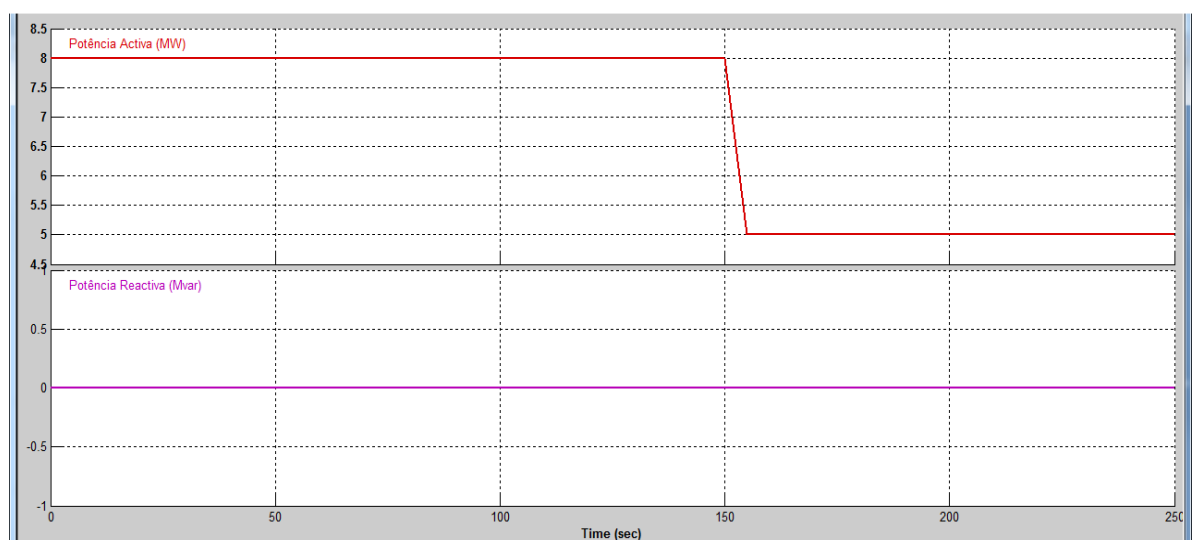


Figura 4.8 - Interface da configuração da potência produzida pelo parque solar em ambiente **Matlab/Simulink®**

4.7 - Parque Eólico

Na figura 4.9 encontra-se ilustrado o diagrama esquemático do parque eólico no ambiente *Matlab/Simulink*®. O parque eólico é constituído pelos seguintes componentes:

- Turbina eólica;
- Gerador assíncrono;
- Transformador;
- Bateria de condensadores;
- Bloco representativo da velocidade de vento (“Vento”).

O transformador que integra o modelo do parque eólico representa um equivalente eléctrico da totalidade de todos os transformadores presentes ao nível de cada turbina eólica.

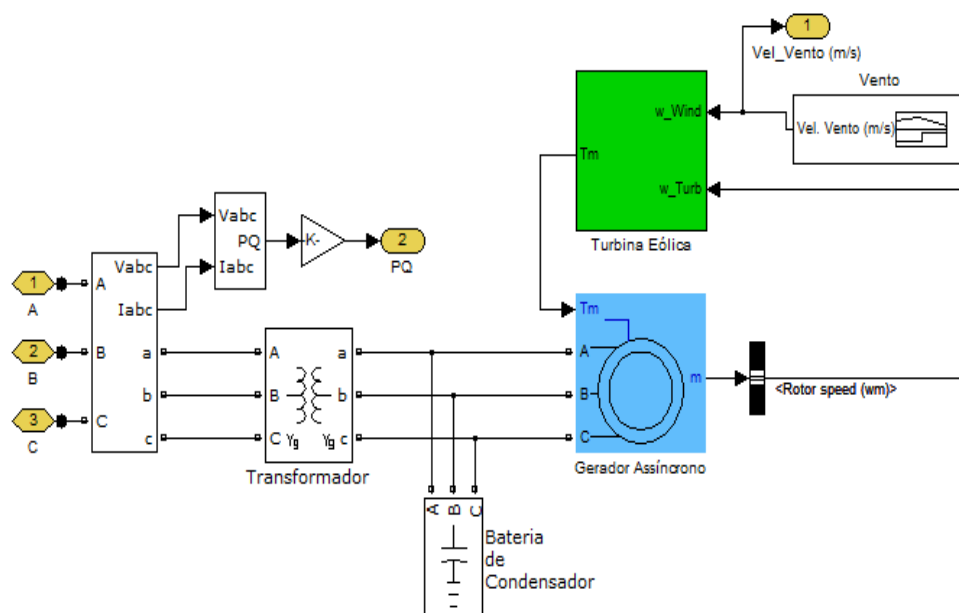


Figura 4.9 - Diagrama esquemático do parque eólico em ambiente *Matlab/Simulink*®

4.8 - Turbina eólica

O bloco “Turbina Eólica” é responsável pela conversão do sinal da velocidade do vento, proveniente do bloco “Vento”, no binário, representando assim as características de uma turbina eólica. A implementação da turbina eólica no ambiente *Matlab/Simulink*® encontra-se representada na figura 4.10.

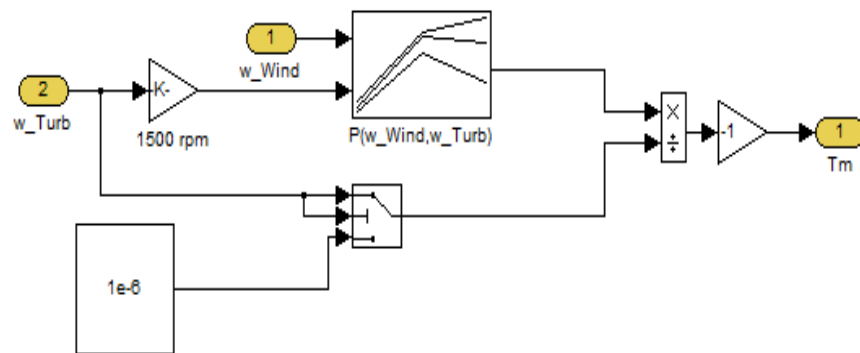


Figura 4.10 Implementação da turbina eólica em ambiente *Matlab/Simulink*®

No gráfico da figura 4.11 encontra-se representada a características mecânica da turbina parametrizada em função da velocidade do vento.

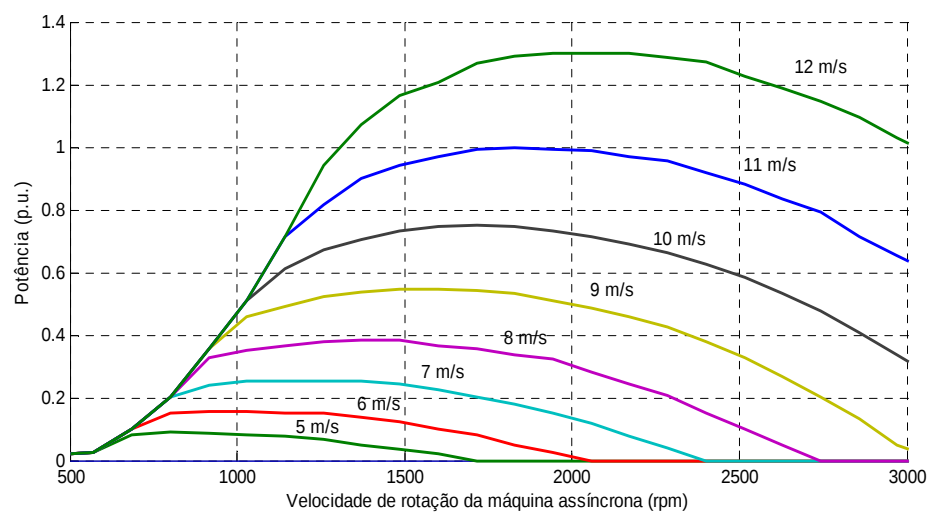


Figura 4.11 - Característica da turbina eólica

O binário aplicado à máquina assíncrona depende da variação da velocidade do vento. A variação da velocidade do vento no ambiente *Matlab/Simulink*® é feita recorrendo ao interface representado na figura 4.12.

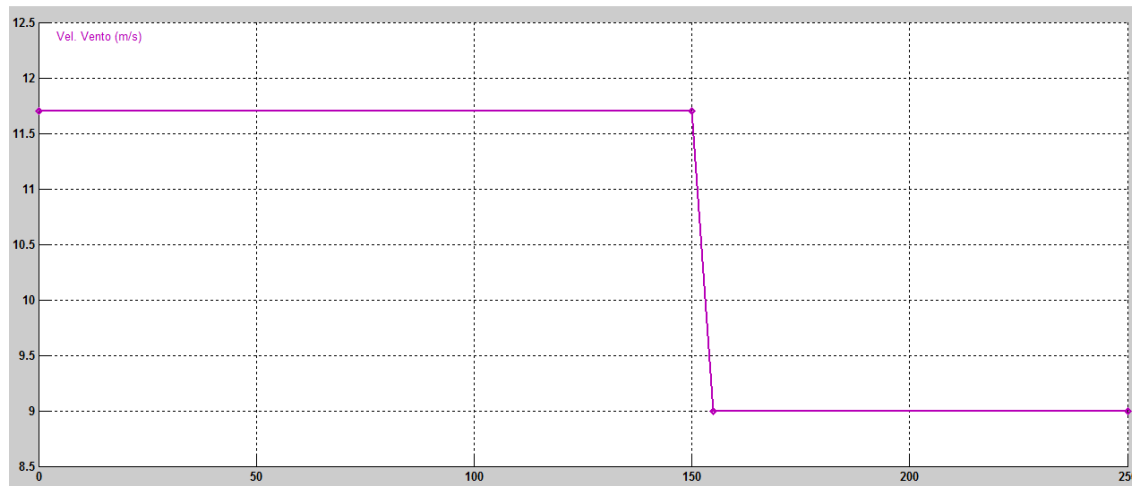


Figura 4.12 - Configuração da variação da velocidade do vento

4.9 - Máquina Assíncrona

É frequente o recurso aos geradores assíncronos para a conversão da energia mecânica no eixo do rotor em energia eléctrica, nos aproveitamentos eólicos. Como foi referido na secção 3.6 do capítulo 3 a máquina assíncrona é robusta, requer uma manutenção mínima, apresenta baixo custo e uma longa vida de operação. Quanto à configuração do rotor, estas máquinas classificadas em: máquinas de indução de rotor bobinado e máquinas de indução de rotor em gaiola de esquilo.

É de referir que o gerador utilizado neste trabalho para a conversão da energia mecânica em energia eléctrica é o gerador de indução equivalente com rotor em gaiola de esquilo, representando um equivalente eléctrico de um conjunto de geradores que podem estar a operar num determinado parque eólico.

Os parâmetros da máquina assíncrona são configurados através do interface que se segue (figura 4.13).

