

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

Integração de Veículos Eléctricos em Redes Isoladas

Carlos Manuel da Silva Oliveira

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira

Co-orientador: Eng. Pedro Miguel Pousada da Rocha Almeida

Fevereiro de 2011

Resumo

Nesta dissertação é apresentado um estudo de integração de veículos eléctricos em redes isoladas. O estudo incide na análise da rede eléctrica da ilha de S. Miguel em regime dinâmico, utilizando a ferramenta de simulação *MATLAB Simulink*.

No âmbito das actuais preocupações ambientais é efectuada uma contextualização das energias renováveis, sendo dada especial relevância à energia eólica, por esta ser a que conduz a maiores problemas do ponto de vista dinâmico. São descritas as redes isoladas e abordadas as formas de integração dos veículos eléctricos na resolução dos problemas de estabilidade dinâmica.

Com o objectivo de simular a rede eléctrica isolada analisada, os modelos dinâmicos dos diferentes componentes da rede são descritos, sendo apresentados os fundamentos matemáticos de cada um. Os veículos eléctricos são descritos por um modelo criado de raiz, sendo implementadas funções de controlo específicas para cada modo de funcionamento.

Dando continuação à análise da rede, na metodologia de análise é abordada a condição de exploração em regime estacionário, sendo utilizadas considerações aí obtidas na construção do modelo dinâmico implementado. A rede eléctrica da ilha é descrita e são apresentados os despachos considerados na simulação.

Sendo o estudo baseado nas condições de exploração da rede, a análise dinâmica é separada em dois espaços temporais distintos (presente e futuro), evidenciando a relevância da integração dos veículos eléctricos na rede eléctrica alvo de estudo.

Na sequência do estudo dinâmico apresentado nesta dissertação são apresentadas conclusões relevantes e referidas abordagens futuras nos estudos de integração dos veículos eléctricos na rede eléctrica.

Abstract

This work presents a study about electric vehicles integration in isolated systems. The study focuses on the electric dynamic regime analysis on the island of S. Miguel, using the simulation tool *MATLAB Simulink*.

Under the current environmental concerns, a contextualization of renewable energy is made. Particular relevance is given to wind energy, being this one of the most relevant issues on the dynamic point of view. The isolated grids are described and different ways to integrate electric vehicles in solving the problems of dynamic stability are discussed.

In order to simulate the considered power grid, the dynamic models of different network components are described and presented the mathematical foundations of each. Electric vehicles are described by a model created from scratch, being implemented control functions specific to each operation mode.

On the network analysis, the steady state condition is discussed, being obtained considerations used in constructing the implemented dynamic model. The island's electricity network is described being presented the considered dispatch in the simulation.

Since the study is based on the operating conditions of the network, the dynamic analysis is separated into two separate timelines (present and future), showing the importance of integrating electric vehicles in the target grid study.

Following the dynamic study presented in this thesis, relevant conclusions are presented being referred possible approaches in future studies to integrate electric vehicles in the grid.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira, por todo o seu apoio durante a realização desta dissertação. Os seus conselhos e confiança foram determinantes para a elaboração da mesma.

Quero também agradecer ao Eng. Pedro Miguel Pousada da Rocha Almeida, investigador do INESC Porto, pela sua dedicação no desenrolar de todo este processo.

Não posso igualmente, deixar de frisar o apoio e incentivo que me foi dado pela minha família, numa fase que foi particularmente difícil para todos.

Por último, uma palavra de apreço a todos os que, directa ou indirectamente, se revelaram preciosos na conclusão deste trabalho.

*“Wise men speak because they have something to say;
Fools, because they have to say something”*

Plato (427BC - 347BC)

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Enquadramento	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Estado da Arte	5
2.1	Energias Renováveis	5
2.1.1	Produção Geotérmica	5
2.1.2	Produção Eólica	7
2.2	Redes Isoladas	9
2.2.1	Problemas de Segurança Dinâmica em Redes Isoladas	10
2.3	Veículos Eléctricos - Integração na Rede Eléctrica	11
2.4	Conclusões	14
3	Modelos Matemáticos	15
3.1	Simulação Dinâmica - Considerações	15
3.2	Máquina Síncrona	16
3.2.1	Descrição Matemática	16
3.2.2	Circuito Equivalente da Máquina Síncrona	17
3.2.3	Descrição do Comportamento Mecânico	18
3.2.4	O Modelo da Máquina Síncrona em <i>MATLAB Simulink</i>	18
3.2.5	Regulador de Tensão/Excitação	19
3.2.6	Regulador de Velocidade	21
3.3	Máquina Assíncrona	23
3.3.1	Descrição Matemática	23
3.3.2	Circuito Equivalente da Máquina Assíncrona	24
3.3.3	Descrição do Comportamento Mecânico	25
3.3.4	O Modelo da Máquina Assíncrona em <i>MATLAB Simulink</i>	25
3.3.5	Parque Eólico	26
3.4	Veículos Eléctricos	27
3.4.1	Ligação de Conversores Electrónicos de Potência à Rede	27
3.4.2	O Modelo dos Veículos Eléctricos em <i>MATLAB Simulink</i>	29
3.4.3	Controlo do Interface	30
3.5	Conclusões	34
4	Descrição da Rede, Cenários e Metodologia de Análise	35
4.1	Caracterização da Rede Eléctrica Isolada da Ilha de S. Miguel	35
4.1.1	Produção Actual	37

4.1.2	Produção Futura	39
4.1.3	Diagramas de Carga Característicos	39
4.2	Cenários de Carga	41
4.2.1	Carga Actual	41
4.2.2	Carga Futura	41
4.3	Cenários de Produção	43
4.3.1	Despacho Actual	43
4.3.2	Despacho futuro	43
4.4	Metodologia de Análise	44
4.4.1	Regime Estacionário	44
4.4.2	Regime Dinâmico	46
4.5	Conclusões	48
5	Utilização de Veículos Eléctricos no Aumento da Produção de Origem Renovável na Ilha de S. Miguel	49
5.1	Capacidade Actual de Produção Eólica	49
5.1.1	PE com dezasseis aerogeradores	50
5.1.2	PE com dez aerogeradores	56
5.1.3	Análise Resultados	58
5.2	Integração dos Veículos Eléctricos	60
5.2.1	0% de Carga Controlável nos VE	60
5.2.2	50% de Carga Controlável nos VE	62
5.2.3	100% de Carga controlável nos VE	70
5.2.4	Análise de Resultados	73
5.3	Conclusões	75
6	Conclusões e Trabalho Futuro	77
6.1	Principais Conclusões e Resultados Obtidos	77
6.2	Trabalho Futuro	78
	Referências	81

Lista de Figuras

2.1	Energia geotérmica no mundo	6
2.2	Aumento previsto na percentagem de electricidade fornecida pela energia do vento na União Europeia	7
2.3	Capacidade acumulada de energia eólica instalada, 2009-2020	8
2.4	Fatia de mercado de veículos eléctricos nos Estados Unidos, 2015-2020	12
2.5	Sistema de controlo de potência activa nos VE	13
2.6	Função de controlo	13
3.1	Circuito equivalente representativo da máquina síncrona, sistema de eixos dq	17
3.2	Modelo da máquina síncrona	19
3.3	Constituição de um sistema de excitação DC	19
3.4	Estrutura do modelo do sistema de excitação do tipo IEEE - DC1A	20
3.5	Modelo simplificado da máquina primária diesel com regulador de velocidade	21
3.6	Modelo do motor diesel e regulador de velocidade	22
3.7	Circuito equivalente representativo da máquina assíncrona, sistema de eixos dq	24
3.8	Modelo da máquina assíncrona	25
3.9	Modelo da turbina eólica	26
3.10	Característica de uma turbina eólica	27
3.11	Sistema de controlo inversor PQ	28
3.12	Sistema de controlo de potência activa nos VE	30
3.13	Função de controlo no modo carga simples	31
3.14	Função de controlo no modo carga regulável	32
3.15	<i>Loop</i> descontrolado provocado pelo aumento de carga	32
3.16	Função de controlo no modo <i>Vehicle-to-grid</i>	33
4.1	Mapa da ilha de S. Miguel, Açores	36
4.2	Esquema unifilar da rede de transporte AT/MT da ilha de S. Miguel	36
4.3	Esquema unifilar simplificado da rede de transporte AT/MT da ilha de S. Miguel	37
4.4	Esquema unifilar da Central Térmica do Caldeirão	37
4.5	Esquema unifilar da Central Geotérmica do Pico Vermelho	38
4.6	Esquema unifilar da Central Geotérmica da Ribeira Grande	38
4.7	Enquadramento geográfico do Parque Eólico dos Graminhais na ilha de S. Miguel	39
4.8	Diagramas de carga característicos da ilha de S. Miguel	40
4.9	Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de vazio sem PE	44
4.10	Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de vazio com PE	45
4.11	Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de ponta sem PE	45
4.12	Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de ponta com PE	46
4.13	Variação do vento na turbina	48

5.1	Potência activa injectada na rede pelo PE	50
5.2	Frequência da rede	51
5.3	Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL	51
5.4	Potência activa injectada na rede pela CGRG	52
5.5	Potência activa injectada na rede pela CGPV	52
5.6	Potência activa injectada na rede pelo PE	53
5.7	Frequência da rede	54
5.8	Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL	54
5.9	Potência activa injectada na rede pela CGRG	55
5.10	Potência activa injectada na rede pela CGPV	55
5.11	Potência activa injectada na rede pelo PE	56
5.12	Frequência da rede	57
5.13	Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL	57
5.14	Potência activa injectada na rede pelo PE	58
5.15	Frequência da rede	59
5.16	Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL	59
5.17	Potência activa injectada pelo PE	61
5.18	Frequência na rede	61
5.19	Potência activa injectada por cada gerador de CTCL	62
5.20	Potência activa injectada por CGPV e CGRG	62
5.21	Potência activa injectada pelo PE	63
5.22	Frequência na rede	63
5.23	Variação de frequência para controlo dos VE	64
5.24	Potência activa controlável dos VE	64
5.25	Potência activa injectada por cada gerador de CTCL	65
5.26	Potência activa injectada pelo PE	66
5.27	Frequência na rede	66
5.28	Variação de frequência para controlo dos VE	67
5.29	Potência activa controlável dos VE	67
5.30	Potência activa injectada por cada gerador de CTCL	68
5.31	Potência activa injectada por CGPV e CGRG	68
5.32	Frequência na rede	69
5.33	Potência activa controlável dos VE	70
5.34	Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL	70
5.35	Frequência na rede	71
5.36	Variação de frequência para controlo dos VE	71
5.37	Potência activa controlável dos VE	72
5.38	Potência activa injectada por cada gerador de CTCL	72
5.39	Potência activa injectada por CGPV e CGRG	73
5.40	Potência activa controlável dos VE	74
5.41	Frequência na rede	74

Lista de Tabelas

4.1	Distribuição da carga actual no cenário de ponta e de vazio sem VE	41
4.2	Distribuição da carga futura no cenário de ponta e de vazio com VE	41
4.3	Parque automóvel seguro em S. Miguel	42
4.4	Cenários de participação dos VE no controlo de carga	43
4.5	Distribuição da produção no cenário de ponta e de vazio sem PE	43
4.6	Distribuição da produção no cenário de ponta e de vazio com PE	43
4.7	Distribuição da produção no cenário de ponta e de vazio com PE	44

Abreviaturas e Símbolos

AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CGPV	Central Geotérmica do Pico Vermelho
CGRG	Central Geotérmica da Ribeira Grande
CTCL	Central Térmica do Caldeirão
DC	<i>Direct Current</i>
EDA	Electricidade dos Açores
MT	Média Tensão
PE	Parque Eólico
SEAE	Subestação do Aeroporto
SECL	Subestação do Caldeirão
SEFO	Subestação dos Foros
SELG	Subestação da Lagoa
SEMF	Subestação dos Milhafres
SEPD	Subestação de Ponta Delgada
SESR	Subestação de S. Roque
SEVF	Subestação de Vila Franca
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
VE	Veículo Eléctrico

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A elevada dependência de combustíveis fósseis, altamente poluentes e escassos, levará numa solução futura, à utilização extensiva de veículos eléctricos no panorama da mobilidade. Este cenário desenvolver-se-á em paralelo com a profunda mudança de paradigma no sector eléctrico onde a produção dispersa e as *smart grids* apresentam um papel preponderante. Actualmente, existem vários tipos de viaturas com locomoção proporcionada total ou parcialmente por energia eléctrica. Uma vez que estes veículos utilizam baterias com elevadas capacidades de armazenamento e consequentes requisitos de carga, a sua implementação em larga escala irá provocar impactos consideráveis na gestão e operação do sistema eléctrico. No entanto, a sua utilização também permite o aproveitamento de fontes de energia renováveis com os seus benefícios ambientais e económicos associados.

Estando ligados à rede eléctrica, os VE absorvem e armazenam energia nas suas baterias, que pode ser devolvida à rede. Esta última funcionalidade é descrita pelo conceito *vehicle-to-grid*. Tal como a regulação de carga, o funcionamento em V2G permite o fornecimento de serviços auxiliares do sistema. Sendo parte integrante do parque automóvel, a penetração dos veículos eléctricos apresenta uma dispersão por toda a rede eléctrica. No fundo, a energia contida nas baterias é transportada entre vários pontos distintos da rede sempre que a viatura é estacionada e ligada ao sistema eléctrico.

Por razões ambientais e económicas, a produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis assume uma relevância muito grande. De facto, a dependência de recursos fósseis poluentes e finitos que dita a mudança de paradigma na mobilidade, apresenta-se também como força mobilizadora na integração de maiores parcelas de produção de energia com base em recursos limpos e inesgotáveis.

Entre as fontes renováveis de energia, a produção eólica apresenta-se, juntamente com a hídrica, como uma das mais maduras e tecnologicamente desenvolvidas. Aliás, o conhecimento técnico e a elevada fiabilidade apresentada por este tipo de aproveitamentos são factores fundamentais para a ampla penetração desta fonte de energia no panorama global da produção eléctrica.

No entanto, a sua exploração e integração no sistema eléctrico acarreta problemas relacionados com a imprevisibilidade e intermitência característica do vento. Esta problemática não tem sido um entrave à, cada vez mais elevada, penetração desta fonte de energia. Pelo contrário, as mais valias apresentadas têm levado à implementação de novas formas de controlo que permitem ultrapassar as limitações apresentadas.

1.2 Enquadramento

Em redes isoladas, a produção renovável, além de ser mais limpa, pode contribuir para minimizar custos de produção e diminuir a dependência energética deste tipo de sistemas. A produção tradicional nestas redes é geralmente dispendiosa, devido à dimensão apresentada pelos grupos geradores e aos custos associados com o transporte da matéria prima. A integração de energia eléctrica a partir de fontes renováveis em sistemas isolados apresenta no entanto algumas particularidades, principalmente no que concerne à energia eólica. De facto, a característica intermitente desta fonte de energia pode provocar problemas ao nível da estabilidade dinâmica, sendo particularmente visível quando se pretende integrar parcelas importantes de produção eólica comparativamente aos níveis de carga do sistema.

Na abordagem destes problemas, torna-se então necessário garantir a qualidade da alimentação das cargas em redes eléctricas que não dispõem de ajuda externa de sistemas eléctricos vizinhos, sem comprometer a integração de produção de fontes renováveis. O problema do enquadramento da penetração de energia renovável em redes isoladas com integração de veículos eléctricos pode ser descrito da seguinte forma:

- **Redes isoladas** — Estas redes são redes de dimensão relativamente pequena, possuindo pouca carga, alimentada por máquinas de pequena dimensão, apresentando por isso inércia reduzida. Sendo redes electricamente fracas, estão muito susceptíveis a variações de frequência resultantes de desequilíbrios entre carga e produção.
- **Produção renovável** — Esta forma de energia apresenta uma característica intermitente de difícil previsão. Quando utilizada, especialmente nas horas de vazio, a retirada de serviço de máquinas síncronas convencionais para acomodar a sua produção, evidencia ainda mais as fragilidades do sistema isolado, limitando consideravelmente os seus níveis de penetração.
- **Integração de veículos eléctricos** — A implementação de políticas de integração de VE que incentivem o seu carregamento durante o período de vazio pode permitir um aumento de segurança dinâmica do sistema. O aumento de carga nas horas de menor consumo permite uma maior penetração de produção renovável, podendo ser utilizada no carregamento dos VE, que de outra forma seria desperdiçada. Além disso, se os VE forem controláveis e responderem a certas condições do sistema, podem contribuir para o aumento da sua segurança dinâmica.

Assim sendo, nesta dissertação é analisada a integração de veículos eléctricos na rede eléctrica isolada da ilha de S. Miguel. O trabalho desenvolvido enquadra-se no âmbito do projecto "Estimação da produção e impacte na distribuição de energia eléctrica por penetração de veículos eléctricos e plug-in"(MIT-Pt/SES-GI/0008/2008). De entre outros aspectos, este projecto tem por objectivos a avaliação dos impactos resultantes da interacção do veículo rodoviário com a rede eléctrica tendo em conta: a) avaliação do impacto dos períodos de carregamento da bateria e estratégias de carregamento; b) identificação das estratégias de controlo dos períodos de carga/descarga a nível controle dos períodos de carga/descarga a nível operacional; c) identificação da estratégia possível para uso exclusivo de energias renováveis; d) estimativa da contribuição do veículo para a rede em situações de pico de carga e regulação da carga.

Para o caso de estudo específico é implementada uma plataforma de simulação do comportamento dinâmico, em ambiente *MATLAB Simulink* com recurso à biblioteca *SimPowerSystems*. A ferramenta de simulação utilizada apresenta uma flexibilidade de construção dos modelos pretendidos ímpar. De facto, a implementação de um modelo completo da rede eléctrica da ilha exige a simulação do comportamento de máquinas síncronas (com respectivos reguladores de velocidade e tensão), máquinas assíncronas (com características da produção eólica), linhas, cargas e modelos de comportamento de veículos eléctricos (com diferentes capacidades de regulação).

Tendo em consideração a necessidade de penetração de produção eólica prevista e os problemas associados com o seu carácter inconstante, a sua integração na rede isolada desta ilha dos Açores proporciona um novo desafio aos VE introduzidos no sistema. Com base nisso, são efectuados estudos de estabilidade dinâmica onde é analisado o impacto que a participação dos veículos eléctricos tem na gestão da frequência da rede.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos, incluindo este, cujos conteúdos são descritos de forma abreviada em seguida.

No capítulo 2 é feita uma contextualização das energias renováveis presentes no sistema isolado de S. Miguel. É dado especial relevo à energia eólica, por esta ser a que conduz a maiores problemas nas redes isoladas. São descritas as redes isoladas e abordadas as formas de integração dos veículos eléctricos nos seus sistemas eléctricos.

De seguida, no capítulo 3 são apresentados os modelos dinâmicos gerais dos diversos intervenientes presentes na rede eléctrica analisada. É efectuada a descrição das máquinas primárias, dos sistemas de excitação e regulação de velocidade acoplados às diferentes máquinas implementadas, bem como das turbinas eólicas acopladas à máquina assíncrona. Os veículos eléctricos são apresentados com base num modelo criado de raíz, onde são implementadas funções de controlo específicas de cada modo de funcionamento.

O capítulo 4 aborda a implementação dos modelos descritos no capítulo 3 no caso específico da ilha de S. Miguel. A rede eléctrica da ilha é descrita e são apresentados os despachos considerados na simulação dinâmica. Na metodologia de análise é abordada a condição de exploração em

regime estacionário, sendo utilizadas considerações aí obtidas na construção do modelo dinâmico implementado.

A avaliação do impacto dos veículos eléctricos na estabilidade da rede eléctrica isolada da ilha de S. Miguel é efectuada no capítulo 5. A análise é dividida em dois espaços temporais diferenciados. Na situação presente é simulada a capacidade actual de integração de produção eólica sem perda de condições de estabilidade da rede. No cenário futuro, que é definido no capítulo 4, é estudado o impacto da integração de veículos eléctricos na gestão de operações do sistema em diferentes cenários de participação.

Por último, no capítulo 6 são descritas as principais conclusões obtidas bem como abordadas novas áreas de análise que dão seguimento ao estudo dinâmico apresentado neste trabalho.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Energias Renováveis

Nos últimos anos, o tema das energias renováveis tem sido pronunciado com elevada regularidade. De facto, têm vindo a ser estabelecidos inúmeros compromissos internacionais que incidem na limitação das emissões dos gases que provocam efeito de estufa. O protocolo de Kyoto e as mais recentes conferências realizadas em prol desta temática, têm levado à adopção de estratégias que têm conduzido a um aumento significativo da produção de electricidade a partir de fontes de energia renováveis. Em Portugal, na sequência da orientação definida e abordada pela União Europeia, o investimento em energias renováveis tem sido intensivo na tentativa de reduzir a dependência energética externa, de cumprir metas de redução de emissões e de aumentar a eficiência energética. Aliás, a estratégia Europa 2020 estabelece prioridades na área do crescimento inteligente, sustentável e inclusivo (objectivos 20, 20, 20). Contrariamente às fontes de energia fósseis, as energias renováveis apresentam-se como uma alternativa de energia limpa, livre, inesgotável que está disponível no meio. Por esse motivo, não existem custos associados ao transporte da matéria prima nem dependência externa de países exportadores de petróleo.

As mais valias enunciadas pelas fontes de energia renováveis tornam-se mais evidentes em sistemas isolados, onde os sistemas de produção convencionais apresentam elevados custos de energia. As redes energéticas isoladas não possuem qualquer tipo de ligação a sistemas energéticos de maior dimensão, como o sistema eléctrico europeu, estando por isso mais susceptíveis a problemas de estabilidade dinâmica. Por esse motivo, os sistemas isolados apresentam especificidades nas regras de operação do sistema que visam garantir a manutenção das adequadas condições de exploração do sistema. Nesse âmbito, o presente trabalho vem expôr as mais valias da produção renovável presente na rede isolada da ilha de S. Miguel, bem como abordar a introdução futura de produção eólica prevista.

2.1.1 Produção Geotérmica

Este tipo de energia provém do interior do nosso planeta sob a forma de calor e está relacionada com fenómenos geológicos que se processam debaixo da crosta terrestre. Este recurso pode ser

classificado em duas categorias distintas. No entanto, o seu aproveitamento para produção de energia eléctrica apenas é possível para temperaturas superiores a 150°C.

Numa central geotérmica de produção de energia tira-se partido do calor existente nas camadas inferiores da terra através de poços ou canais suficientemente profundos que permitam aproveitar o aumento de temperatura sentido. Ao injectar água no interior desses canais, esta transforma-se em vapor que é responsável pelo accionamento das turbinas.

Em termos visuais, estas centrais são discretas não apresentando grandes impactos no meio envolvente. Nas questões ambientais, não são emitidos gases poluentes, havendo apenas considerações relativas às características próprias dos fluidos geotérmicos, contendo enxofre, nitratos, metais pesados e outras partículas nocivas para o ambiente.

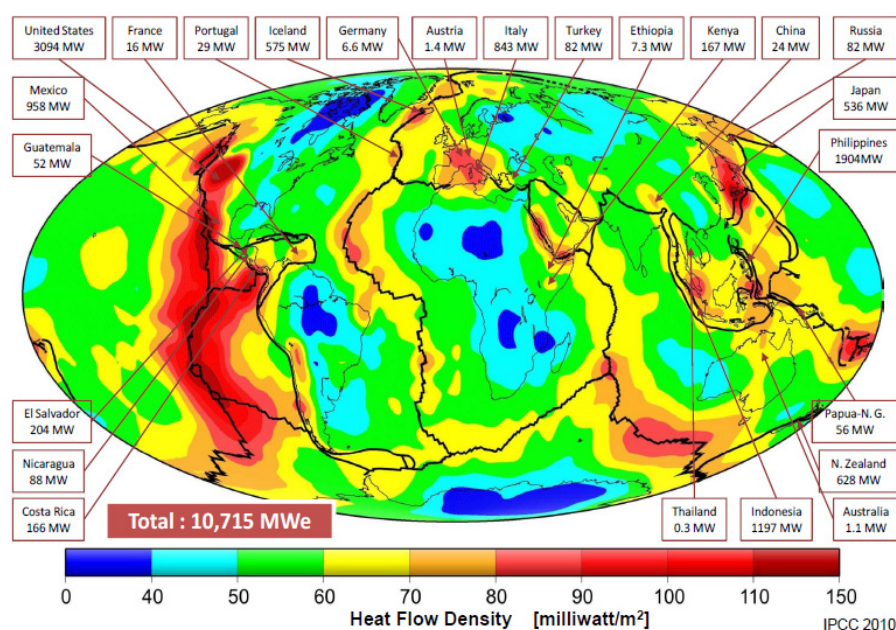


Figura 2.1: Energia geotérmica no mundo

Este recurso está normalmente associado a áreas de actividade vulcânica, sísmica ou magmática. A sua utilização é definida pelas zonas de maior actividade sísmica e densidade de calor (figura 2.1).

Consequência da forma como este recurso é aproveitado, estas centrais apresentam uma controlabilidade muito reduzida que pode provocar problemas no acompanhamento do diagrama de carga de um sistema eléctrico. Por esse motivo, este tipo de geração é normalmente utilizado como base do diagrama. Os perfis de produção apresentados pelas centrais geotérmicas são constantes e não possuem capacidade de regulação como os geradores convencionais, não podendo por isso participar na regulação de potência activa da rede.

2.1.2 Produção Eólica

De entre as fontes de energia renováveis, os recursos eólicos apresentam-se como um dos mais amplamente distribuídos pela superfície terrestre. Tal facto, possibilita a sua exploração em qualquer parte do globo, independentemente de condicionalismos geológicos ou de localização. A União Europeia tem estado na vanguarda da utilização dos recursos renováveis, tendo colocado objectivos específicos para a redução da dependência energética externa e das emissões de gases que provocam o efeito de estufa. Uma das bases da orientação energética seguida pelos países europeus baseia-se no aumento da potência eólica instalada, estando prevista a produção de até 50% da energia através de energia do vento em 2050 [1] (figura 2.2).