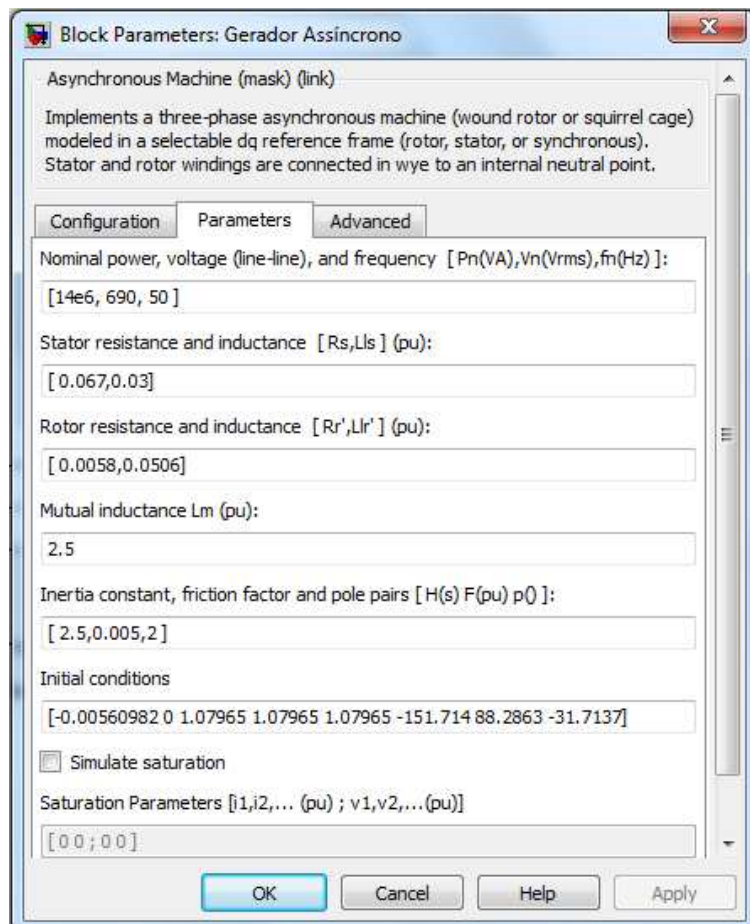


Figura 4.13 - Parâmetros da máquina assíncrona

As diferentes variáveis de caracterização da máquina assíncrona apresentam o seguinte significado:

1. Nominal power, voltage and frequency

Potência aparente nominal P_n (VA), tensão composta eficaz V_n (Vrms) e frequência nominal f_n (Hz).

2. Stator resistance and inductance

Resistência do estator R_s (p.u.) e indutância de fugas L_{ls} (p.u.).

3. Rotor resistance and inductance

Resistência do rotor R_r (p.u.) e indutância de fugas L_{lr} (p.u.).

4. Mutual inductance

Indutância mútua L_m (p.u.).

5. *Inertia constant, friction factor and pole pairs*

Constante de inércia H (s), coeficiente de atrito F (p.u.) e número de pares de pólos p .

6. *Initial conditions*

Parâmetros que permitem estabelecer a condição inicial da máquina.

7. *Saturation parameters*

Permite especificar a saturação do núcleo do estator e do rotor (não utilizado neste tipo de estudos).

4.10 - Volante de Inércia

O volante de inércia, cuja descrição e apresentação do modelo foi feito no capítulo 3, desempenha um papel muito importante devido ao seu contributo na estabilização da frequência da rede nos momentos subsequentes à ocorrência de uma perturbação. O seu modelo recebe como sinal de entrada o desvio da frequência e injecta na rede uma determinada quantidade de potência consoante o valor do desvio da frequência. O bloco que engloba o modelo do volante de inércia é mostrado na figura 4.14.

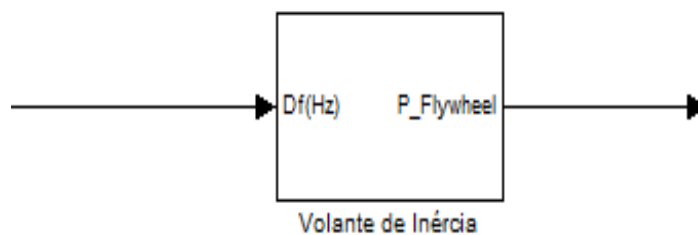


Figura 4.14 - Volante de inércia

No interior do bloco “Volante de Inércia” encontra-se o diagrama esquemático do mesmo no ambiente Matlab/Simulink® (figura 4.15).

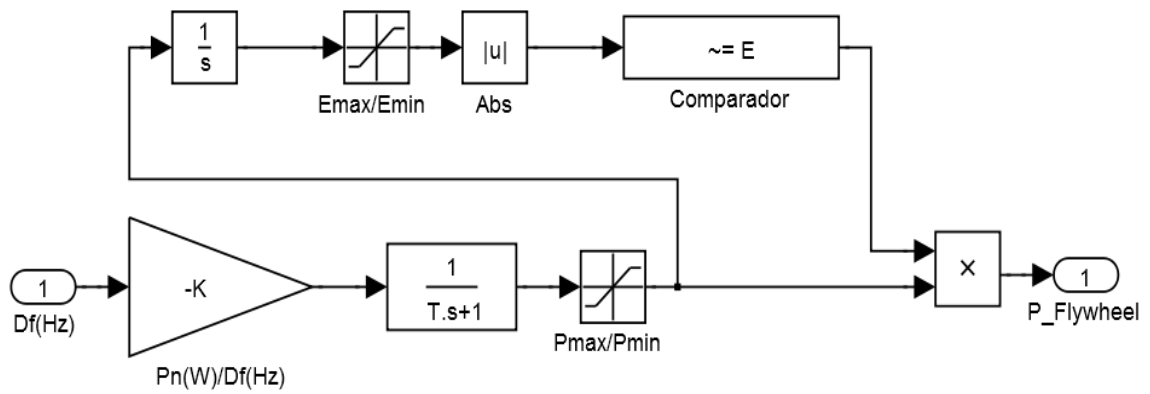


Figura 4.15 - Implementação do volante de inércia

A configuração dos parâmetros do volante de inércia é feita através da interface que está representado na figura 4.16.

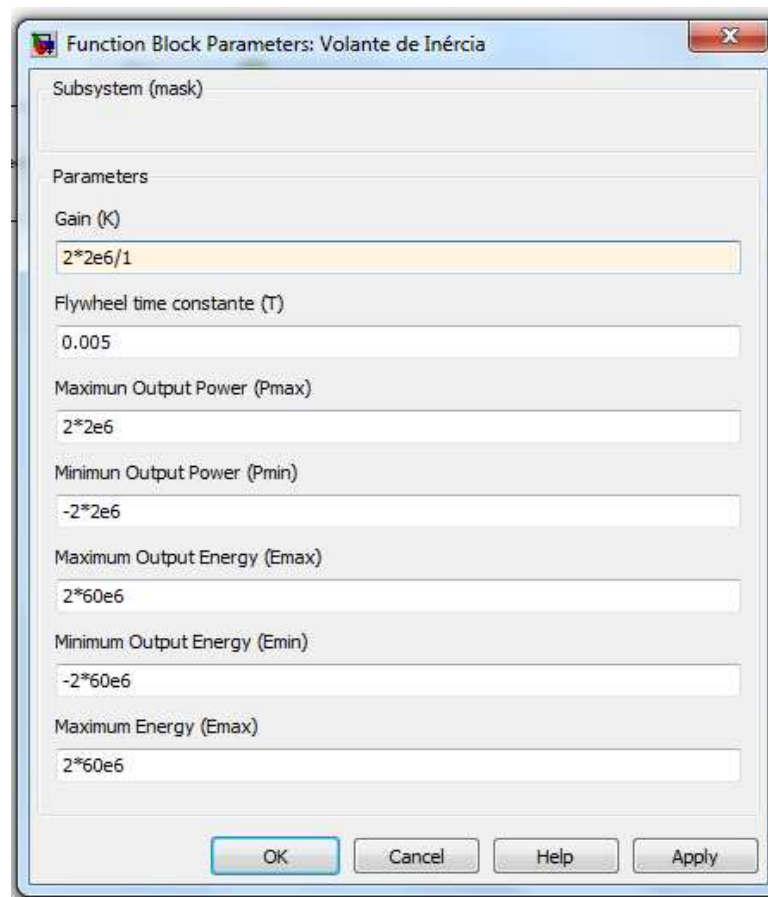


Figura 4.16 - Parâmetros do volante de inércia

As diferentes variáveis de caracterização do volante de inércia apresentam o seguinte significado:

1. *Gain*

Permite especificar o ganho (estatismo) do volante de inércia K (W/Hz).

2. *Flywheel time constant*

Constante de tempo do volante de inércia T (s).

3. *Maximum output power*

Potência máxima que o volante de inércia pode fornecer à rede $P_{\max}$ (W).

4. *Minimum output power*

Máxima potência que o volante de inércia é capaz de absorver da rede $P_{\min}$ (W).

5. *Maximum output Energy*

Energia máxima que o volante de inércia pode fornecer à rede $E_{\max}$ (Joule - J).

6. *Minimum output Energy*

Quantidade máxima de energia que o volante de inércia consome da rede $E_{\min}$ (Joule - J).

4.11 - Cargas

As cargas típicas do SEE apresentam características indutivas, e são especificadas pela potência activa e reactiva. A figura 4.17 ilustra a representação das cargas feita em ambiente Matlab/Simulink®.

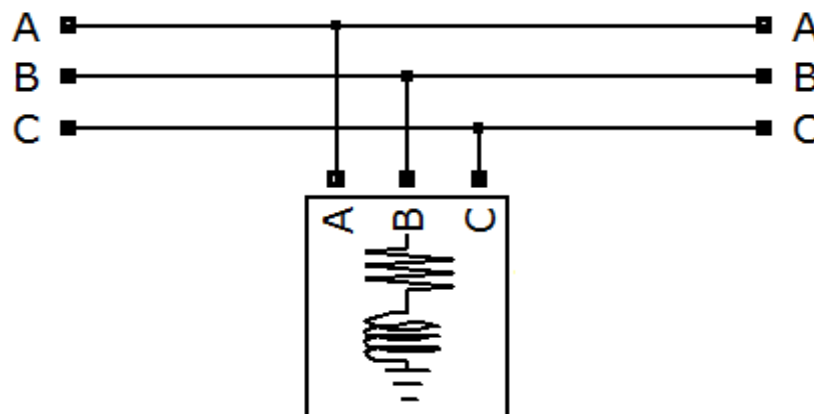


Figura 4.17 - Implementação das cargas

As cargas são configuradas através da interface gráfica ilustrado na figura 4.18.

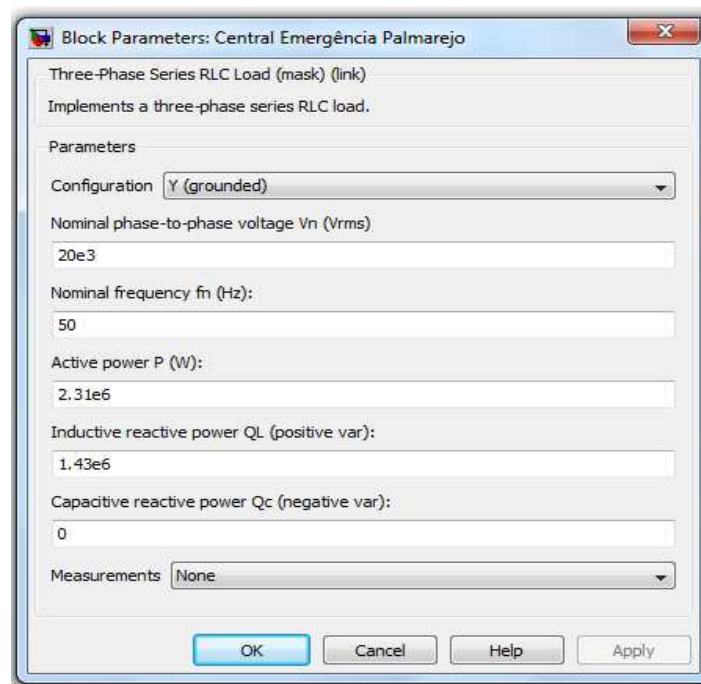


Figura 4.18 - Implementação das cargas

As diferentes variáveis de caracterização das cargas apresentam o seguinte significado:

1. *Nominal phase-to-phase voltage*

Especifica a tensão nominal composta eficaz V_n (Vrms).