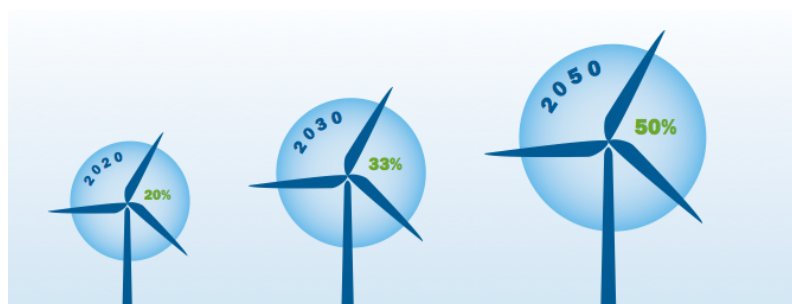


Figura 2.2: Aumento previsto na percentagem de electricidade fornecida pela energia do vento na União Europeia

A Energia Eólica tem observado uma elevada taxa de crescimento de potência instalada nos últimos anos. Como se pode verificar em 2.3, o elevado crescimento registado nos últimos tempos tem potencial de continuar no futuro. Esta fonte de energia renovável tem sido explorada em abundância nos países europeus que apresentam grandes défices energéticos. No entanto, países como os Estados Unidos da América e a China, que têm assente o seu crescimento em fontes de energia fósseis, estão agora a investir na produção de energia eólica. Tal facto não é alheio às comprovadas mais valias que esta fonte apresenta em termos ambientais e económicos.

Apesar da sua massificação, os aproveitamentos eólicos apresentam variações de produção incontroláveis e de previsão limitada. Apesar de já ser possível fazer previsões da sua ocorrência com alguma precisão, a produção eólica depende das condições meteorológicas do vento, apresentando por isso uma natureza aleatória. Não obstante a sua natureza imprevisível, os aproveitamentos eólicos estão sujeitos a diversos tipos de fenómenos que incutem problemas na rede à qual estão ligados. A característica intermitente do vento provoca flutuações de produção, consequência de ocos de vento ou turbulências. A ocorrência de curto-circuitos na rede pode provocar a actuação de protecções de mínimo de tensão, desligando PE inteiros. A ultrapassagem de limites de velocidade de operação das torres eólicas (denominadas *cut-in* e *cut-off wind speed*) podem levar também ao desligamento de torres individuais.

Apresentando características de funcionamento muito diferentes das centrais convencionais, as metas de penetração eólica apresentadas têm levado à realização de inúmeros estudos que vi-

sam avaliar a capacidade da sua integração na rede [2] [3]. De facto, o recurso eólico apresenta uma variabilidade de funcionamento muito elevada. A segurança dinâmica em sistemas que têm de operar com grandes quantidades de produção eólica é o fator principal das análises efectuadas sobre esta temática. Os sistemas de distribuição e transporte têm de ser capazes de operar sem perdas de qualidade de serviço e segurança de operação face a perturbações que provoquem a perda de elevados volumes de produção eólica. No entanto, os problemas sentidos em redes isoladas diferem dos sentidos em grandes redes interligadas, como é o caso da rede ibérica. Numa rede interligada, os problemas são relacionados com as eventuais diferenças de frequência entre duas zonas da rede. Estas variações são provocadas pela sobrecarga nas interligações criada pelo desligamento de PE que não possuem capacidade de sobreviver a cavas de tensão. Nas redes isoladas, os problemas são relacionados com a estabilidade dinâmica da rede, nomeadamente ao nível das variações de frequência.

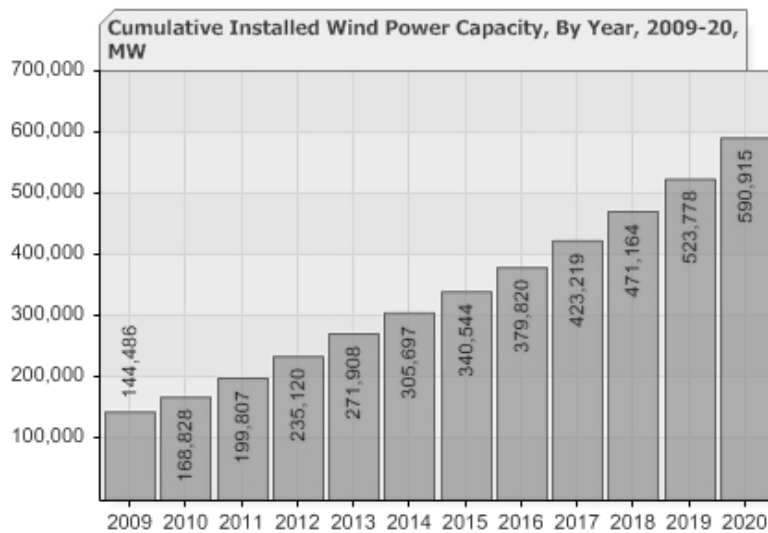


Figura 2.3: Capacidade acumulada de energia eólica instalada, 2009-2020

Estes pormenores de funcionamento obrigam à criação de mecanismos de controlo que permitam garantir uma produção estável e a correcta alimentação da carga em qualquer circunstância. Tais mecanismos são muito difíceis de implementar. Se os parques eólicos pertencem ao domínio público, os operadores podem desligar os aerogeradores como forma de controlo para manter a segurança do sistema. No entanto, como acontece na maioria dos casos, os parques eólicos são propriedade de privados. Sendo fontes de energia não despacháveis, a política de controlo por parte dos operadores torna-se mais difícil, sendo por isso necessário criar outros mecanismos de salvaguarda da estabilidade do sistema. Ainda mais importante que a capacidade de desligar geração eólica, torna-se imprescindível a criação de reserva na rede para suprimir alguma falha deste tipo de produção.

Com base na experiência de diversos países europeus com elevados níveis de penetração de produção eólica na exploração das suas redes, tem sido constatado que as variações características

deste tipo de produção não acarretam impactos negativos face à dimensão do sistema. No entanto, não são de menosprezar os cenários de penetração futuros, com ênfase para a criação de parques eólicos *off-shore* de elevada potência e altos rendimentos obtidos à custa das excelentes condições do recurso eólico no mar. Este tipo de aproveitamentos, além de representar uma maior percentagem no global de produção eléctrica, apresentam uma elevada propensão para se concentrarem geograficamente nas áreas mais favoráveis à sua exploração.

Os impactos descritos em grandes redes interligadas são amplamente potenciados em redes isoladas que apresentam fragilidades ao nível da estabilidade dinâmica. Nestes sistemas, os aproveitamentos eólicos costumam representar uma ampla percentagem da capacidade de geração disponível, transpondo por isso os inconvenientes da produção intermitente para a rede. Para fazer face às quebras de produção deste tipo de aproveitamentos, os sistemas isolados têm de ser munidos de ferramentas de controlo do sistema que garantam a estabilidade de exploração da rede.

2.2 Redes Isoladas

Nos sistemas isolados, a produção convencional é maioritariamente fornecida por unidades diesel/fuel, que apresentam elevados custos de produção de electricidade. Como exemplo, podem ser referidas as ilhas de Cabo Verde onde os custos associados à produção de energia impõe restrições ao próprio desenvolvimento do país. Este país importa todo o fuel que necessita, não só para produzir electricidade, mas também para produzir água potável através da desalinização da água do mar. Esta dependência de matéria prima externa com elevados custos tornam inviável a prosperidade económica deste tipo de sistemas.

Aumentando a penetração de fontes de energia renovável nas redes isoladas é possível obter custos de produção consideravelmente inferiores. Esta abordagem consegue conciliar os seguintes aspectos. Se por um lado se conseguem reduzir os custos de fornecimento de energia eléctrica, por outro, as ilhas apresentam usualmente condições meteorológicas particularmente favoráveis para a exploração de fontes de energia renováveis, especialmente eólica. Por este motivo, ilhas de países como Portugal (Madeira e Terceira), Grécia (Lemnos e Creta [3]), Chipre [4] e Cabo Verde (S. Vicente, Santiago [5] e Sal) têm vindo a implementar grandes aproveitamentos desta fonte de energia limpa e inesgotável. No entanto, existem grandes limitações técnicas, relacionadas com a frequência de operação da rede isolada, que limitam os níveis de integração de produção de origem renovável que podem ser atingidos.

As redes isoladas não dispõem de ajuda de redes vizinhas que as possam socorrer em situações mais críticas. Estes sistemas costumam apresentar inércias reduzidas que se agravam quando é necessário retirar máquinas térmicas para acomodar produção renovável. Assim sendo, quando comparadas com redes interligadas (como é o caso da rede ibérica), estas redes são fracas e exigem maiores preocupações relacionadas com segurança do sistema, controlo de frequência e reserva girante.

Tendo em consideração a autonomia que estes sistemas têm de apresentar, torna-se extremamente importante garantir que a integração destas fontes de energia voláteis não acarretam efeitos

adversos para a normal operação do sistema. A fragilidade evidenciada por sistemas eléctricos isolados juntamente com a incerteza e falta de controlo característica da produção eólica podem introduzir problemas de comportamento dinâmico neste tipo de sistemas.

A necessidade de garantir capacidade de reserva suficiente dentro do sistema para compensar uma falha de geração repentina é um problema comum a qualquer rede isolada. A falha no balanço entre carga e geração pode levar à instabilidade do sistema podendo provocar o seu colapso. Este tipo de instabilidade transitória depende da capacidade que o sistema tem em repor o balanço entre geração e carga de forma eficaz face a uma falha de produção severa, como pode acontecer num PE. Por norma, os problemas de instabilidade de frequência em redes isoladas estão associados com insuficiente reserva de produção, má coordenação de controlo e inadequação dos tempos de resposta dos vários constituintes do sistema electroprodutor isolado.

As acrescidas dificuldades criadas pela elevada penetração de energia eólica obrigam à adopção de novas regras de operação nos sistemas isolados [6]. Por norma, são analisados vários cenários de exploração da rede com recurso a ferramentas de simulação que ajudem a obter medidas correctivas que permitam assegurar a operação estável do sistema.

2.2.1 Problemas de Segurança Dinâmica em Redes Isoladas

De entre as produções de energia renovável, a produção eólica apresenta-se como uma das mais inconstantes e imprevisíveis, podendo isso levantar problemas de comportamento dinâmico. A perda repentina de produção eólica é resultado de alterações bruscas de vento ou de elevadas velocidades de vento. Os problemas associados com esta fonte de energia podem causar grandes variações de frequência e tensão na rede. Estas situações podem levar à interrupção parcial do serviço ou mesmo à instabilidade do sistema e conseqüente colapso porque podem activar protecções de sistema, que desligam geradores ou deslastram carga, aumentando em cascata o efeito adverso das perturbações.

Os problemas de segurança dinâmica provocados pela produção eólica apresentam uma expressão mais ou menos relevante em função de diversos factores. Se, por um lado, em grandes redes interligadas os seus efeitos são pouco notados, em sistemas de reduzida dimensão, os seus efeitos podem mesmo provocar o colapso do sistema. No entanto, a importância destas perturbações não se resume à dimensão da rede onde elas ocorrem. Mais relevante que a dimensão do sistema é o cenário de carga durante o qual a perturbação ocorre. As variações de frequência tornam-se particularmente severas quando as variações ocorrem durante as horas de vazio. Nestas horas de menor consumo, geralmente durante a noite, as produções eólicas costumam representar uma larga maioria da potência gerada, existindo uma baixa reserva girante e inércias nas máquinas convencionais de baixo valor. Assim sendo, a elevada dependência da quantidade de reserva girante e qualidade da resposta das máquinas convencionais em serviço e o elevado impacto das variações de produção eólica provocam maiores complicações nestes cenários de carga.

Vários estudos de simulação dinâmica foram realizados, com especial ênfase dada aos sistemas isolados. Nota comum a todos é a referência dada à ocorrência de problemas de estabilidade de frequência. De facto, os problemas de variação da produção eólica são transpostos para a rede

e tornam-se problemas de variação transitória da frequência. Isto ocorre uma vez que existe uma relação directa entre o equilíbrio de geração/carga e a frequência do sistema eléctrico. Sendo que a frequência nominal da rede assume o valor de 50Hz, quando ocorre um desequilíbrio de potência o seu valor sobe (se houver mais geração que carga) ou desce (se houver mais carga que geração). Situações de exploração onde ocorrem situações mais graves que as variações de produção eólica também são analisadas em [4]. A ocorrência de um curto-circuito que conduza à actuação de protecções de mínimo de tensão de parques eólicos próximos corresponde à situação mais severa que pode ocorrer num PE. A maior severidade de uma perturbação desta magnitude, além de provocar uma maior diminuição dos volumes de produção, acarreta também esforços adicionais para os geradores ditos convencionais. Na ocorrência de um curto-circuito na rede são sentidos dois efeitos. Por um lado, existe oscilação da máquina síncrona devido à variação da potência eléctrica, provocada pela queda de tensão. Por outro, a perda de potência activa devido à saída de serviço do PE coloca dificuldades na recuperação da frequência após a eliminação do defeito. Com a perda de produção dos PE que ocorre perante uma situação destas, os geradores com capacidade de reserva têm de compensar a perda de potência/frequência no sistema além de alimentar o curto-circuito até este ser eliminado. Como consequência destes efeitos sobrepostos, não só os comportamentos de frequência são mais severos, como também as margens de estabilidade transitórias ficam reduzidas.

Para limitar os efeitos negativos que a produção eólica acarreta, os operadores da rede têm utilizado várias técnicas que visam diminuir o desligamento de PE e assim evitar as suas consequências na estabilidade do sistema. A introdução de novos PE com capacidade de sobreviver a cavas de tensão (*ride through fault*) ou a instalação de FACTS em zonas específicas da rede fazem parte das soluções actuais para resolver estes problemas. A integração de VE em redes interligadas pode fazer parte da solução e permitir uma maior integração de fontes de energia renovável [7] [8], mais precisamente a eólica, sem perdas de qualidade de serviço [6] e com variações de frequência dentro de valores aceitáveis. Nas redes isoladas contudo, torna-se necessário aplicar estratégias de controlo preventivo [9] [10] adicionais que garantam a estabilidade dinâmica do sistema.

2.3 Veículos Eléctricos - Integração na Rede Eléctrica

A integração de VE nas redes eléctricas é consequência da mudança de paradigma nas questões da mobilidade. Neste cenário futuro, a escassez de combustíveis fósseis e os problemas ambientais associados com a sua elevada utilização, levarão a uma substituição gradual dos veículos convencionais pelos VE, levando à sua adopção massiva. As estimativas mais optimistas de penetração dos VE apontam para valores na ordem dos 5% do mercado de veículos global em 2020 (figura 2.4) [11].

Uma vez que este tipo de veículos requer a utilização de baterias com elevadas capacidades de armazenamento e grandes requisitos de carga, a implementação em larga escala deste conceito, além de provocar impactos consideráveis no desenho e operação do sistema, vai beneficiar a utilização de recursos energéticos não poluentes [11].

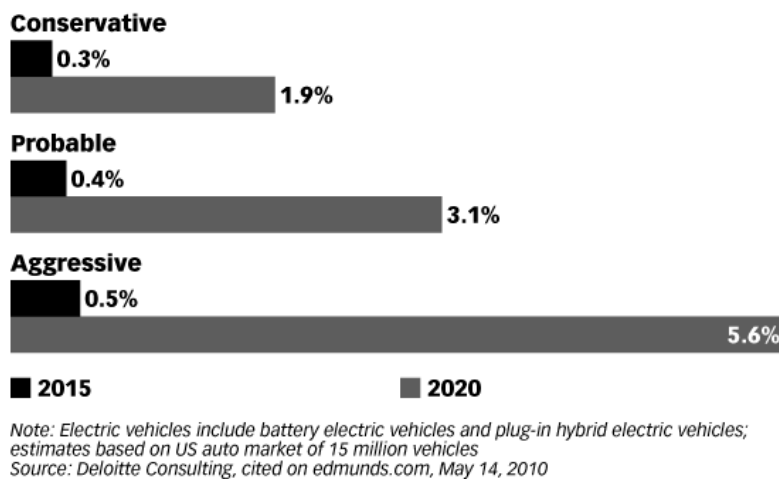


Figura 2.4: Fatia de mercado de veículos eléctricos nos Estados Unidos, 2015-2020

Além da evidente alteração dos aspectos relacionados com a mobilidade, quando ligados à rede eléctrica, a ligação em grande escala de veículos eléctricos com a rede irá, indiscutivelmente, aumentar o consumo de energia e induzir diversas alterações na gestão das redes e na operação do sistema. Estas alterações, contudo, não se limitam à diminuição das emissões dos gases com efeito de estufa dos escapes dos automóveis para as centrais de produção de energia com base em combustíveis fósseis. Como referido em [12] e [13], a alimentação do sector dos transportes movidos a electricidade deverá ser efectuada preferencialmente em horas de vazio. Apesar de poder ser efectuada a qualquer hora do diagrama de carga, o carregamento das baterias dos VE nas horas de vazio permite que seja introduzida uma boa parcela de energia renovável no sistema de transportes, diminuindo em larga escala a emissão de gases nefastos para o clima do planeta.

Em diversas análises realizadas com base no regime de funcionamento estacionário [14], o crescimento de penetração de VE pode ser limitado por restrições da rede. Os congestionamentos nas linhas, níveis de tensões nos nós ou aumento de perdas provocadas pela carga adicional estão entre os principais problemas [11]. No entanto, tal apenas acontece para cenários de integração muito elevados, podendo a limitação ser reduzida pela tomada de medidas adicionais, nomeadamente ao nível da gestão das baterias dos VE. A utilização de políticas de dupla tarifa ou de carregamento inteligente permite elevados valores de integração sem comprometer as condições de exploração da rede [11].

A controlabilidade da carga das baterias dos VE apresenta-se como uma característica muito importante para a sua integração no sistema eléctrico. A relação existente entre a frequência e o balanço de potência numa dada rede isolada permite usar a frequência para ajustar a carga ou descarga das baterias dos VE. De facto, a frequência de um sistema é uma indicação instantânea do que se passa entre geração e carga. A título de exemplo, quando a geração e carga estão equilibradas, a frequência da rede assume o valor de 50Hz. No entanto, quando há um desequilíbrio entre geração e carga, a frequência sobe se houver mais geração que carga ou desce se houver mais carga que geração.

O sistema de controlo de potência activa apresentado na figura 2.5 permite ajustar o valor de potência a injectar pelos VE de modo a diminuir a variação de frequência na rede. A função exemplo ilustrada na figura 2.6 é definida em K_P permitindo associar à variação de frequência um valor de potência que é comparado à carga dos veículos eléctricos P_L . A diferença de potências é depois limitada pelos valores de injeção/consumo existentes na carga controlável dos VE.

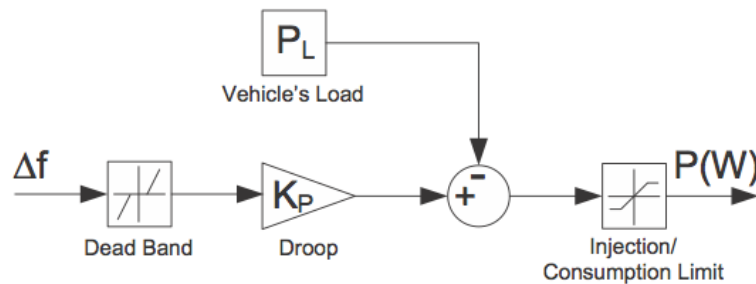


Figura 2.5: Sistema de controlo de potência activa nos VE

A banda morta (*dead band*) representada na figura 2.6 permite criar uma salvaguarda que garante a longevidade das baterias dos VE. Esta abordagem contribui para uma sinergia positiva entre as partes, facilitando acordos de operação entre o operador da rede e os proprietários dos VE. A largura desta *dead band* deve ser definida de acordo com a especificidade da rede e com a aceitação de participação dos VE na regulação da frequência do sistema. O mesmo princípio deve também seguir a definição da função $P(f)$, sendo o seu declive ajustado às reais características da rede e à vontade expressa dos seus intervenientes.

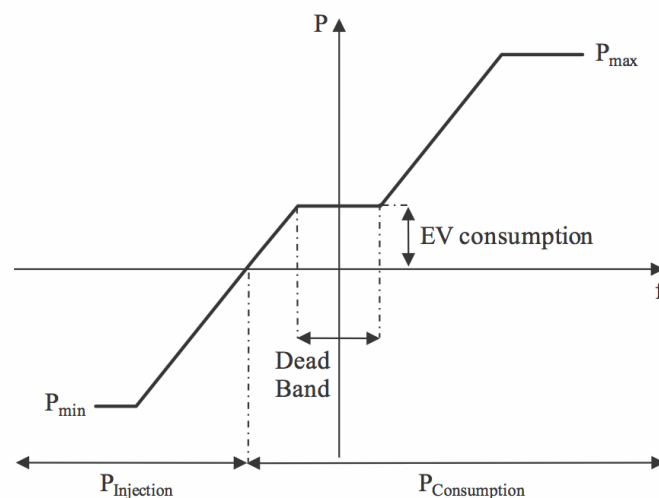


Figura 2.6: Função de controlo

Como referido em [15], do ponto de vista dinâmico, os VE podem ter um impacto positivo muito significativo. Os veículos eléctricos, quando ligados à rede podem ser usados para melhorar

o comportamento dinâmico, principalmente em sistemas isolados. De facto, as baterias responsáveis pela alimentação da locomoção dos VE, podem ser parte integrante das reservas do sistema eléctrico, cada vez mais necessárias tendo em conta a utilização massiva de fontes de energia renovável com características intermitentes, como a energia eólica. A sua flexibilidade de carga, ou a possibilidade de injectar potência activa (*Vehicle-to-grid*) na rede permitem que os VE participem no controlo primário de potência/frequência [16].

Em sistemas isolados, a mistura de produção renovável intermitente com a elevada penetração de veículos eléctricos como cargas simples pode levar à redução de qualidade de serviço e colocar em causa a robustez de operação do sistema. Tendo esse ponto de vista em consideração, as baterias dos VE, quando ligadas à rede eléctrica, podem ser consideradas como:

- **Cargas simples** — quando os proprietários dos veículos eléctricos definem que as baterias têm de ser carregadas a uma certa cadência.
- **Cargas dinâmicas** — sendo definido um intervalo de tempo durante o qual a carga da bateria pode ter lugar.
- **Dispositivos de armazenamento** — é uma carga dinâmica, mas com possibilidade de injectar potência activa na rede, quando funciona em *Vehicle-to-grid*.

Do ponto de vista da rede, estas abordagens fornecem benefícios para o seu funcionamento, proporcionando a possibilidade de regulação de carga dos VE em função das condições de operação da rede. A característica do funcionamento em V2G eleva as capacidades de integração dos VE ao seu expoente máximo. Neste conceito, os veículos eléctricos ligados à rede podem fornecer serviços de suporte da rede como picos de carga ou reserva girante do sistema.

2.4 Conclusões

Neste capítulo são abordados os principais temas que servem de base à elaboração desta dissertação.

A temática das energias renováveis é introduzida e integrada no panorama energético mundial. As principais características das produções eólica e geotérmica são descritas em relação à sua usabilidade e capacidade de regulação.

São apresentadas as redes isoladas e os problemas de segurança dinâmica que lhes estão associados, sendo abordados os problemas provocados pela produção eólica.

Por último é introduzida a questão da integração dos veículos eléctricos na rede eléctrica. A controlabilidade dos VE é explicada e referida como factor determinante para a sua participação nas operações de gestão da rede.

Capítulo 3

Modelos Matemáticos

A avaliação da integração dos veículos eléctricos em redes isoladas requer a utilização de uma plataforma de simulação do comportamento dinâmico de um sistema que inclua modelos dos seus constituintes.

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos de máquinas síncronas ou assíncronas, com os seus modelos de máquinas primárias, reguladores de tensão e frequência. Os modelos matemáticos adoptados na representação do comportamento dinâmico dos veículos eléctricos também são descritos.

Esta introdução teórica aos modelos dinâmicos utilizados na plataforma de simulação *MATLAB Simulink* pretende evidenciar a possível utilização destes modelos numa ampla diversidade de casos.

A simulação dos geradores síncronos e assíncronos do sistema foi baseada nos modelos disponíveis no *SimPowerSystems*. De igual modo, todos os componentes mais simples, como cargas ou linhas foram modelizados usando as implementações desta ferramenta do *MATLAB Simulink*. A modelização dos VE foi implementada propositadamente para este trabalho, sendo o seu modelo descrito ao longo deste capítulo.

3.1 Simulação Dinâmica - Considerações

O estudo do comportamento dinâmico de uma rede eléctrica face a diversas perturbações requer a utilização de modelos específicos para cada um dos seus elementos constituintes. Por simplicidade, a simulação dinâmica é efectuada com recurso ao software de simulação *MATLAB Simulink*. Na sua biblioteca, esta ferramenta tem já implementados modelos que podem ser utilizados numa extensa variedade de análises. Assim sendo, a modelização dos diversos componentes da rede é efectuada utilizando uma ligação concertada entre componentes.

O estudo do comportamento dinâmico dos sistemas eléctricos requer a utilização de modelos completos, sendo para isso necessário acoplar aos modelos das máquinas, sistemas de excitação

e de regulação de velocidade. Estes componentes tornam-se essenciais na obtenção de resultados que permitam avaliar a estabilidade transitória presente na rede.

3.2 Máquina Síncrona

A máquina síncrona é uma máquina eléctrica que opera a uma velocidade de rotação constante em sincronismo com a rede eléctrica, sendo a relação existente entre a sua velocidade de rotação e a frequência da rede dada pela equação 3.1.

$$n = \frac{f}{p} 60 \quad (3.1)$$

Sendo:

n — velocidade de rotação (rpm)

f — frequência (Hz)

p — número de pares de pólos

Dependendo da sua aplicação, o motor síncrono pode ser dividido em dois tipos (rotor cilíndrico e rotor de pólos salientes). Consequência da sua construção, os geradores síncronos de rotor cilíndrico são normalmente utilizados em centrais com velocidades de rotação elevadas (entre 1500rpm e 3000rpm). Por seu lado, os geradores síncronos de pólos salientes, são normalmente utilizados a baixas rotações (de 60rpm a 750rpm).

O modelo de máquina síncrona disponibilizado na biblioteca *SimPowerSystems* do *MATLAB Simulink* foi o escolhido para a simulação. Este modelo clássico, escolha recorrente de diversos estudos dinâmicos (como por exemplo em [17]), está bem documentado representando o comportamento dinâmico deste tipo de máquina com um nível de detalhe adequado.

3.2.1 Descrição Matemática

O comportamento eléctrico das tensões da máquina síncrona é descrito por equações matemáticas com todas as variáveis do rotor e quantidades eléctricas vistas do lado do estator.