2. *Nominal frequency*

Especifica a frequência nominal f_n (Hz).

3. *Active power*

Especifica a potência active P (W).

4. *Indutive reactive power*

Especifica potência reactiva indutiva Q_L (Var).

5. *Capacitive reactive power*

Especifica potência reactiva capacitiva Q_C (Var).

4.12 - Linhas de transmissão

As linhas de transmissão caracterizam-se pelas suas impedâncias. A sua implementação no ambiente **Matlab/Simulink®** é feito de acordo com a figura 4.19.

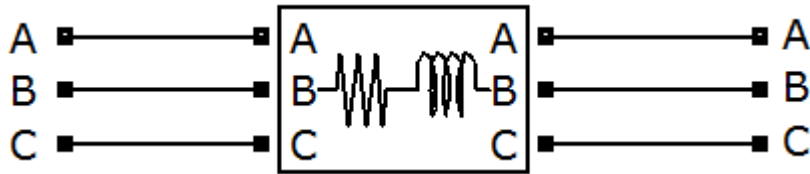


Figura 4.19 - Implementação das linhas de transmissão

As impedâncias das linhas, resistência R (Ω) e indutância L (H), são configurados através da interface gráfica ilustrada na figura 4.20. Importa salientar que a impedância que consta na figura que se segue diz respeito apenas à impedância da linha que liga o barramento 3 ao barramento 15, as impedâncias das restantes linhas serão colocados no anexo.

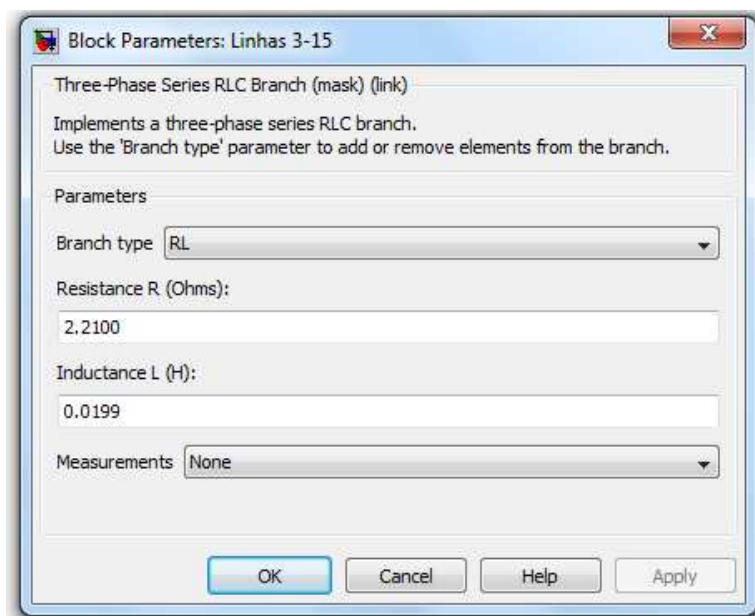


Figura 4.20 - Impedância das linhas de transmissão

As diferentes variáveis de caracterização das linhas de transmissão apresentam o seguinte significado:

1. *Branch type*

Especifica o tipo de ligação (RL neste caso).

2. *Resistance*

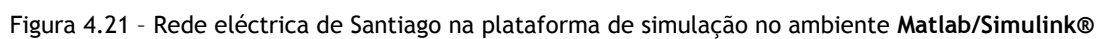
Especifica a resistência R (Ω) das linhas.

3. *Indutance*

Especifica a Indutância L (H) das linhas.

4.13 - Aspecto Geral da Rede Eléctrica de Santiago no Simulink (Plataforma de Simulação)

A agregação dos diferentes componentes modelizados no capítulo anterior, e cuja descrição detalhada de implementação foi apresentada neste capítulo constitui a plataforma de simulação no ambiente **Matlab/Simulink®** (figura 4.21) para o estudo do comportamento dinâmico do sistema eléctrico da ilha de Santiago.



4.14 - Sumário e conclusões

Neste capítulo foram descritos os detalhes de implementação dos modelos de simulação dos diferentes componentes da rede eléctrica descritos no Capítulo 3. Entre os modelos implementados pode-se destacar, pela importância que revelam neste estudo, as máquinas diesel e respectivo regulador de tensão, assíncronas, parque eólico e solar. A agregação desses modelos permitiu constituir uma plataforma de simulação de redes isoladas, que se caracteriza pela sua facilidade de implementação e adaptação a qualquer sistema de dimensão relativamente reduzida.

Capítulo 5

Impacto da Integração da PD de Origem Renovável na Rede Eléctrica de Santiago

5.1 - Introdução

Nos capítulos 3 e 4 procedeu-se à modelização de diversos componentes da rede eléctrica, bem como à sua integração de forma a ser construída uma plataforma de simulação de redes eléctricas isoladas com produção de origem renovável. Neste Capítulo, far-se-á uso da referida plataforma no sentido de se proceder à avaliação detalhada dos efeitos resultantes da integração de produção de origem renovável no sistema eléctrico da ilha de Santiago.

Este trabalho centra-se fundamentalmente na análise do comportamento dinâmico da rede em face de determinadas perturbações resultantes de perdas significativas da produção proveniente das fontes renováveis devido à variação da velocidade do vento e da radiação solar. Dar-se-á uma especial atenção ao comportamento da frequência da rede na presença da variação dos recursos renováveis. Procede-se ainda a uma avaliação do interesse da integração de unidades de armazenamento de energia do tipo volante de inércia para auxílio à estabilização do sistema em determinadas condições de operação.

Na secção 5.2 é feita uma breve descrição do sistema eléctrico da ilha de Santiago - Cabo Verde. A apresentação dos cenários e das perturbações consideradas nos diversos estudos é feita na secção 5.3, sendo que a apresentação dos resultados das simulações numéricas é feita na secção 5.4.

5.2 - Descrição do Sistema Eléctrico da Ilha de Santiago - Cabo Verde

A rede de transporte e distribuição de energia eléctrica da ilha de Santiago, operada pela ELECTRA, S.A.R.L - Empresa Pública de Electricidade e Água, é uma rede de dimensão reduzida, isolada, e constituída por várias “ilhas eléctricas”. Actualmente, existem na rede eléctrica da ilha de Santiago, seis pequenas centrais termoeléctricas, todas com a sua rede eléctrica independentes umas das outras, equipadas com geradores síncronos accionados por motores de combustão interna, totalizando cerca de 38,6 MW de potência instalada. Para além das centrais convencionais, encontra-se também em funcionamento um parque eólico com 0,9 MW de potência instalada. As seis centrais termoeléctricas estão geograficamente implantadas nos seguintes locais:

- Praia Gamboa (com uma potência instalada de 5 MW);
- Palmarejo (com a potência instalada de 26,04 MW);
- Assomada (com 3,85 MW de potência instalada);
- Ribeira da Barca (com 0,120 MW de potência instalada);
- Tarrafal (com a potência instalada de 1,360 MW);
- Santa Cruz (com 2,176 MW de potência instalada).

A título ilustrativo, encontra-se representado na figura 5.1, o mapa com a localização das seis centrais termoeléctricas da ilha de Santiago.



Figura 5.1 - Mapa da ilha de Santiago, com a localização das seis centrais termoeléctricas [19]

Está em curso um projecto que visa unificar toda a rede eléctrica de Santiago, eliminando desse modo todas as “ilhas eléctricas” existentes. O propósito desta tese é avaliar o impacto que integração da PD de origem renovável poderá causar nesta rede.

O parque electroprodutor desta nova rede, cuja previsão aponta para entrada em funcionamento no ano de 2012, é constituído por uma central eléctrica convencional, equipada com 6 geradores G1,G2,G3,G4,G5 e G6 (ver potência de cada gerador na tabela 5.1), sito em Palmarejo e dois parques renováveis, um solar (com uma potência instalada de 8 MW) e outro eólico (com 14 MW de potência instalada). A central eléctrica da Praia Gamboa deverá ser desactivada já em meados de 2011, com a entrada em funcionamento de mais dois grupos geradores (grupo G5 e G6) cada um com 10 MW de potência nominal na central de Palmarejo, sendo que as restantes centrais serão desactivadas posteriormente quando o projecto estiver concluído. O esquema unifilar da nova rede eléctrica da ilha de Santiago encontra-se ilustrado na figura 5.2.

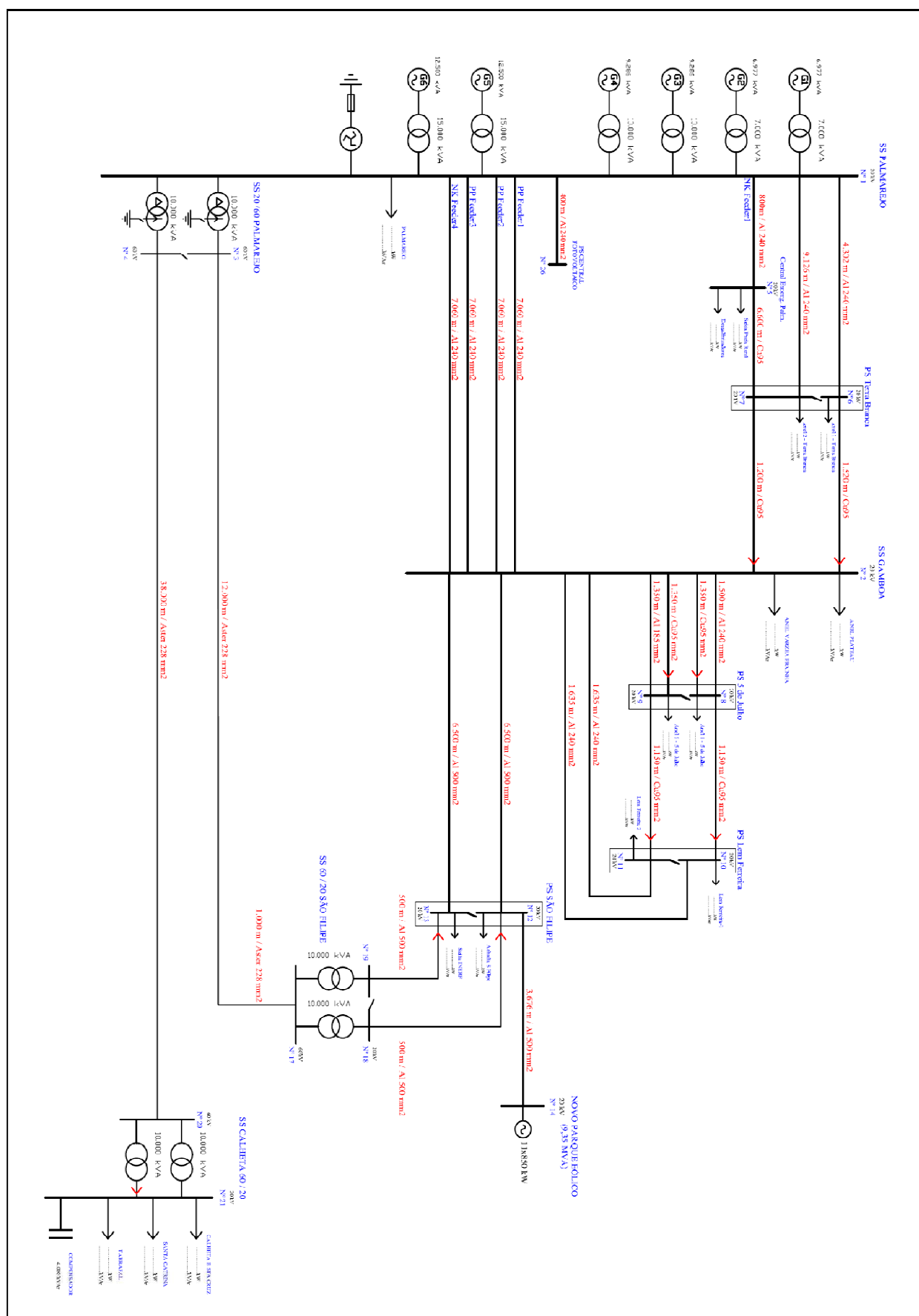


Figura 5.2 - Esquema unifilar da rede eléctrica de Santiago

5.3 - Definição dos cenários e das Perturbações

Nesta secção, será feito a descrição dos cenários de estudo e das perturbações a simular.

5.3.1 - Cenários de rede

Para o estudo e análise do efeito da integração da PD de origem renovável na rede eléctrica de Santiago foram definidos dois cenários base de estudo de acordo com a hora do dia e a variação das cargas:

- Cenário de vazio para o ano de 2012 (Carga = 25,09 MW);
- Cenário de ponta para o ano de 2012 (Carga = 39,44 MW).

A perturbação simulada no cenário de vazio para o ano 2012 conduziu a perda de estabilidade da frequência, pelo que surgiu a ideia de integrar na rede eléctrica o volante de inércia e avaliar o benefício que este traz ao sistema eléctrico. Assim surgiu mais um cenário de estudo, sendo-lhe atribuído a designação de:

- Cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia.

Em síntese e pela mesma ordem em que serão realizados os estudos, os cenários a serem analisados são:

- Cenário de vazio para o ano de 2012;
- Cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia;
- Cenário de ponta para o ano de 2012.

Foram escolhidos estes cenários de estudo, porque representam o comportamento da rede eléctrica nos momentos de maior e menor consumo (situações limite). São excelentes indicadores da robustez do sistema eléctrico, ou seja, se a rede for suficientemente robusta e capaz de aguentar certas perturbações nestes cenários também as aguenta noutros.

O cenário de vazio é caracterizado pelo reduzido nível de carga. Esta característica, aliada à injeção da produção eólica (solar = 0 no vazio, uma vez que o vazio ocorre à noite) conduz a um número reduzido de máquinas síncronas na rede, o que pode causar dificuldades de controlo/estabilização da rede em caso de perturbações devido ao reduzido valor da constante de inércia do sistema.

O cenário de ponta, apesar de ter maior nível de carga, está condicionado pela possibilidade de conjugação da produção eólica e solar, podendo igualmente trazer

problemas, uma vez que a integração de 22MW da produção renovável (14 MW de eólica e 8 MW de solar) é um valor elevado face à carga do sistema (39,44 MW), pois representa mais de 50% da carga.

Relativamente à operação da rede eléctrica da ilha de Santiago, importa referir que os relés de deslastre frequencimétrico dos geradores se encontram parametrizados para desvios de 2 Hz durante 2 segundos. Dos dados que são conhecidos do sistema, não se refere a existência de deslastre frequencimétrico de carga. Numa perspectiva defensiva, assume-se então como critério de segurança obter desvios de frequência não superiores a 1.5 Hz na sequência da ocorrência das perturbações que seguidamente são definidas. Na prática isto quer dizer que a variação do recurso renovável pode provocar uma queda de frequência na rede para valor mínimo de 48,5 Hz. No entanto, se a frequência da rede baixar para valores inferiores a 48,5Hz, considerar-se-á um cenário crítico em termos de operação e segurança da rede.

Relativamente ao despacho dos geradores (ver tabela 5.2), este foi feito com base na seguinte regra:

- Garantir uma reserva girante mínima de 15% a 20% por cada gerador em serviço;
- Os grupos diesel entram em serviço por ordem inversa da antiguidade (tabela 5.1).

Segundo dados da ELECTRA S.A.R.L, os geradores uma vez em funcionamento têm que respeitar o mínimo técnico, ou seja, os geradores terão que produzir no mínimo cerca de 50% da sua potência nominal (ver tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Valores nominais, mínimos técnicos e ano de entrada em serviço de cada gerador.

Geradores	Potência Nominal (MW)	Mínimo Técnico (MW)	Ano de Entrada serviço
G1	5.582	2.791	2002
G2	5.582	2.791	2002
G3	7.437	3.718	2008
G4	7.437	3.718	2008
G5	10.000	5.000	2011
G6	10.000	5.000	2011

Tabela 5.2 - Nível de produção renovável, despacho dos geradores convencionais e reserva do sistema.

Cenário de Estudo	Nível de carga (MW)	Produção Renovável (MW)		Produção Convencional (MW)						Reserva Girante (MW)
		Eólica	Solar	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
Vazio 2012	25.09	14	0	-	-	-	-	5.59	5.5	8.91
Ponta 2012	39.44	14	8	-	-	3.718	3.718	5	5	17.438

Partiu-se do princípio que tanto o parque eólico como o parque solar estarão a produzir valores de potência muito próximo da potência instalada, devido as óptimas condições do vento e sol que se verificam em Cabo Verde.

5.3.2 - Perturbações

Para cada um dos cenários definidos, foram simuladas perturbações, que consistem na variação dos recursos renováveis.

No cenário de vazio para o ano de 2012 foi simulada a seguinte perturbação (ver figura 5.3 e 5.4):

- Variação da velocidade do vento em 28% (11,7 m/s para 8,4 m/s), traduzindo-se numa variação de produção da potência activa do parque eólico que ronda os 60% (de 14 MW para 5,5 MW em 5 segundos).

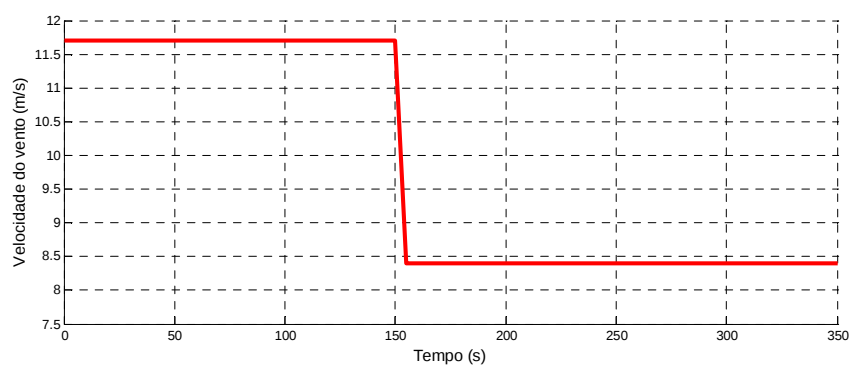


Figura 5.3 - Variação da velocidade do vento em 28% no parque eólico

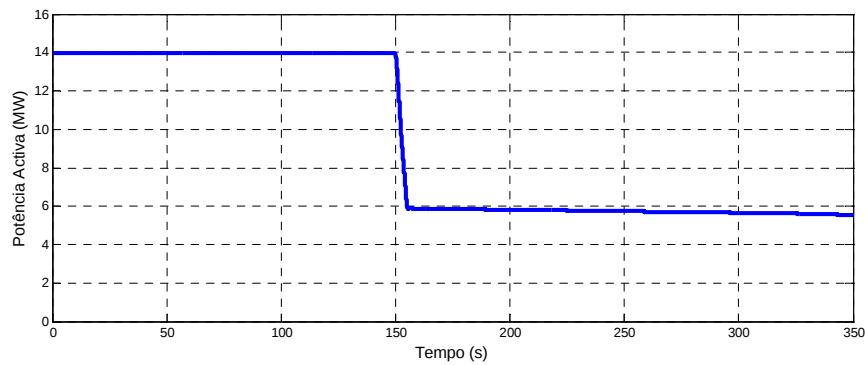


Figura 5.4 - Variação da potência activa prevista devido à variação da velocidade do vento em 28%

As perturbações simuladas no cenário de ponta para o ano de 2012 são as que se seguem (ver as figuras 5.5, 5.6 e 5.7):

- Variação da velocidade do vento em 36% (11,7 m/s para 7,5 m/s) correspondendo a uma variação de produção do parque eólico em cerca de 71% da sua potência instalada (14 MW para 4 MW em 5 segundos);
- Variação da produção do parque solar em 75% da sua potência instalada (8 MW para 2 MW em 5 segundos) devido à passagem de uma nuvem, reduzindo assim a radiação solar incidente.

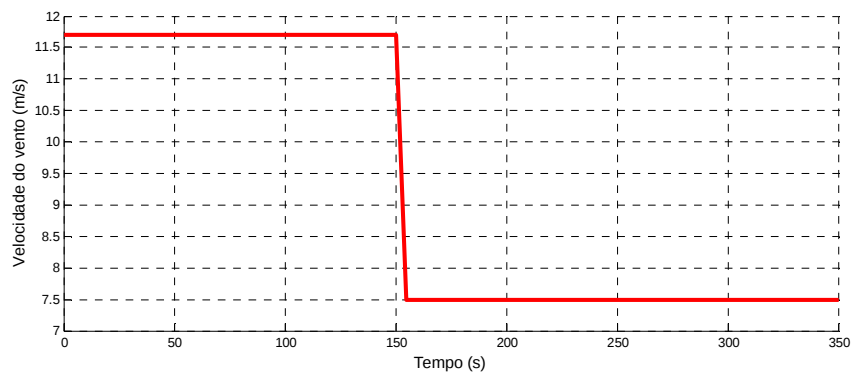


Figura 5.5 - Variação da velocidade do vento em 36% no parque eólico

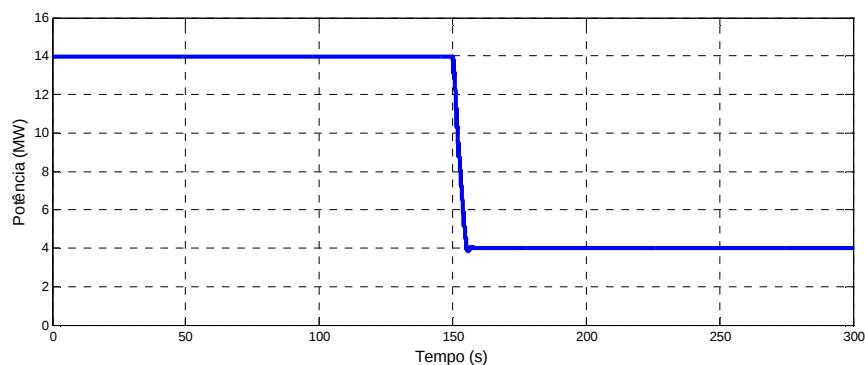


Figura 5.6 - Variação da potência activa esperada devido à variação da velocidade do vento em 36%

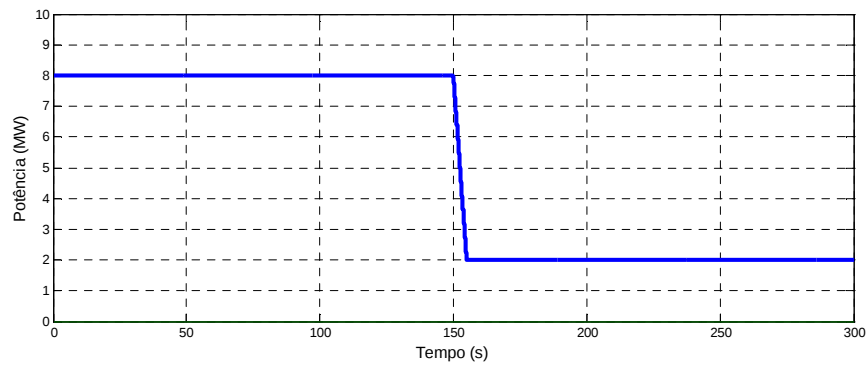


Figura 5.7 - Variação da potência activa produzida pelo parque solar

5.4 - Resultados das simulações

Nesta secção, serão apresentados os resultados do estudo dos cenários descritos na secção anterior para as perturbações descritas. Após a apresentação de cada um dos três cenários estudados, será feita uma conclusão sucinta quanto aos resultados obtidos.