As tensões são descritas por [4]:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Phi_d - \omega_R \Phi_q \quad (3.2)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Phi_q - \omega_R \Phi_d \quad (3.3)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{fd} \quad (3.4)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kd} \quad (3.5)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \phi'_{kq1} \quad (3.6)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \phi'_{kq2} \quad (3.7)$$

Sendo os fluxos dados por:

$$\phi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \quad (3.8)$$

$$\phi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kd} \quad (3.9)$$

$$\phi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \quad (3.10)$$

$$\phi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}) \quad (3.11)$$

$$\phi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q \quad (3.12)$$

$$\phi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q \quad (3.13)$$

Onde:

d, q — grandezas nos eixos d e q

R, s — grandezas do rotor e estator

l, m — indutâncias de fuga e magnetização

f, k — grandezas dos enrolamentos de campo e amortecedores

3.2.2 Circuito Equivalente da Máquina Síncrona

O circuito equivalente da máquina síncrona é apresentado na figura 3.1. O modelo eléctrico da máquina encontra-se representado num sistema de eixos dq, com a referência fixa ao rotor, rodando assim à mesma velocidade deste. Esta abordagem simplifica as expressões utilizadas, uma vez que as relutâncias do circuito magnético da máquina passam a ser vistas como constantes pelo circuito do estator [4].

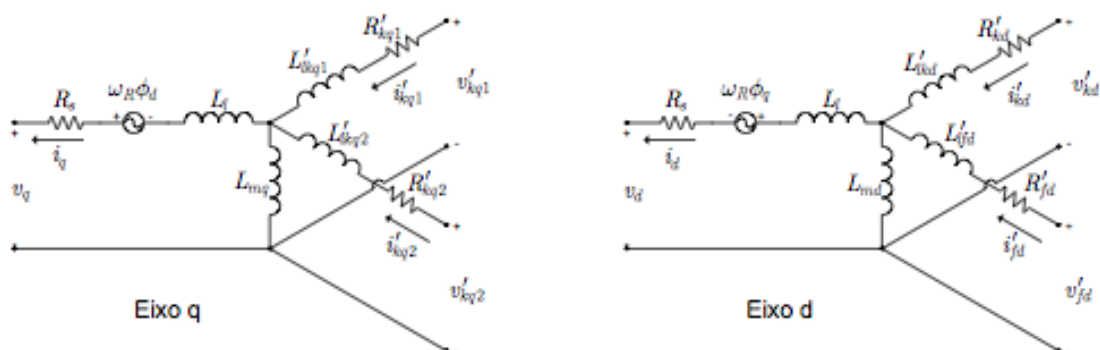


Figura 3.1: Circuito equivalente representativo da máquina síncrona, sistema de eixos dq

3.2.3 Descrição do Comportamento Mecânico

A equação do movimento desta máquina eléctrica rotativa apresentada nas equações 3.14 e 3.15 descreve o seu comportamento mecânico [4].

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - K_d \Delta\omega(t) \quad (3.14)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0 \quad (3.15)$$

Sendo, em p.u.:

$\Delta\omega$ — desvio em relação à velocidade síncrona

H — constante de inércia (s)

T_m — binário mecânico

T_e — binário eléctrico

K_d — coeficiente de atrito

$\omega(t)$ — velocidade do rotor

ω_0 — velocidade síncrona

A diferença entre os binários mecânico (T_m) e electromecânico (T_e) produz o binário acelerador que caracteriza o movimento da máquina.

3.2.4 O Modelo da Máquina Síncrona em *MATLAB Simulink*

O gerador síncrono utilizado na plataforma de simulação é composto por duas entradas que definem a sua potência de rotação e a tensão nos seus terminais. Por outro lado, o sistema de excitação/regulador de tensão é comum a todas as máquinas que possuem capacidade de regulação de tensão no seu barramento. No entanto, o regulador de velocidade, como explicado ao longo do capítulo 3, difere em função da máquina primária ligada ao veio do gerador síncrono trifásico.

As centrais de produção eléctrica fuel/diesel e geotérmica, apesar de baseadas no mesmo tipo de máquina eléctrica (síncrona), possuem mecanismos de regulação diferentes, consequência das diferentes capacidades de resposta que possuem em termos de potência activa e reactiva. As centrais geotérmicas, devido às suas características específicas, produzem sempre valores de potência constantes ao longo do tempo. Não existe, neste tipo de produção, capacidade de regulação da potência activa, havendo apenas capacidade de regulação de tensões em função das necessidades da rede. No entanto, numa central térmica convencional, além da regulação ao nível tensão, existe capacidade de regulação da produção de energia activa e consequente regulação da frequência da rede.

Com base nas diferentes capacidades de regulação apresentadas pelas diferentes centrais eléctricas que utilizam o gerador síncrono na produção de energia, o modelo das máquinas síncronas

utilizado é representado na figura 3.2 e utiliza entradas de regulação que simulam as reais capacidades das máquinas.

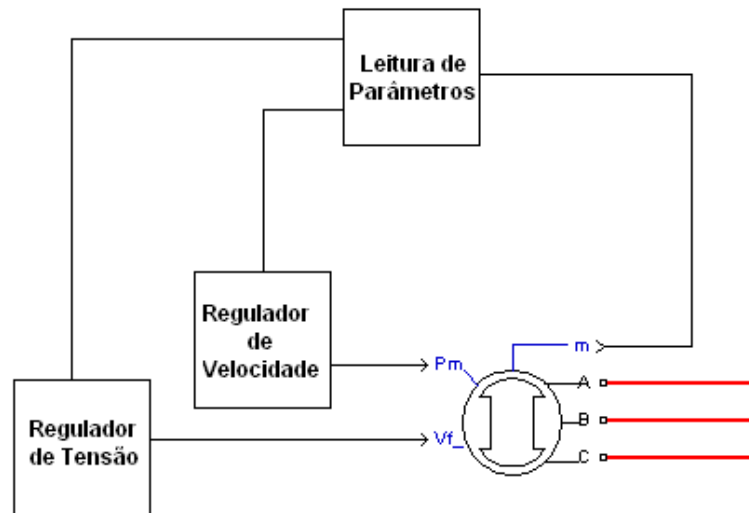


Figura 3.2: Modelo da máquina síncrona

3.2.5 Regulador de Tensão/Excitação

Nos estudos de estabilidade de um sistema eléctrico, os modelos matemáticos dos sistemas de excitação são essenciais para uma correcta avaliação da operação do sistema, especialmente no regime estacionário. Na simulação dinâmica efectuada em *MATLAB Simulink* é necessário incluir um modelo deste tipo de sistema que represente correctamente os sistemas presentes nas máquinas das centrais de produção. A constituição geral de um sistema de excitação DC é apresentada na figura 3.3.

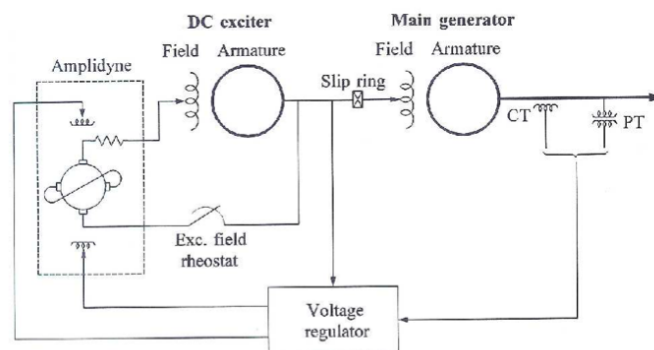


Figura 3.3: Constituição de um sistema de excitação DC

O regulador de tensão/excitação fornecido pelo *SimPowerSystems* é uma variante simplificada do modelo standard IEEE - DC1A descrito em [18]. Este modelo exclui a função que descreve

a saturação da excitatriz (V_x em 3.4), que não é mais que um gerador DC que adapta o nível de tensão gerada às necessidades, através de um *Voltage Regulator* que actua sobre a tensão aplicada no enrolamento de excitação.

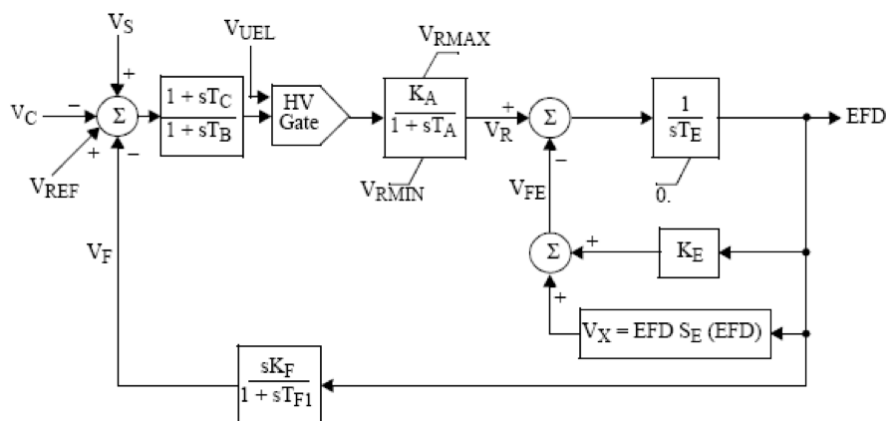


Figura 3.4: Estrutura do modelo do sistema de excitação do tipo IEEE - DC1A

No modelo standard IEEE - DC1A, a tensão V_C representa a saída de um transdutor de tensão associado a um compensador de carga. Sendo V_{ref} a tensão de referência, V_S representa a tensão disponibilizada por um possível *Power System Stabilizer*. Uma vez que o bloco *HV Gate* apresenta na sua saída a maior das duas entradas, V_{UEL} permite a actuação de um limitador de subexcitação. O compensador definido pelas constantes de tempo T_C e T_S é responsável pela diminuição do ganho a altas frequências, sendo a malha de realimentação definida pelo ganho K_F e constante de tempo T_F responsável pela estabilização da regulação da tensão. Por último, o amplificador definido pela constante de tempo K_A e ganho T_A é caracterizado pelos seus valores máximos e mínimos de saída.

Assim sendo, a excitatriz pode ser descrita por:

$$E_{ef} = K_E E_X + S_E(E_X) E_X + T_E \frac{dE_X}{dt} \quad (3.16)$$

Omitindo a parcela que representa a saturação característica do sistema de excitação DC1A, a equação que representa a função de transferência é a seguinte:

$$\frac{E_X}{E_{ef}} = \frac{1}{K_e + sT_e} \quad (3.17)$$

Sendo E_X e E_{ef} a tensão de saída V_f e a entrada do regulador implementadas no *SimPowerSystems*, respectivamente.

3.2.6 Regulador de Velocidade

O regulador de velocidade representado no esquema da figura 3.2 é responsável pela capacidade de resposta a oscilações de frequência que a unidade de produção apresenta. Como já referido ao longo do capítulo 3 e frisado no capítulo 4, as capacidades de alteração da produção de energia activa estão reservadas aos grupos geradores convencionais que possuem máquinas primárias diesel/fuel.

3.2.6.1 Máquina Primária Diesel

As máquinas diesel e os reguladores de velocidade a elas associados têm um papel fundamental na análise de comportamentos de estabilidade dinâmica em sistemas isolados.

A representação do comportamento mecânico de um motor diesel é efectuada pelo modelo simplificado apresentado na figura 3.5. Esta modelização considera que o rendimento do motor é unitário, não havendo perdas mecânicas. As alterações de potência na saída do controlador são consequência directa dos desvios de velocidade, não sendo consideradas as variações de fluxo de combustível do modelo apresentado na figura 3.6. Por último, a função de transferência de primeira ordem representa o atraso na resposta do motor e os limites de potência são impostas na saída do controlador.

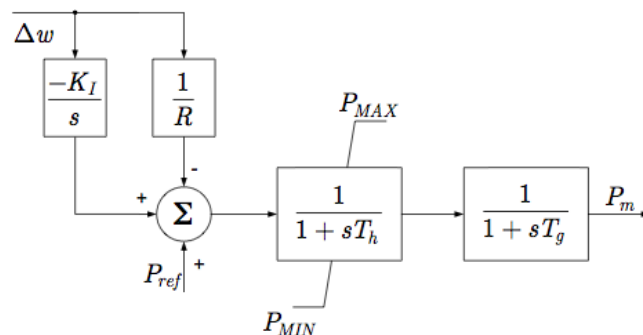


Figura 3.5: Modelo simplificado da máquina primária diesel com regulador de velocidade

Onde:

K_I — ganho integral do controlador

R — estatismo

P_{ref} — potência de referência

P_{MAX} e P_{MIN} — potência máxima e mínima de saída

T_b — constante de tempo do controlador (s)

T_g — constante de tempo do motor diesel (s)

P_m — potência mecânica

O modelo simplificado implementado em *MATLAB Simulink* é obtido com base no modelo da figura 3.6.