5.4.1 - Cenário de vazio para o ano de 2012

O cenário de vazio para o ano de 2012, corresponde ao cenário em que a potência da carga a ser alimentado é de 25,09 MW (com 15,38 Mvar de potência reactiva). Para satisfazer o consumo neste cenário foram postos em serviço duas máquinas convencionais G5 e G6 e o parque eólico, atribuindo a cada um deles um despacho de acordo com a tabela 5.2. A redução aos 150 s da potência eléctrica produzida pelo parque eólico (de 14 MW para 5,8 MW em 5 s) devido à variação da velocidade do vento (11,7 m/s para 8,4 m/s) provoca alteração nas mais variadas grandezas do sistema.

A figura 5.8 mostra a variação da frequência da rede devido à variação da velocidade do vento, e consequentemente a perda de parcela significativas da produção no parque. A monitorização da variação da frequência revela uma importância suprema nesta dissertação, pois é variável que condiciona a injeção da PD de origem renovável na rede.

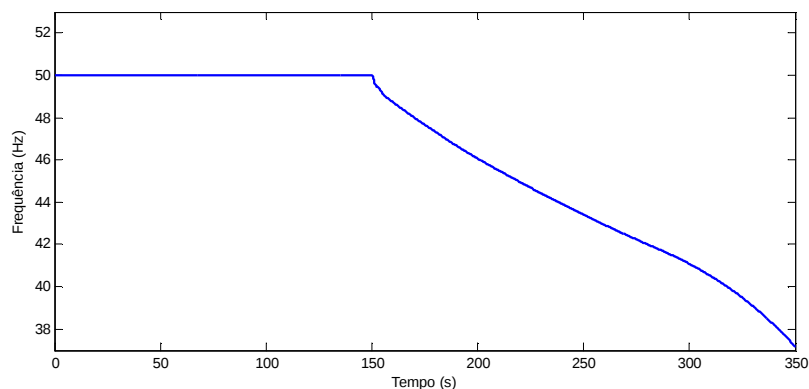


Figura 5.8 - Variação da frequência do sistema

Analisando o gráfico em cima (Figura 5.8), verifica-se que a frequência da rede baixa para um valor mínimo muito inferior a 48,5 Hz, significando que, para este cenário de estudo, o sistema eléctrico da ilha de Santiago não suporta a perda de 8,8 MW da potência, pois tendo em consideração as perdas na rede, esta potência é praticamente igual à reserva girante do sistema.

No gráfico da figura 5.9 está ilustrada a variação da produção da potência activa e o consumo da potência reactiva pelo parque eólico. É notória a diferença da produção do parque eólico no período pré e pós-perturbação. No período pré-perturbação o parque eólico estava a produzir 14 MW da potência activa e a consumir cerca de 4 Mvar de reactiva. A variação da velocidade do vento fez com que a produção da potência activa passasse para 5,8 MW e o consumo de reactiva para 3 Mvar. A redução do recurso primário provoca não só a diminuição da potência activa produzida pelo parque como também a diminuição da potência reactiva consumida pelo mesmo, pois há um compromisso entre a potência activa produzida e reactiva consumida.

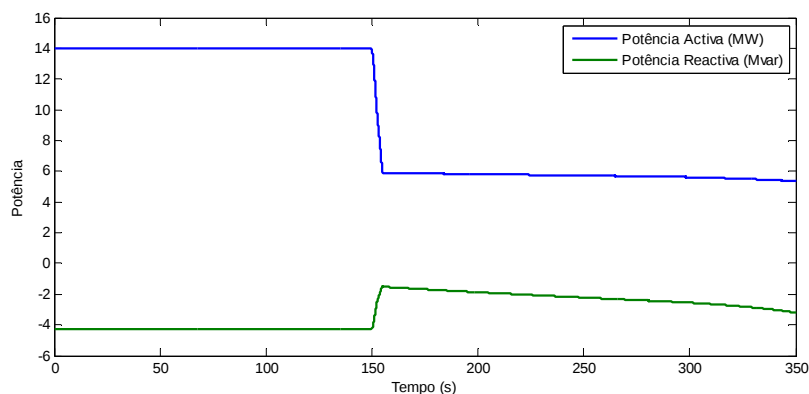


Figura 5.9 - Potência activa e reactiva produzida pelos aerogeradores

Os gráficos das figuras 5.10 e 5.11 mostram a resposta dos geradores das centrais convencionais, à perturbação no parque eólico. Observe-se que tanto o gerador G5 como o

gerador G6 apresentam, para $t = 150$ s, um aumento na produção da potência activa e uma diminuição na produção da potência reactiva, devido à necessidade de compensar a potência perdida pelo parque. O aumento da produção da potência activa está relacionado com perda de produção do parque eólico e com a necessidade de colmatar esta perda para garantir a estabilidade do sistema, enquanto a quebra na produção da potência reactiva deve-se ao facto das máquinas assíncronas do parque eólico estarem a produzir pouca potência activa e por conseguinte necessitarem de menos energia reactiva.

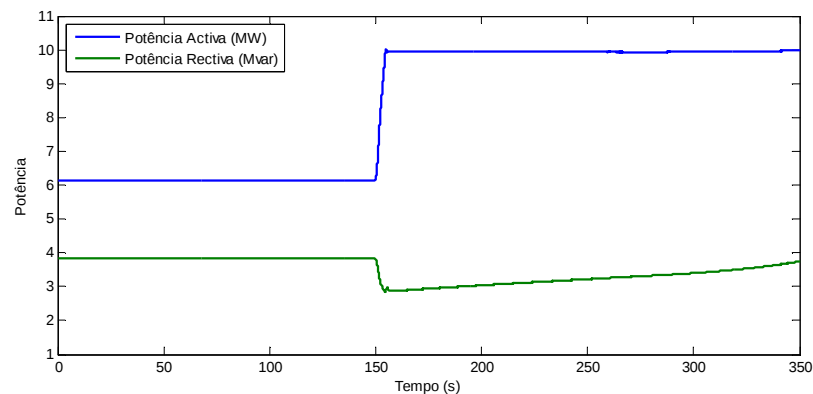


Figura 5.10 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G5

O gerador G5 (figura 5.10) que estava a produzir cerca de 6,3 MW antes da perturbação passou a produzir 10 MW (limite da sua capacidade), relativamente à potência reactiva este passou duma produção de 3,7 Mvar para cerca de 3 Mvar aos 150 s.

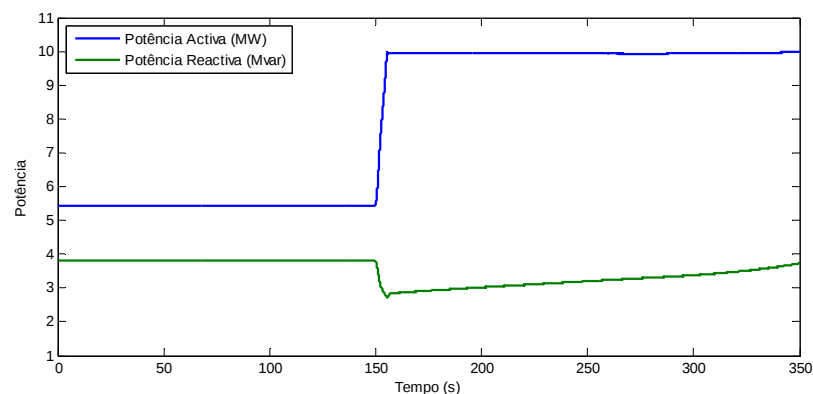


Figura 5.11 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G6

O gerador G6 (figura 5.11) passou duma produção de 5,5 MW da potência activa para 10 MW (limite da sua capacidade), sendo que a produção da potência reactiva passou de 3,7 Mvar para 2,9 Mvar aos 150 s.

O gráfico da figura 5.12 mostra a variação da tensão aos terminais dos geradores do parque eólico.

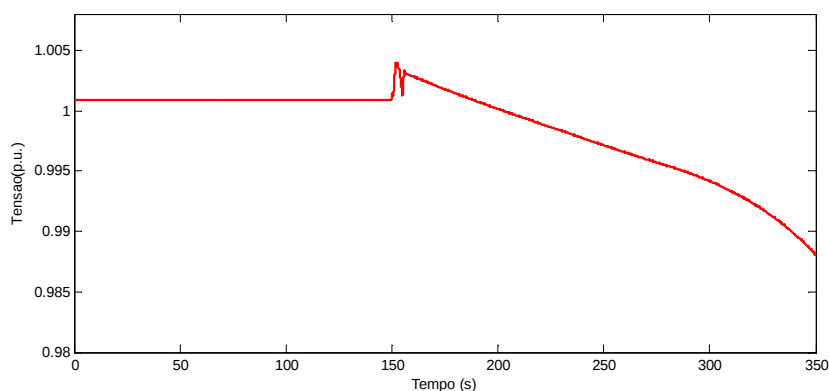


Figura 5.12 - Tensão aos terminais dos aerogeradores

Analisando o gráfico anterior, pode-se constatar que antes da ocorrência da perturbação as tensões aos terminais dos geradores do parque eólico encontravam-se próximas de 1 p.u.. No instante em que ocorreu a perturbação deu-se um ligeiro aumento no valor das tensões seguido de uma queda progressiva, denunciando a severidade da perturbação para o sistema eléctrico.

5.4.2 - Cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia

Este cenário de estudo é em todo semelhante ao cenário anterior, a única diferença reside no facto de neste cenário estar inserido na rede o volante de inércia (sistema de armazenamento de energia), cuja finalidade é contribuir para a redução do desvio da frequência nos instantes imediatamente após a perturbação e consequentemente para uma maior estabilidade da rede.

O volante de inércia utilizado neste estudo tem uma potência nominal de 4 MW e um tempo de carga/descarga de 30 s (120 MJ).

No gráfico da figura 5.13 está ilustrada a variação da frequência do sistema. O valor mínimo da frequência da rede para este cenário de estudo no instante da ocorrência da perturbação é de cerca de 49,3 Hz, graças à contribuição do volante de inércia. Em termos comparativos este cenário conduz a melhores resultados que o cenário anterior, pois a contribuição do volante de inércia (injectando potência activa na rede) fez com que no instante da perturbação, $t = 150$ s, o desvio da frequência não fosse tão acentuado a ponto de provocar instabilidade no sistema. Note-se que a perda de estabilidade só veio a acontecer cerca de 150 s mais tarde (devido à descarga do volante de inércia), tempo suficiente para que as máquinas que se encontram desligadas entrem em serviço, pois trata-se de máquinas com tempo de arranque na ordem de dezenas de segundos.