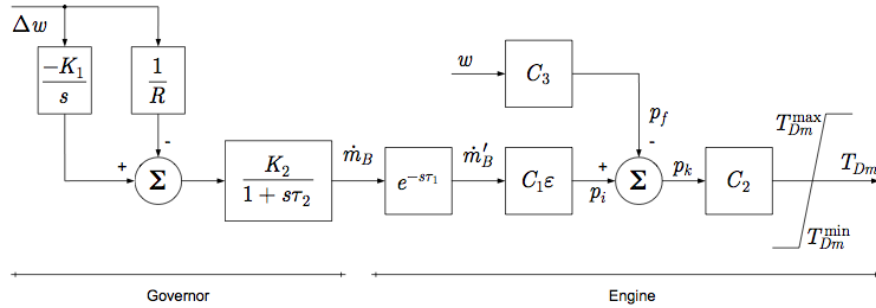


Figura 3.6: Modelo do motor diesel e regulador de velocidade

Sendo:

K_I — ganho integral do controlador

R — estatismo

$\Delta\omega$ — desvio de velocidade angular

ω — velocidade angular

K_2 — ganho do regulador de velocidade (válvula de combustível)

τ_2 — constante de tempo do regulador de velocidade (s)

τ_1 — atraso do motor (s)

ε — eficiência da combustão

C_1 — constante que relaciona a velocidade de queima de combustível com ε e p_i

C_2 — constante que relaciona o binário gerado T_{Dm} com p_k

C_3 — constante que relaciona ω com as perdas mecânicas p_f

p_i — potência gerada

p_f — potência de perdas mecânicas

p_k — potência mecânica disponível à saída

T_{Dmax} e T_{Dmin} — limites do binário de saída

T_{Dm} — binário de saída

Neste modelo é possível identificar os ganhos proporcional e integral que também caracterizam o modelo simplificado. No entanto, esta modelização considera o ganho e a constante de tempo do actuador que regula o fluxo de combustível.

A eficiência de combustão, a subtração das perdas mecânicas, a relação entre potência desenvolvida e binário gerado, bem como a limitação do binário de saída também fazem parte deste modelo.

Este sistema implementado em ambiente *MATLAB Simulink* é composto por subsistemas que visam simular o comportamento deste tipo de geração.

3.2.6.2 Máquina Primária Geotérmica

Contrariamente à máquina primária diesel apresentada, as máquinas primárias das centrais geotérmicas não possuem qualquer capacidade de regulação de potência activa. Assim sendo, os valores de potência que estas centrais injectam nos respectivos barramentos da rede é constante para qualquer cenário de carga que se possa verificar na rede. Sendo os geradores constituídos por máquinas síncronas trifásicas, estes mantêm a capacidade de regulação de tensão. Como referido na página 19, o sistema de excitação presente nestas centrais é semelhante ao que se encontra nas máquinas convencionais. No entanto, a sua incapacidade de regular a potência activa obriga à substituição do bloco de regulação de velocidade por um valor constante, inferior à unidade, para contabilizar uma percentagem de perdas em relação à potência instalada.

3.3 Máquina Assíncrona

A máquina assíncrona utilizada no presente trabalho não é mais que um modelo clássico de uma máquina de indução trifásica. Existem dois tipos de máquinas de indução que, à semelhança do que acontece nas máquinas síncronas, diferem entre eles na estrutura que apresentam no rotor. O gerador de indução com rotor em gaiola possui um rotor composto de barras de material condutor que se localizam em volta do conjunto de chapas do rotor, curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades. O gerador de indução com rotor bobinado, por seu lado, apresenta um enrolamento trifásico distribuído em torno do conjunto de chapas do rotor.

Este tipo de máquina é a máquina eléctrica de construção mais simples. Estator e rotor são montados solidários, com um eixo comum aos anéis que os compõe, sendo a onda electromagnética produzida pelo enrolamento do estator, uma função senoidal do espaço e do tempo.

O modelo da máquina assíncrona presente na ferramenta de simulação possui dois modos de funcionamento (como motor ou como gerador) que são definidos pelo sinal do binário binário aplicado.

3.3.1 Descrição Matemática

O comportamento eléctrico do gerador assíncrono é descrito por [4]:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (3.18)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (3.19)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (3.20)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (3.21)$$

$$T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (3.22)$$

Sendo os fluxos dados por:

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (3.23)$$

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (3.24)$$

$$\phi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (3.25)$$

$$\phi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (3.26)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.27)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (3.28)$$

Onde:

R_s — Resistência do estator

R'_r — Resistência do rotor

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

L_{ls} — Indutância de fugas do estator

L'_{lr} — Indutância de fugas do rotor

L_m — Indutâncias de magnetização

L_s, L'_r — Indutâncias totais do estator e do rotor

ϕ — Fluxo

3.3.2 Circuito Equivalente da Máquina Assíncrona

O circuito equivalente da máquina assíncrona é apresentado na figura 3.7. O modelo eléctrico da máquina é representado por um sistema de quarta ordem, sendo todos os parâmetros referidos em relação ao estator.

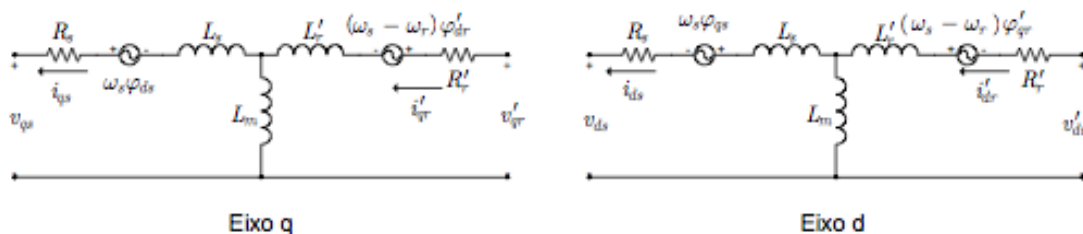


Figura 3.7: Circuito equivalente representativo da máquina assíncrona, sistema de eixos dq

Todas as grandezas estão representadas num sistema de eixos dq que roda à velocidade síncrona ω_s . Uma vez que o eixo q se encontra adiantado 90° em relação ao eixo de fluxo máximo (d), a tensão v_{ds} é sempre nula, sendo a tensão v_{qs} a tensão nos terminais do estator da máquina v_s .

3.3.3 Descrição do Comportamento Mecânico

A equação de movimento da máquina é expressa por 3.29 e 3.30:

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m) \quad (3.29)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m \quad (3.30)$$

Sendo:

θ_m — Posição angular do rotor

ω_m — Velocidade angular do rotor

H — Constante de inércia combinada (rotor e carga)

T_e — Binário electromagnético

T_m — Binário mecânico

F — Coeficiente de viscosidade combinada (rotor e carga)

3.3.4 O Modelo da Máquina Assíncrona em *MATLAB Simulink*

O gerador assíncrono utilizado no modelo é composto por uma entrada que define o seu modo de funcionamento. Quando o binário mecânico T_m é positivo, a máquina funciona como motor, funcionando como gerador quando T_m é negativo.

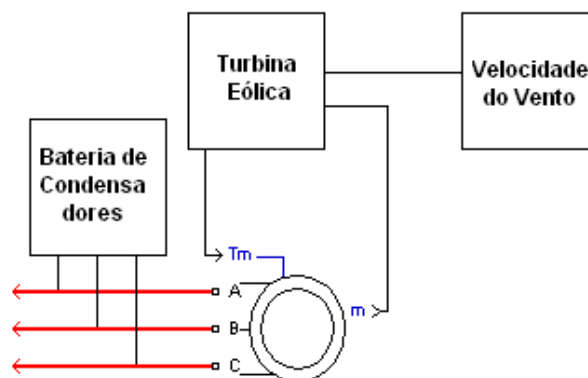


Figura 3.8: Modelo da máquina assíncrona

Como se pode verificar no modelo de máquina assíncrona apresentado na figura 3.8, o binário mecânico aplicado na máquina síncrona é obtido com base em dois parâmetros. A velocidade do

rotor da máquina síncrona (obtida de m) e a velocidade do vento definem o binário T_m à saída da turbina eólica que é aplicado no veio da máquina assíncrona.

Contrariamente às máquinas síncronas, a máquina assíncrona não possui excitatriz, sendo por isso necessário colocar uma bateria de condensadores que alimente a energia reactiva absorvida pela máquina. O esquema base de funcionamento da máquina assíncrona apresentado na figura 3.8 representa, de uma forma geral, a forma de regulação do gerador assíncrono utilizado na simulação dinâmica.

3.3.5 Parque Eólico

A modelização de um PE em ambiente *MATLAB Simulink* está sujeita às mesmas variáveis de controlo apresentadas no modelo da máquina assíncrona. Constituído pelos quatro módulos apresentados na figura 3.8, o sistema implementado possui características próprias. O módulo que simula as turbinas eólicas presentes num PE é constituído por um subsistema apresentado na figura 3.9.

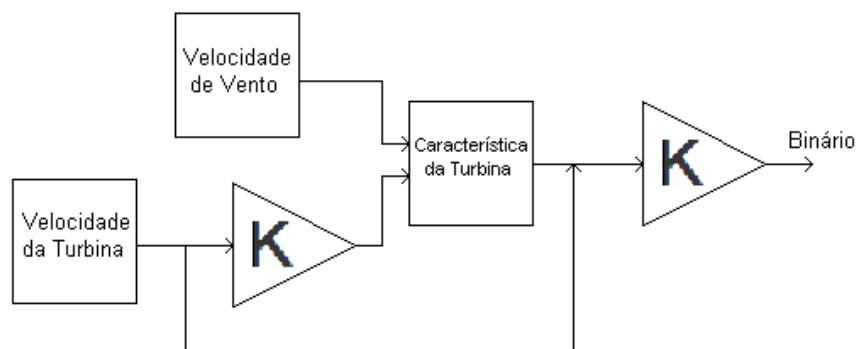


Figura 3.9: Modelo da turbina eólica

Este sistema agrega as velocidades do vento e da turbina eólica que correspondem a um binário mecânico aplicado no veio da máquina assíncrona. A agregação destes dois valores de velocidade é essencial para simular o que acontece quando ocorrem variações bruscas da velocidade do vento. Desta forma, a velocidade da turbina eólica não responde de forma imediata a alterações de velocidade.

A única verdadeira variável de controlo presente no modelo do PE implementado é a velocidade do vento. Esta variável é a responsável pelas alterações bruscas de produção das turbinas eólicas, bem como a ultrapassagem de valores máximos e mínimos de funcionamento. Todas as restantes variáveis apresentadas nesta secção representam características intrínsecas dos grupos aerogeradores, pelo que apenas podem ser consideradas condicionantes físicas e/ou de operação da turbina eólica específica aqui considerada.

O bloco que apresenta a característica da turbina é o responsável pela resposta dada pela turbina às velocidades de entrada. Na figura 3.10 é apresentada a característica da turbina eólica que associa um valor de potência à velocidade do vento e do gerador assíncrono.

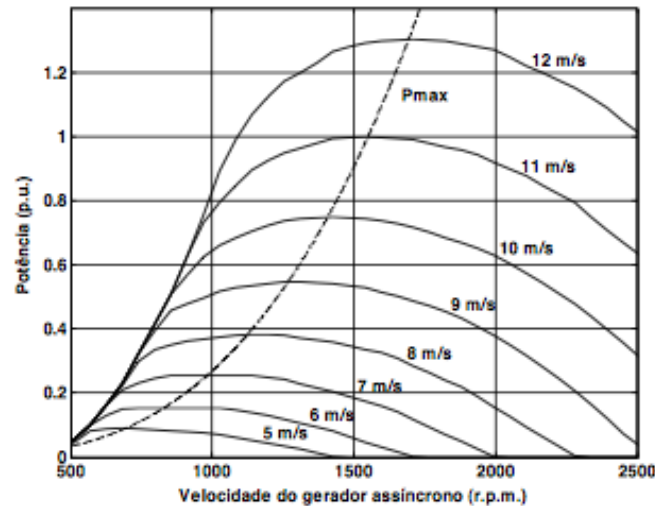


Figura 3.10: Característica de uma turbina eólica

3.4 Veículos Eléctricos

Para modelizar correctamente o interface rede/VE é necessário não só definir estratégias de controlo adequadas, como também o tipo de inversor utilizado.

A funcionalidade *vehicle-to-grid* obriga à modelização de um interface de electrónica de potência bidireccional, que acomode a injeção de potência por parte dos VE.

3.4.1 Ligação de Conversores Electrónicos de Potência à Rede

A massiva integração de conversores electrónicos de potência que o controlo de carga dos veículos eléctricos acarreta, apresenta características distintas dos sistemas eléctricos convencionais, altamente baseados na sua unidade básica, a máquina síncrona.

As estratégias de controlo de potência num sistema AC são, geralmente, divididas em dois tipos [19]. No entanto, a modelização dos VE baseia-se numa filosofia de controlo da rede através do inversor PQ. Este inversor é usado para definir um valor de potência activa e reactiva. Quando opera ligado à rede, o valor definido é injectado no sistema. Este tipo de inversor não é capaz de suportar a rede por si só impondo uma onda de tensão com amplitude e frequência aceitáveis.

No método representado pelo sistema da figura 3.11 são calculadas as componentes instantâneas de corrente do inversor. A componente activa é usada para controlar a tensão da ligação DC e consequentemente a saída de potência activa do inversor, por forma a nivelar a bateria do VE com

a potência activa do inversor. A componente reactiva por sua vez, controla a saída de potência reactiva do inversor.

As variações de potência na bateria do VE provocam uma variação na tensão de ligação DC que é corrigida pelos reguladores PI-1 e PI-2. Estes reguladores proporcionais-integrais são os responsáveis pelo ajuste da corrente activa e reactiva. Como já referido ao longo deste trabalho, a componente reactiva da potência não é considerada relevante para o estudo apresentado. Assim sendo, a componente reactiva do modelo (Q_{ref} em 3.11) é definida e assume o valor zero.