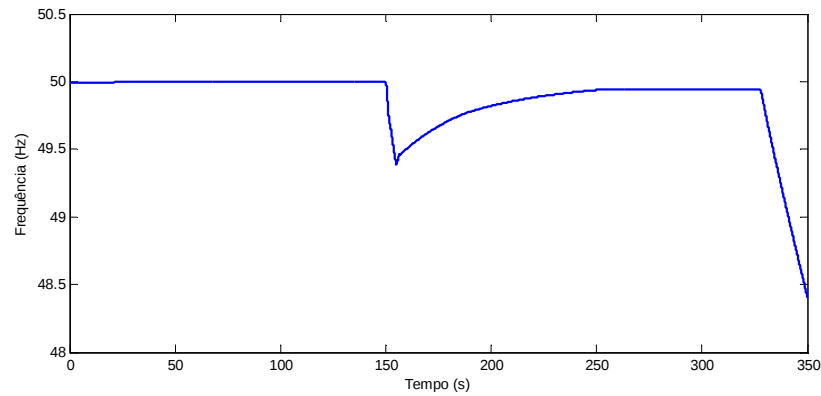


Figura 5.13 - Variação da frequência do sistema com volante de inércia

No gráfico da figura 5.14 encontra-se ilustrado a potência activa produzida e a reactiva consumida pelo parque eólico. Devido à ocorrência da perturbação (diminuição da velocidade do vento) a potência activa produzida pelo parque eólico teve uma redução de cerca de 57% (14 MW para 6 MW) e consequentemente houve uma redução no consumo da potência reactiva de cerca de 2 Mvar (4 Mvar para 2 Mvar).

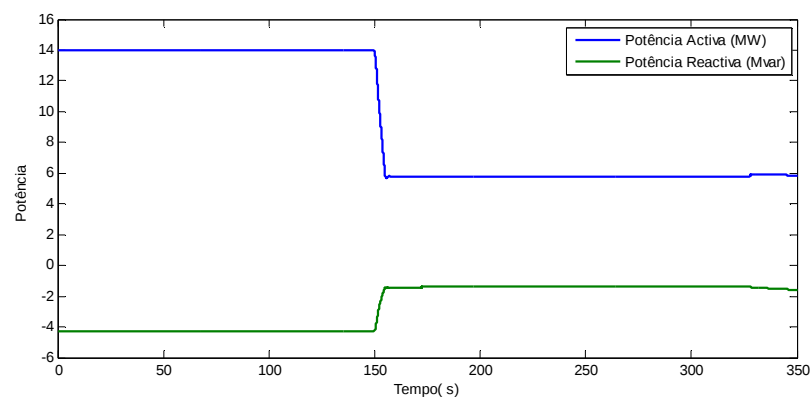


Figura 5.14 - Potência activa e reactiva produzida pelos aerogeradores com volante de inércia

Nas figuras 5.15 e 5.16 estão representados os gráficos da potência activa e reactiva produzidas pelos geradores G5 e G6.

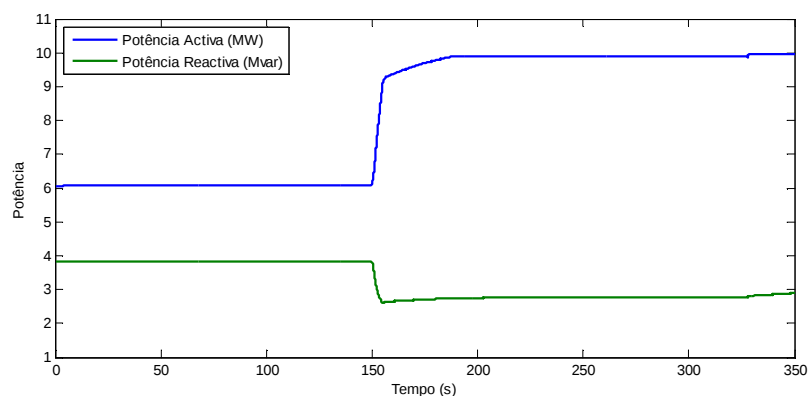


Figura 5.15 - Potência activa e reactiva produzida pelo G5 com volante de inércia

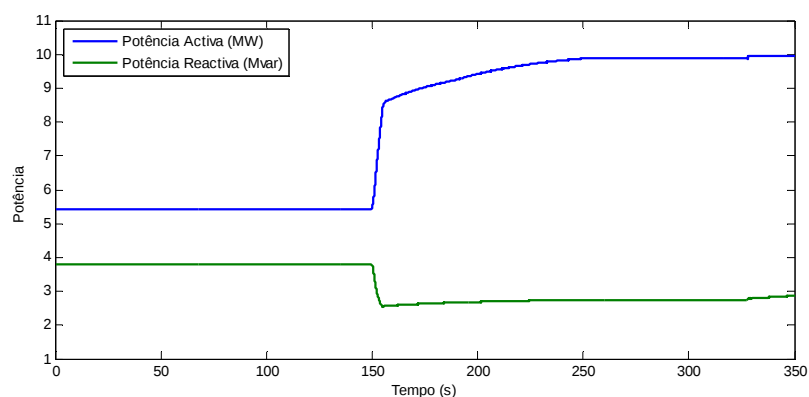


Figura 5.16 - Potência activa e reactiva produzida pelo G6 com volante de inércia

No instante $t = 150$ s, devido à perda de 8 MW de produção proveniente do parque eólico, os dois geradores (G5 e G6) tiveram que aumentar as suas produções da potência activa para garantir a continuidade de serviço. Neste cenário, o incremento da produção por parte dos geradores convencionais no instante imediatamente a seguir à perturbação é feito duma forma “suave”, conforme se vê nas curvas da potência activa dos gráficos das figuras 5.15 e 5.16. Este facto explica-se pela presença do volante de inércia na rede, pois no instante da perturbação, este contribuiu com uma quantidade significativa da potência activa, evitando assim que houvesse um aumento brusco da produção por parte dos geradores convencionais.

Na figura 5.17 encontra-se representado o gráfico que ilustra a quantidade da potência activa injectada na rede pelo volante de inércia aquando da perturbação. O volante de inércia participa na regulação de frequência do sistema através de injeção na rede da potência disponível, enquanto as máquinas de reserva estática não entrarem em serviço.

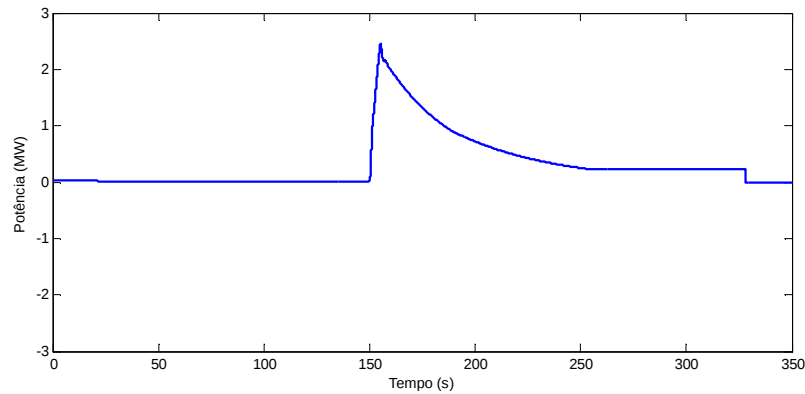


Figura 5.17 - Potência produzida pelo volante de inércia

Como já foi referido, o volante de inércia utilizado neste trabalho tem uma potência nominal de 4 MW e um tempo de carga/descarga de 30s. Pela análise do gráfico anterior, verifica-se que no instante imediatamente após a ocorrência da perturbação o volante de inércia injectou na rede cerca de 2,5 MW de potência, evitando desse modo que valor mínimo da frequência fosse inferior a 49,3 Hz.

Na figura 5.18 encontra-se representado o gráfico das tensões aos terminais dos geradores do parque eólico. Note-se que no instante da ocorrência da perturbação houve um pico de tensões, de valor residual, aos terminais dos geradores acabando por diminuir nos instantes posteriores, tendo uma queda acentuada aos 320 s, altura em que o volante de inércia deixou de injectar a potência na rede por se encontrar descarregado.

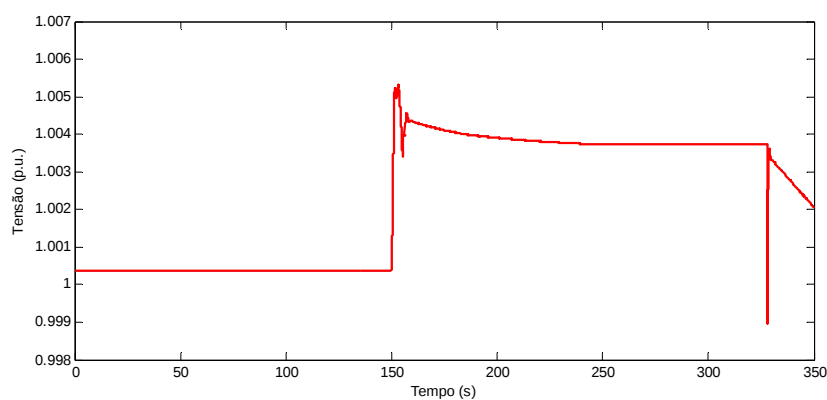


Figura 5.18 - Tensão aos terminais dos aerogeradores com volante de inércia

5.4.3 - Cenário de ponta para o ano de 2012

O cenário de ponta para o ano de 2012, corresponde ao cenário em que a potência da carga a ser alimentado é de 39,44 MW (com 24,29 Mvar de potência reactiva). Este cenário difere dos dois cenários anteriores não só por ter uma carga mais elevada a alimentar, mas também pelo facto de apresentar mais geradores convencionais em serviço, de dois G5 e G6 (nos cenários das secções 5.4.1 e 5.4.2), para quatro (G3, G4, G5 e G6) e consequentemente apresentar uma maior reserva girante (17,438 MW) e constante de inércia (ver tabela 5.1).

Pela análise do gráfico da figura 5.19, depreende-se que do ponto de vista da integração da PD na rede, este cenário é perfeitamente aceitável, visto que com a perda de 16 MW de potência devido à intermitência do recurso renovável, o sistema foi capaz de manter a sua frequência dentro dos valores aceitáveis, ou seja, superior aos 48,5 definidos como limite mínimo.

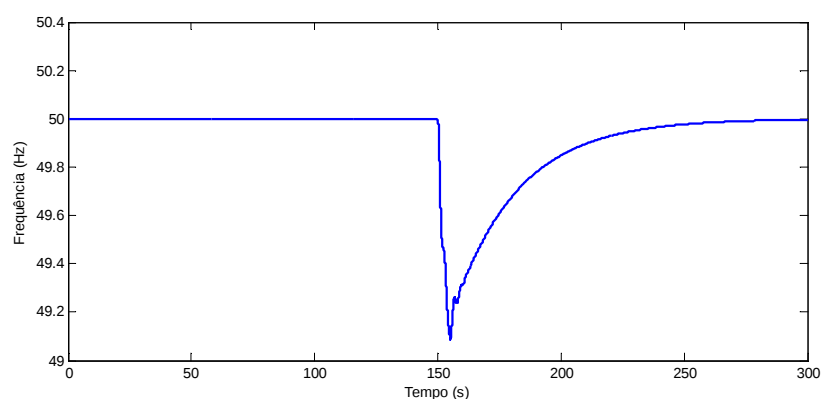


Figura 5.19 - Variação da frequência do sistema

Nos gráficos das figuras 5.20 e 5.21 pode-se ver a potência produzida pelo parque eólico e parque solar, respectivamente. Note-se que a potência produzida por ambos vai ao encontro das perturbações que foram simuladas, ou seja, houve uma queda de produção, em 5 s, de 14 MW para 4 MW no parque eólico e 8 MW para 2 MW no parque solar, totalizando uma perda e produção global de 16 MW.

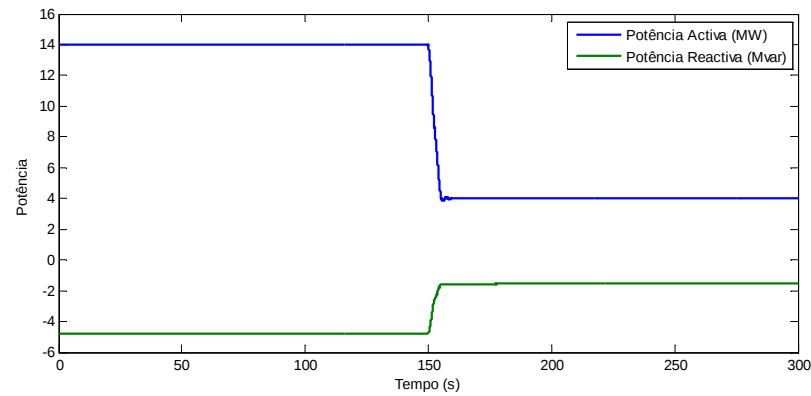


Figura 5.20 - Potência activa e reactiva produzida pelos aerogeradores

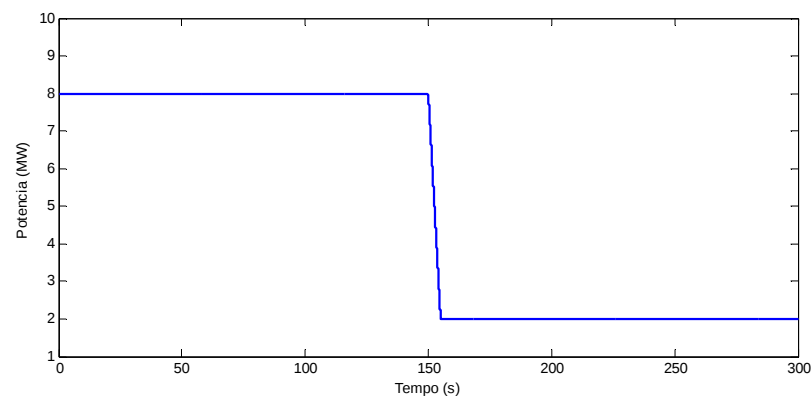


Figura 5.21 - Potência activa produzida pelo parque solar

Nas figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 encontram-se representados as potências activas e reactivas produzidas pelas quatro máquinas convencionais (G3, G4, G5 e G6). No instante da ocorrência da perturbação, $t = 150$ s, as quatro máquinas tiveram que aumentar as suas produções para compensar a queda de produção ocorrido nos parques eólico e solar.

Os geradores G5 e G6, por serem máquinas de maior potência ($P_n = 10$ MW), foram os que mais contribuíram para compensar a perda de capacidade de produção dos parques devido à indisponibilidade do recurso primário. Os geradores G3 e G4 tiveram, de igual modo, um contributo importante na garantia de continuidade de serviço, mas injectando menos volume de potência na rede.

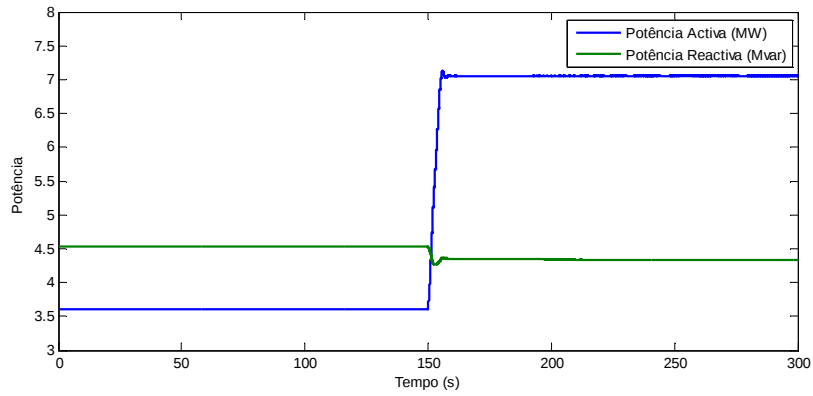


Figura 5.22 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G3

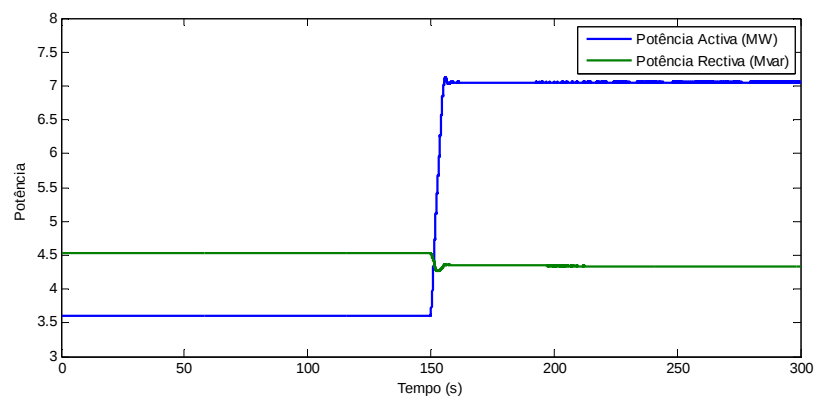


Figura 5.23 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G4

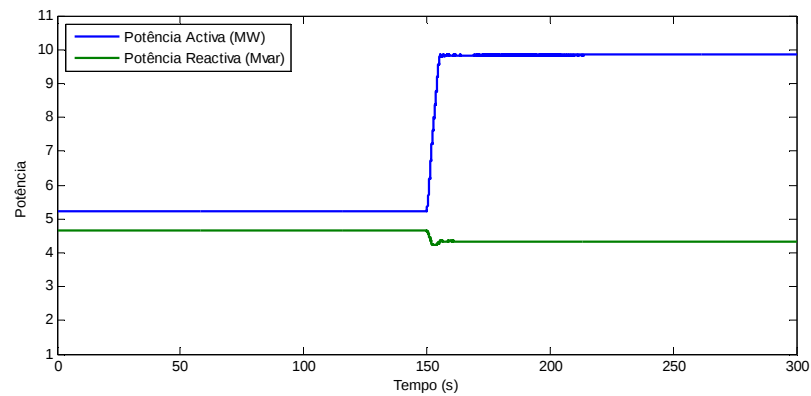


Figura 5.24 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G5

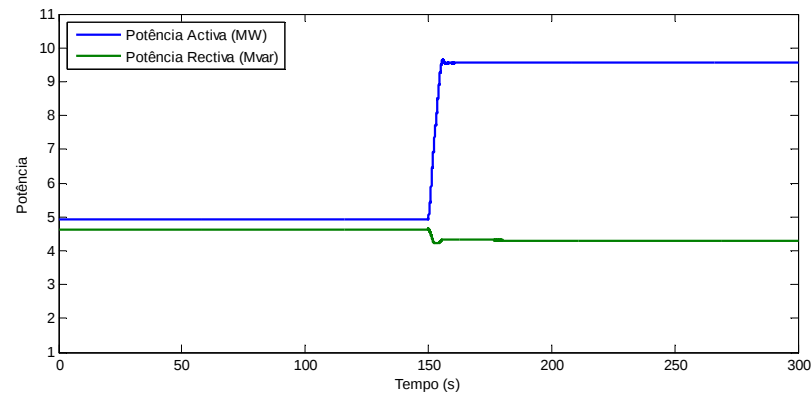


Figura 5.25 - Potência activa e reactiva produzida pelo gerador G6

O gráfico da figura 5.26 ilustra o comportamento das tensões aos terminais dos geradores do parque eólico.

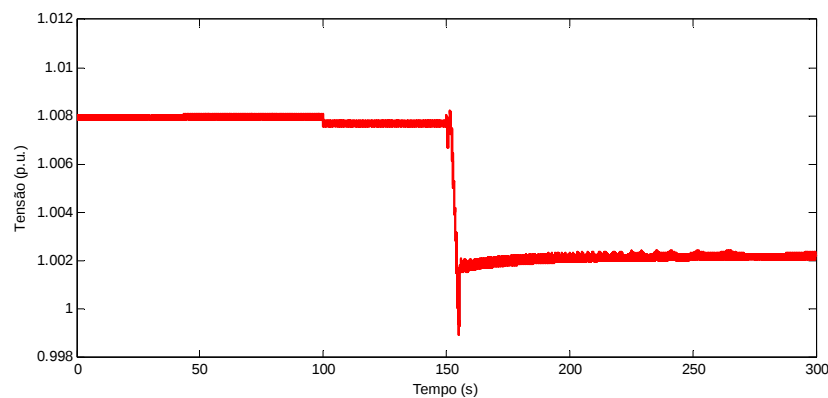


Figura 5.26 - Tensão aos terminais dos aerogeradores

Após a ocorrência de perturbação, aos 150 s, houve uma queda de tensão aos terminais dos geradores do parque eólico (figura 5.26), devido ao fraco desacoplamento entre a tensão e a potência activa e a não predominância da reactância sobre a resistência na rede eléctrica de Santiago. Estas características aliada à perda de quantidades significativa de produção da potência activa provocou a queda de tensão aos terminais dos geradores no instante da perturbação.

5.5 - Sumário e Conclusões

A avaliação do impacto da integração da PD de origem renovável na rede eléctrica de Santiago foi orientada numa perspectiva de assegurar que o sistema apresente condições de estabilidade na sequência de perturbações críticas que podem resultar de variações do recurso renovável. Dadas as características da rede, quer em termos da sua extensão, quer em termos de carga, não foi considerado o estudo do seu comportamento em condições de curto-circuito, uma vez que são situações extremas onde se poderão sobrepor efeitos de

perda de produção renovável por actuação de protecções de mínimo de tensão, bem como as oscilações naturais das máquinas resultantes da variação da potência eléctrica que ocorre num curto-circuito. Nesse caso, é espectável que não seja viável a garantia de condições de estabilidade à rede. Desta forma, o estudo incidiu essencialmente sobre condições de operação críticas resultantes da variação de recurso renovável.

Atendendo aos cenários e às perturbações definidos para a rede eléctrica de Santiago foram avaliados o impacto que estes podem causar na mesma. Foram analisadas as seguintes grandezas: frequência da rede, tensões aos terminais dos aerogeradores, potência produzida pelos parques eólico e solar, potência produzida pelos geradores convencionais e volante de inércia.

Conclui-se que, do ponto de vista técnico, as perturbações simuladas para o cenário de vazio para o ano de 2012 conduz à perda imediata (aos 150 s) da estabilidade de frequência, pois o desvio de frequência é bastante inferior aos 48,5 Hz.

As perturbações simuladas para o cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia não conduziu à perda imediata de estabilidade da frequência, a presença do volante de inércia revelou-se fundamental para a manutenção da estabilidade da frequência num curto intervalo de tempo (algumas dezenas de segundos) após a perturbação, tempo suficiente para as máquinas de reservas estáticas entrarem em serviço.