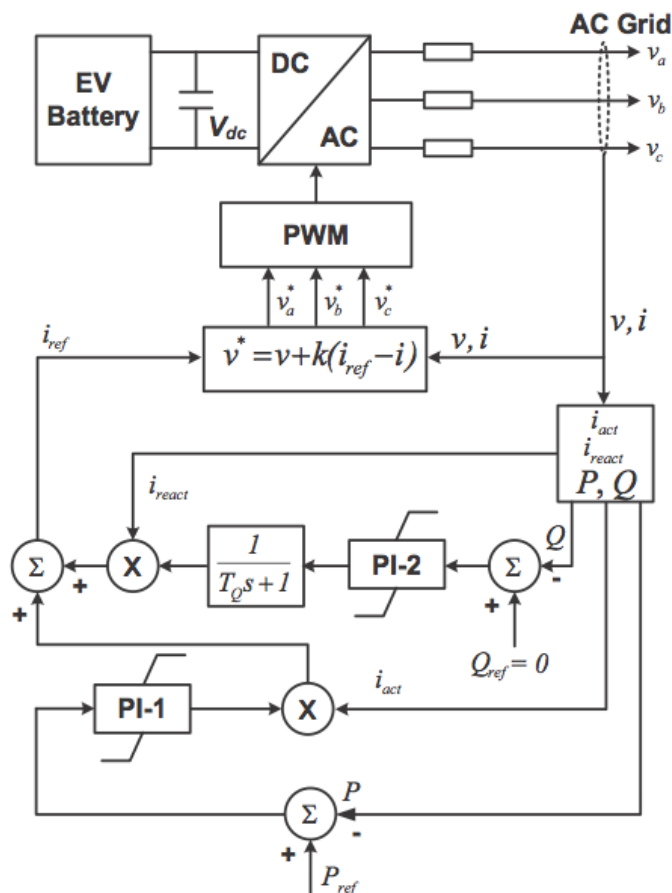


Figura 3.11: Sistema de controlo inversor PQ

Com base no conceito apresentado na figura 2.5 é adoptado um sistema que permite ajustar o *setpoint* de potência activa (P_{ref} em 3.11) no interface inversor PQ rede/VE. O sistema de controlo descrito na figura 2.6 apresenta-se como um interface *smart grid* aplicado ao conceito dos veículos eléctricos, permitindo um controlo local da potência activa, com base a alterações de frequência na rede.

Com a agregação dos modelos apresentados nas figuras 3.11 e 2.5, o controlo da potência activa injectada/consumida na rede passa a ser controlado pela definição dos parâmetros P_L e K_P em 2.5. Estes parâmetros são responsáveis pelos vários métodos de controlo apresentados nas secções seguintes.

Dada a rápida resposta que caracteriza os conversores electrónicos de potência, quando é analisado o comportamento da rede onde estes são inseridos, os inversores são modelizados com base nas suas funções de controlo, sendo negligenciados transitórios de comutação, harmónicos e perdas. Esta abordagem é procedimento geral, sendo adoptada em diversos estudos de estabilidade dinâmica com interfaces de electrónica de potência [20], [21] e [22].

3.4.2 O Modelo dos Veículos Eléctricos em *MATLAB Simulink*

Neste trabalho a modelização dos VE é efectuada com base no modelo de carga dinâmica fornecido pelo *SimPowerSystems*. Este modelo mais simples permite injectar/consumir um determinado valor de potência, apresentando por isso funcionalidade semelhante ao inversor PQ.

A carga dinâmica utilizada na simulação dinâmica apresenta valores de potência activa (P) e reactiva (Q) que variam em função da tensão. A impedância da carga é mantida constante se a tensão aos seus terminais é menor que um V_{min} especificado. No entanto, quando o valor nos terminais é superior a V_{min} a variação das potências activa e reactiva é descrita por:

$$P(s) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \frac{(1 + T_{p1}s)}{(1 + T_{p2}s)} \quad (3.31)$$

$$Q(s) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \frac{(1 + T_{q1}s)}{(1 + T_{q2}s)} \quad (3.32)$$

Sendo:

V_0 — Tensão inicial

P_0 e Q_0 — Potências activa e reactiva iniciais

V — Tensão corrente contínua

n_p e n_q — Expoentes que controlam a natureza da carga

T_{p1} e T_{p2} — Constantes de tempo que controlam a dinâmica da potência activa

T_{q1} e T_{q2} — Constantes de tempo que controlam a dinâmica da potência reactiva

A variação da percentagem de carga controlável dos VE é implementada neste modelo pelo sistema representado na figura 3.12. Sendo P_L o parâmetro do modelo que define a carga sujeita a controlo, este valor representa, a potência das baterias dos VE que são controláveis.

Com o objectivo de integrar num só módulo toda a carga dos VE (controlável ou incontrolável), o valor da carga que não é controlável é adicionado à saída que define o *set point* de potência no inversor PQ. Importa referir que, este valor de potência não está sujeito a qualquer acção de controlo por parte do interface de electrónica de potência.

O parâmetro K_P em 3.12 é responsável pela resposta do sistema ao desvio de frequência presente na rede. É nesta função que se definem os tipos de funcionamento dos VE.

Como descrito nas secções seguintes, o bloco K_P é alterado em função do tipo de funcionamento que se pretende analisar. Importa também referir que o bloco que analisa a variação de frequência na rede tem um papel fundamental na separação dos modos de funcionamento como

carga dinâmica. Neste bloco é analisado o sentido de variação que a frequência apresenta tendo, uma mesma função de controlo definida em K_P , "caminhos" diferenciados com base no sinal de variação de Δf analisado.

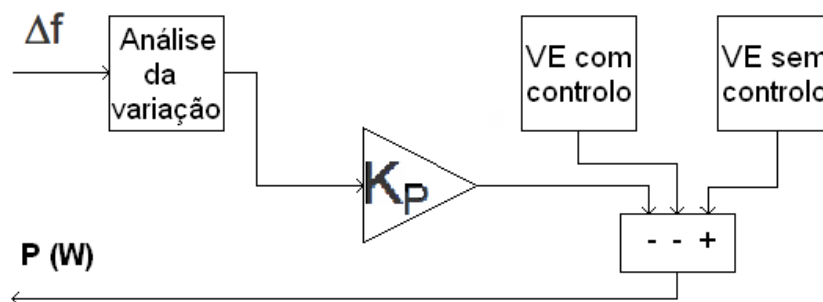


Figura 3.12: Sistema de controlo de potência activa nos VE

3.4.3 Controlo do Interface

Na modelização do interface rede/VE torna-se necessário definir a estratégia de controlo adoptada nestas ligações. Na estratégia de controlo descrita em [23] o interface com a bateria do VE é modelizado como um inversor PQ. Nesta estratégia, como descrito na secção anterior, o inversor está ligado à rede, sendo usado para fornecer valores de potência activa e reactiva especificados.

Como referido ao longo do capítulo 2, os veículos eléctricos, quando ligados à rede podem ser considerados de três formas distintas. Quando os veículos são ligados à rede sempre que o proprietário o deseja, carregando a bateria com uma cadência constante, são considerados de carga simples. No entanto, quando são definidos intervalos de tempo para carga, havendo lugar a ajustes de potência, o carregamento das baterias dos VE é considerado de carga dinâmica. A carga dinâmica pode, no entanto, injectar potência activa na rede, sendo considerada como um dispositivo de armazenamento (*Vehicle-to-grid*).

No caso de estudo apresentado nesta dissertação é definida uma *dead band* de 0.5 Hz, sendo a tolerância de 0.25 Hz na subida ou descida da frequência da rede. Para desvios de frequência superiores à *dead band* definida, a bateria dos VE vai responder segundo a função de controlo de K_P . Se o desvio de frequência for positivo, a carga dos VE ligada à rede absorve potência da rede sem limitações. No entanto, se o desvio de frequência for negativo, a bateria diminui a carga ou pode mesmo injectar potência activa quando funciona em modo *vehicle-to-grid*.

3.4.3.1 Carga Não Controlável

O carregamento das baterias dos VE, quando efectuado sem qualquer controlo, é considerado o de uma carga simples. De facto, quando o proprietário de uma viatura com estas características pretende carregar as baterias pode simplesmente ligar o VE à tomada que este irá ser carregado

de acordo com uma determinada taxa de carregamento fixa. Este modo de funcionamento dos VE ligados à rede é o mesmo de qualquer outro equipamento eléctrico que absorve potência da rede sempre que necessário, sem restrições.

Esta abordagem de carga é implementada no sistema de controlo, não havendo potência controlável. Toda a carga ligada pelo inversor PQ absorve potência da rede sem responder a qualquer alteração na frequência da rede.

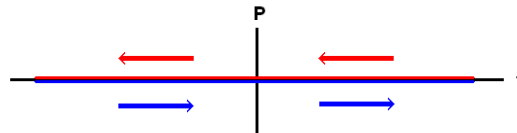


Figura 3.13: Função de controlo no modo carga simples

A função de controlo implementada neste modo de funcionamento é apresentada em 3.13. Não havendo definição do *set point* no inversor 3.11, as baterias dos VE ligados à rede estão a absorver da rede o valor de potência definido para as baterias como cargas simples.

Face à abordagem seguida nas secções seguintes, o objectivo da sua utilização prende-se com a modularidade apresentada num mesmo sistema de interface em todos os modos de funcionamento. Contudo, a implementação de uma carga simples com o valor de potência definido para os VE alcançaria o mesmo resultado.

3.4.3.2 Carga Controlável

A gestão das ligações dos VE à rede e a sua forma de interacção com esta são muito importantes para as condições de exploração do sistema. Se por um lado, a penetração de veículos eléctricos na rede sem alterações e avultados investimentos na alteração da sua estrutura é largamente potenciada por uma gestão inteligente da sua carga [14], [24] e [25], por outro, como referido em [15], a sua participação no controlo dinâmico da estabilidade do sistema permite maximizar a integração de fontes intermitentes de energia renovável em redes isoladas.

O conceito de carga regulável é implementado com base na ligação inversor PQ apresentada na página 28. A variação do *set point* de potência fornecida pelo sistema de controlo de potência activa nos VE é obtida pela função de controlo K_P utilizada em 3.12. Esta função fornece uma relação directa entre frequência e potência sendo responsável pela definição do ajuste de potência de carga da bateria necessária à estabilização da rede.

Contrariamente à função exemplo da figura 2.6, a função definida em K_P para o modo de funcionamento como carga regulável apresenta respostas diferenciadas para a subida e descida da variação de frequência da rede.

A banda morta implementada tem como principal objectivo aumentar a fiabilidade e durabilidade das baterias dos VE ligadas à rede. Esse objectivo é alcançado com base numa ausência de controlo da carga para uma gama de frequências dentro da zona de segurança. No entanto,

se for utilizada a mesma função de controlo na religação de carga, o impacto que esse aumento representa para a rede em termos de queda de frequência provoca um loop descontrolado em torno dos limites da *dead band* 3.15.

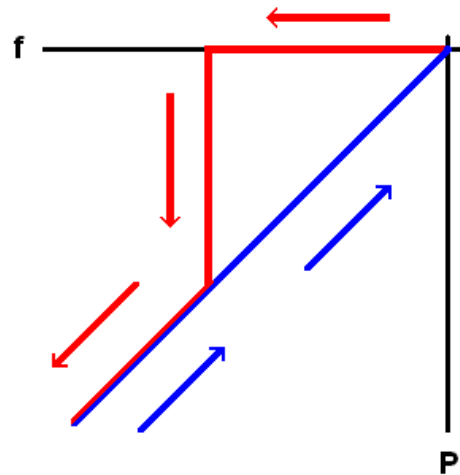


Figura 3.14: Função de controlo no modo carga regulável

O aumento repentino de carga provoca problemas de estabilidade dinâmica que dificultam o objectivo da participação dos VE na estabilização da frequência da rede. As preocupações com a fiabilidade das baterias que levaram à implementação da *dead band* podem mesmo ficar inviabilizadas com esta abordagem.

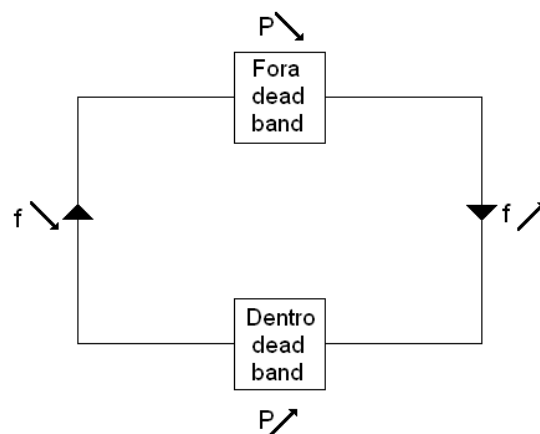


Figura 3.15: Loop descontrolado provocado pelo aumento de carga

Com base nestes pressupostos, a função de controlo K_P implementada no modo funcionamento de carga regulável é descrita na figura 3.14.

3.4.3.3 *Vehicle-to-grid*

O modo de funcionamento *vehicle-to-grid* é um modo de funcionamento de carga regulável que permite a injeção de potência na rede. Assim sendo, neste modo de funcionamento, a bateria dos VE pode, não só absorver potência da rede para carregar, como também fornecer serviços de suporte da estabilidade com injeção de potência. Esta capacidade de se comportar como um dispositivo de armazenamento de energia altamente controlável acarreta mais valias desconhecidas nos restantes modos de funcionamento apresentados.