O cenário de ponta para o ano de 2012 revelou-se um cenário robusto perante as perturbações simuladas, o desvio de frequência não chega a 1 Hz. Pode-se concluir que a rede eléctrica da ilha de Santiago tem capacidade para albergar 22 MW de potência proveniente de fontes renováveis no cenário de ponta. Para suportar 14 MW de produção renovável no cenário de vazio para o ano de 2012 é preciso acautelar medidas preventivas devido ao facto de haver número reduzido de máquinas em serviço e consequentemente reduzido valor de constante de inércia no sistema.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentados as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido. Procura-se também emitir algumas opiniões sobre a evolução futura dos trabalhos neste domínio.

6.1 - Conclusões

Ao longo da realização deste trabalho foram mencionadas as razões que motivaram o aparecimento da PD de origem renovável e a consequente mudança de paradigma no que concerne à produção de energia eléctrica. Foram apresentados os principais conceitos subjacentes à PD e os diferentes tipos de energia que este utiliza para produzir electricidade.

A avaliação do impacto da integração da PD de origem renovável na rede eléctrica da ilha de Santiago - Cabo Verde foi feita numa rede eléctrica de características reais, através da simulação no ambiente *Matlab/Simulink*® das perturbações nos cenários de estudo definidos. Foram analisados os seguintes cenários de estudo: cenário de vazio para o ano de 2012, cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia e cenário de ponta para o ano de 2012.

Para o cenário de vazio para o ano de 2012 e cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia foi simulada apenas uma perturbação que consiste na variação da velocidade do vento de 11,7 m/s para 8,4 m/s o que se traduz na perda de 60% da capacidade de produção do parque eólico (14 MW para 5,5 MW), enquanto no cenário de ponta para o ano de 2012 foram simuladas duas perturbações em simultâneo, uma consiste na variação da velocidade do vento de 11,7 m/s para 7,5 m/s traduzindo numa perda de 71% da capacidade de produção do parque eólico (14 MW para 4 MW) e a outra consiste na redução da produção do parque solar em 75% da sua potência instalada (8 MW para 2 MW).

As perturbações simuladas para o cenário de ponta para o ano de 2012 não conduziram a perda de estabilidade de frequência, pelo que se pode concluir que para este cenário de estudo a rede suporta a integração 22 MW de PD de origem renováveis. O mesmo não se pode dizer em relação ao cenário de vazio para o ano de 2012, pois a integração de 14 MW de PD de origem renováveis conduz à perda de estabilidade da frequência. Conseguiu-se garantir a estabilidade da frequência mesmo que por intervalos de tempo relativamente curtos no cenário de vazio para o ano de 2012 com volante de inércia. A integração do volante de inércia permitiu que este participasse na regulação da frequência, evitando desse modo a perda de estabilidade de frequência no instante da ocorrência da perturbação, dando tempo para que as máquinas de reserva estática entrem em serviço.

6.2 - Trabalhos futuros

Existe actualmente na rede eléctrica de Santiago um parque eólico com uma potência instalada de 0,9 MW. Apesar de ser uma potência relativamente baixa é uma prova irrefutável de que é possível investir neste tipo de aproveitamento energético em Cabo Verde e ter resultados satisfatórios. Neste sentido, é fundamental a realização de estudos que validem níveis de integração mais exigentes, criando condições para que o governo de Cabo Verde fomenta novos projectos de energias renováveis. No presente estudo não foram considerados aspectos relacionados com a capacidade de sobrevivência a cavas de tensão por parte dos parques eólicos. Dado o carácter intermitente dos recursos primários e a possibilidade de ocorrência de defeito que provoque a saída de serviço dos parques devido à actuação dos relés de mínimo de tensão, seria interessante a realização de estudos que permitam averiguar as vantagens da exploração dos recursos renováveis com capacidade de sobrevivência a cavas de tensão, de forma a melhorar a estabilidade da rede.

Referências

- [1] Helena Vasconcelos, Ruy Lopes dos Santos, João D. Fonseca J. A. Peças Lopes, "Estudos de impacto Eléctrico da Integração de Produção Eólica Adicional nas Redes Eléctricas da República de Cabo Verde - Caso Santiago," Actas do ELAB'99 - 4º Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia, pp. 271-282, Rio de Janeiro - Brasil, Junho 1999.
- [2] José Pedro Sucena Paiva, *"Rede de Energia Eléctrica, Uma Análise Sistémica"*.: ISP Press, 2007.
- [3] Alice Maria Cepeda da Assunção, "Integração de Microgeração em Larga Escala nas Redes de Baixa Tensão," Instituto Politécnico de Bragança, Dissertação de Mestrado, 2008.
- [4] Carlos Coelho Leal Moreira, "Apontamentos da disciplina Produção Dispersa do Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores", Feup, 2009.
- [5] Electra SA, "Relatório de Contas 2009,".
- [6] European Wind Energy Association - EWEA asbl, 2005-2010. The European Wind Energy Association (EWEA). [Online]. <http://www.ewea.org/index.php?id=1487>
- [7] EWEA, "Large Scale Integration of Wind Energy in The European Supply: analysis, issues and recommendations," December 2005.
- [8] Programa ALTERNER, *"Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias Projecto e Instalação"*., Janeiro de 2004.
- [9] Naturlink 2009. [Online]. <http://naturlink.sapo.pt/article.aspx?menuid=5&cid=22381&bl=1>
- [10] Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, "Avaliação e Controlo de Segurança de Redes Interligadas com Grande Penetração Eólica com base em Métodos de Aprendizagem Automática," Faculdade de Engenharia do Porto, Dissertação de Doutoramento, 2007.
- [11] Carlos Coelho Leal Moreira, "Identification and Development of MicroGrids Emergency Control Procedures," Faculdade de Engenharia do Porto, Dissertação de Doutoramento, 2008.
- [12] Luís Filipe Marques da Silva, "Análise do Comportamento Dinâmico da Rede Eléctrica da Ilha do Chipre em Situação de Perturbação e em Cenário de Integração Eólica," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação do Mestrado, 2008.
- [13] Nuno José de Abreu e Sousa Cabete Gil, "Elaboração de Procedimentos e Critérios para Definição de Limites de Elegibilidade de Aceitação de Produção Renovável em Redes Isoladas," Faculdade de Engenharia do Porto, Dissertação de Mestrado, 2003.

- [14] G.N. Kariniotakis G.S. Stavrakakis, *A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel Wind Turbines Systems Interaction. Part I: A General Multimachine Power System Model.*: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, pp. 577-583, , 1995.
- [15] Paulo Calvante de Albuquerque Admaro Alberto Machado Bittencourt, *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Eléctrica [por] Elgerd, Olle Ingemar.*: McGraw-Hill do Brasil.
- [16] *SimPowerSystems For Use With Simulink*, 3rd ed.: TransÉnergie Technologies and Hydro-Québec, 2003.
- [17] Energy Efficiency and Renewable Energy U.s.Department of Energy. (2003, Setembro) Federal Energy Management Program (FEMP). [Online]. http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/fta_flywheel.pdf
- [18] Bruno Filipe Gomes da Silva, "Estudo de Soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes Horizontes Temporais," Faculdade de Engenharia do Porto, Dissertação de Mestrado, 2008.
- [19] Doug da Rocha Holmes. (1996-2010) [Online]. <http://www.dholmes.com/master-list/caboverde/map-santiago.html>
- [20] [Online]. <http://nатурlink.sapo.pt/article.aspx?menuid=5&cid=22381&bl=1>
- [21] Rafael Tramontini Fernandes, "Supervisão de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel Usando Lógica Fuzzy," Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Dissertação de Mestrado, Dezembro de 2005.
- [22] European Transmission System Operators, "European Wind Integration Study (EWIS) Towards a Successful Integration of Wind Power into European Electricity Grids," Final Report, January 2007.
- [23] Ron Allan, Peter Crossley, Daniel Kirschen, Goran Strbac Nick Jenkins, *"Embedded Generation".*: The institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2000.
- [24] Prabha Kundur, *"Power System Stability and Control".*: McGraw-Hill, 1993.
- [25] Antonio Gomez Expósito, *Análisis y Operacion de Sistemas de Energía Eléctrica.*: McGRAW - HILL/INTERAMERICANA DE ESPANA, S.A.U., 2002.

Anexo

Neste anexo são apresentadas os parâmetros da rede eléctrica da ilha de Santiago utilizada nesta dissertação.

Anexos Tabela 1 - Parâmetros dos geradores

Desig.	Ra (p.u)	Sn (MVA)	Rs (p.u.)	Xd (p.u.)	X'd (p.u)	X''d (p.u)	Xq (p.u)	X'q (p.u)	X''q (p.u)	Xl (p.u)	T'do (s)	T''do (s)	T'qo (s)	T''qo (s)	H (s)	F (p.u.)	Par de Pólos
G3=G4	11	9.296	0.0056	1.5	0.22	0.14	0.8	0.8	0.15	0.09	0.53	0.03	0.50	0.05	1.45	0.01	4
G5=G6	11	12.5	0.0048	1.28	0.18	0.14	0.64	0.64	0.15	0.09	0.5	0.03	0.50	0.052	1.45	0.005	4

Anexos Tabela 2 - Parâmetros dos transformadores

Designação	Nó i	Nó j	Sn (MVA)	Un1 (kV)	Un2 (kV)	R1 (p.u.)	R2 (p.u.)	Rm (p.u.)	Lm (p.u.)
SS 20/60 Palmarejo	1	3	10	20	60	0.002	0.09	500	500
SS 20/60 Palmarejo	1	4	10	20	60	0.002	0.09	500	500
SS 60/20 São Filipe	17	18	10	60	20	0.002	0.09	500	500
SS 60/20 São Filipe	17	19	10	60	20	0.002	0.09	500	500
SS 60/20 Calheta	20	21	10	60	20	0.002	0.09	500	500
TG3	1	G3	10	11	20	0.002	0.09	500	500
TG4	1	G4	10	11	20	0.002	0.09	500	500
TG5	1	G5	15	11	20	0.002	0.09	500	500
TG6	1	G6	15	11	20	0.002	0.09	500	500

Anexos Tabela 3 - Cargas do sistema

Carga	Cenário de Vazio		Cenário de Ponta	
	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
Achada São Filipe	0.24	0.15	0.38	0.23
Palmarejo	0.52	0.32	0.81	0.50
Central Emergência	1.84	0.91	2.31	1.43
Anel Terra Branca 2	2.24	1.39	3.50	2.17
Anel Terra Branca 1	2.43	1.51	3.80	2.36
Saída Inerf	3.46	2.14	5.40	3.35
SS Calheta	3.58	2.22	5.59	3.46
SS Gamboa	10.78	6.74	17.65	10.53

Anexos Tabela 4 - Parâmetros das linhas

Desig.	Nó i	Nó j	Tipo	R(Ω)	L(H)
L1	1	6	LXHIOV 240	0.6883	0.001452
L2	1	5	LXHIOV 240	0.1280	0.000270
L3	1	7	LXHIOV 240	1.4602	0.003079
L4,5,6,7	1	2	LXHIOV 240	1.1296	0.002382
L9	5	7	XHIOV 95	1.6236	0.002584
L11	6	2	XHIOV 95	0.3739	0.000595
L12	7	2	XHIOV 95	0.2952	0.000470
L19	2	12	LXHIOV 500	0.5070	0.001986
L20	2	13	LXHIOV 500	0.5070	0.001986
L22	12	14	LXHIOV 500	0.2867	0.001123
L25	3	17	Aster 228	2.2100	0.019904
L26	4	20	Aster 228	6.4600	0.058181
L30	18	12	LXHIOV 500	0.0390	0.000153
L31	19	13	LXHIOV 500	0.0390	0.000153