Utilizando o mesmo interface inversor PQ na ligação com a rede, a função de controlo é adaptada a esta nova funcionalidade de participação activa na estabilização da frequência. Se, no modo de carga controlável, apenas é possível diminuir a carga para subir a frequência até ao seu valor nominal, no modo *vehicle-to-grid*, além de ser possível diminuir a carga, é possível injectar potência na rede e atingir de forma mais célere o reequilíbrio dinâmico do sistema.

Assim sendo, na figura 3.16 é apresentada a nova função de controlo implementada neste modo de funcionamento. De forma análoga ao controlo efectuado na secção anterior, a função de controlo é expandida para permitir a injeção de potência na rede.

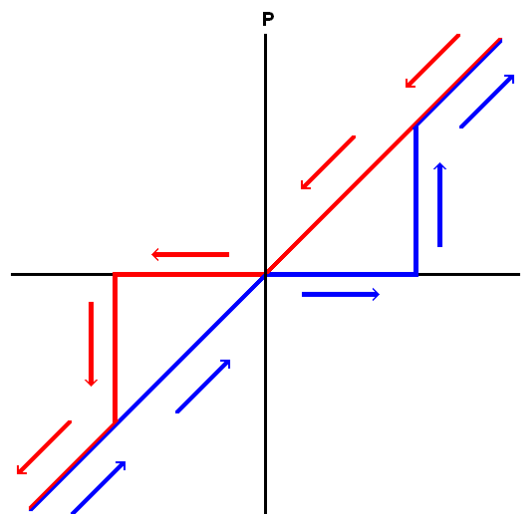


Figura 3.16: Função de controlo no modo *Vehicle-to-grid*

Como referido na página 13, a implementação de uma margem de inatividade de controlo visa garantir a durabilidade dos componentes que intervêm na reposição da estabilidade da rede. Por esse motivo, a função de controlo no modo *vehicle-to-grid* mantém a *dead band* mesmo quando o VE é chamado a injectar potência activa no sistema. De forma complementar ao explicado na figura 3.15, a diminuição da injeção de potência activa na rede por parte dos veículos eléctricos não pode ser repentina. Sendo os VE parte do suporte de estabilidade da rede na eventualidade de falhas de produção em fontes de energia renováveis intermitentes (produção eólica), a diminuição brusca de injeção de potência activa no sistema seria equivalente a uma perda de geração

instantânea de potência igual à carga controlável, o que provocaria uma queda de frequência acentuada. Por este motivo, a redução de injeção de potência é gradual até a frequência da rede ter estabilizado.

3.5 Conclusões

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos dos principais componentes utilizados na modelização da rede isolada. São descritas formulações matemáticas, circuitos equivalentes e principais considerações de funcionamento usadas na modelização do sistema.

As formas de controlo implementadas nos modelos de máquina síncrona, assíncrona e veículos eléctricos são explicadas com espírito crítico, fornecendo soluções que visam simular as reais condições de exploração analisadas.

À componente de controlo dos VE é dada especial relevância, uma vez que é através da sua modelização que o impacto da integração dos veículos eléctricos em redes isoladas é analisado, em especial no que diz respeito à manutenção da estabilidade dinâmica.

Capítulo 4

Descrição da Rede, Cenários e Metodologia de Análise

Com base nos modelos descritos no Capítulo 3, nesta fase do trabalho é caracterizada a rede eléctrica da ilha de S. Miguel, que serve de base para analisar a integração de veículos eléctricos em redes isoladas, sendo ainda descritos os cenários de estudo.

Na rede eléctrica alvo de estudo, as máquinas síncronas são utilizadas por dois tipos de máquina primária. Se, na Central Térmica do Caldeirão, a geração por grupos diesel possui capacidade de regulação de potência activa e reactiva, nas centrais geotérmicas do Pico Vermelho e da Ribeira Grande, a geração apenas possui capacidade de regulação de energia reactiva.

Apesar de não serem parte integrante do SEE de S. Miguel no presente, os VE e o PE previstos são modelizados por forma a representarem a sua futura integração na rede. O parque eólico dos Graminhais, é modelizado através de uma máquina assíncrona que tem como entrada a velocidade do vento. Esta modelização, expõe o pior caso de reacção do parque à perda do vento. Como consome reactiva de uma bateria de condensadores colocada na ligação à rede AT/MT, a ausência de controlo da máquina de indução do PE não introduz inércia no sistema, estando a inércia reservada aos grupos diesel de CTCL. Os veículos eléctricos por sua vez, são modelizados como carga variável, controlada de forma específica em cada regime de funcionamento como explicado ao longo do capítulo 3.

4.1 Caracterização da Rede Eléctrica Isolada da Ilha de S. Miguel

A rede de transporte de energia eléctrica de S. Miguel é gerida pela EDA (Electricidade dos Açores). Apesar de ser a principal ilha do arquipélago dos Açores, a ilha possui uma rede isolada, de pequenas dimensões que não possui qualquer ligação a redes eléctricas externas.

O sistema electroprodutor é constituído por diversas fontes de energia. No entanto, apenas são tidas em consideração as produções mais relevantes no presente (diesel e geotérmica). Devido à

SELG. Nestas situações, as perdas a rede foram desprezadas bem como os níveis de tensão, uma vez que se trata de um estudo de frequência e as condições em regime estacionário estão garantidas. A figura 4.3 ilustra a rede utilizada, onde são mantidos os elementos relevantes para a análise dinâmica.

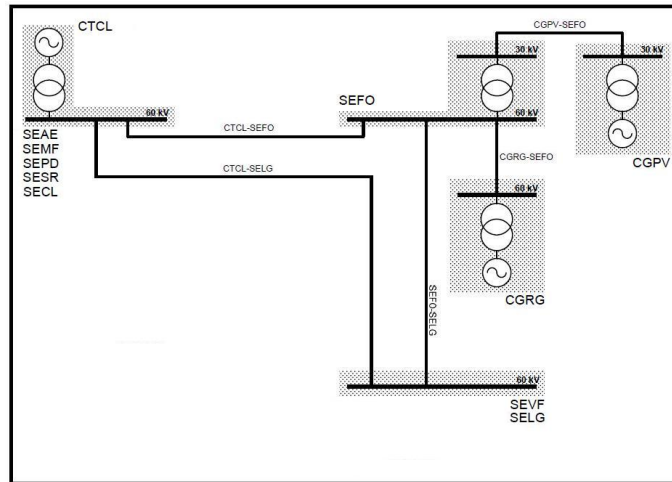


Figura 4.3: Esquema unifilar simplificado da rede de transporte AT/MT da ilha de S. Miguel

4.1.1 Produção Actual

4.1.1.1 Produção Térmica Convencional

A produção térmica convencional na ilha de S. Miguel encontra-se centralizada na Central Térmica do Caldeirão que incorpora oito geradores convencionais a fuel. Com uma potência total instalada de 98064kW é constituída por quatro grupos de 9,62MVA e quatro de 21,28MVA. Sendo a única central com capacidade de regulação de potência activa é responsável pelas operações de regulação P/f na rede.

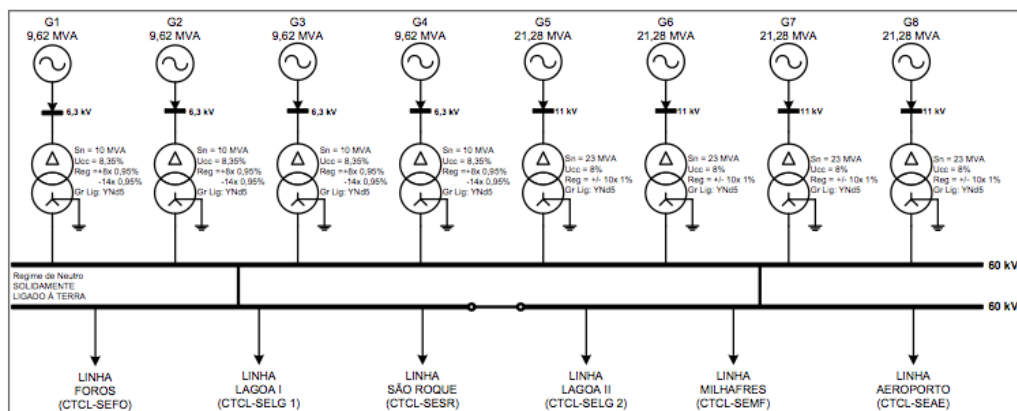


Figura 4.4: Esquema unifilar da Central Térmica do Caldeirão

4.1.1.2 Produção Geotérmica

Os Açores são um arquipélago de origem vulcânica. Com base nisso, existem vários aproveitamentos geotérmicos para produção de energia que garantem uma boa base do diagrama de cargas diário de S. Miguel. A Central Geotérmica do Pico Vermelho possui apenas um gerador de 16,25MVA com uma potência instalada de 13MW. Injecta em permanência na rede cerca de 11MW de potência.

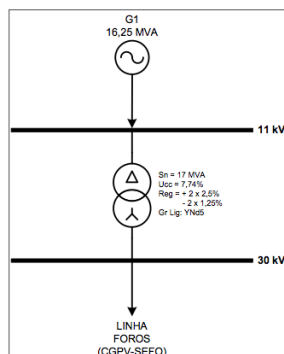


Figura 4.5: Esquema unifilar da Central Geotérmica do Pico Vermelho

A Central Geotérmica da Ribeira Grande é constituída por quatro grupos geradores. A potência instalada é de 16600kW distribuída por dois geradores de 3,625MVA e dois de 6,75MVA. Tal como a Central Geotérmica do Pico Vermelho, a Central Geotérmica da Ribeira Grande apenas possui capacidade de regulação de tensão, uma vez que a produção de potência activa não é regulável para efeitos de controlo primário/secundário de frequência. Pela análise do diagrama de carga 4.8, CGRG injecta na rede entre 7MW e 9MW de potência.

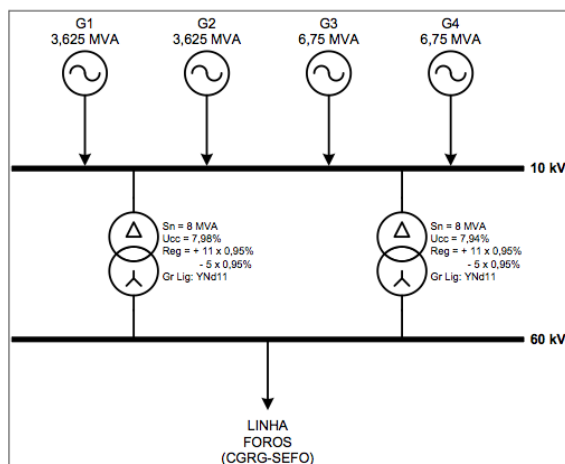


Figura 4.6: Esquema unifilar da Central Geotérmica da Ribeira Grande

Com uma potência total instalada de 29600kW as centrais de produção renovável consideradas (CGPV e CGRG) representam cerca de 25% de toda a potência da ilha (127,664MW).

4.1.2 Produção Futura

A produção futura de S. Miguel será baseada nas actuais capacidades de produção com a adição da produção eólica prevista.

4.1.2.1 Produção Eólica

Contrariamente ao que já sucede em boa parte do arquipélago do Açores, a ilha de S. Miguel não possui nenhum aproveitamento eólico para produção de energia. No entanto, tal cenário está prestes a mudar. Tendo em atenção o elevado potencial e as particulares condições meteorológicas favoráveis que normalmente se encontram numa ilha, está prevista a construção de um parque eólico com instalação faseada de 16 aerogeradores, que será instalado na zona dos Graminhais (figura 4.7). Numa primeira fase, serão instalados dez aerogeradores, sendo os restantes seis instalados numa segunda fase. Para mais tarde está prevista uma substituição dos dez primeiros aerogeradores por unidades de maior potência [27]. Esta abordagem no desenvolvimento do projecto é analisada e explicada nos capítulos 5 e 6, podendo ser considerada como uma consequência das limitações actuais de integração de produção eólica na rede isolada da ilha.

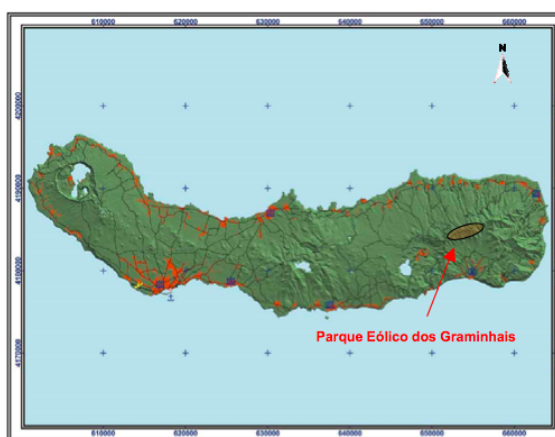


Figura 4.7: Enquadramento geográfico do Parque Eólico dos Graminhais na ilha de S. Miguel

Baseado na potência unitária das torres eólicas a instalar (900kW [28]), a potência total injectada pelo PE dos Graminhais no seu máximo de exploração é de 12,5MW. Como explicado no capítulo 5, este valor de potência tem de ser limitado a 8MW no cenário de vazio actual, uma vez que não existe carga suficiente para garantir os mínimos técnicos na geração em CTCL.

4.1.3 Diagramas de Carga Característicos

Como descrito na Metodologia de Análise em Regime Dinâmico, para cada cenário de carga existe um distribuição de produção que é função da carga que é necessário alimentar e das características das respectivas centrais.

Assim sendo, além dos dois cenários de carga mais relevantes para as análises efectuadas (cheia e vazio), torna-se também muito relevante a análise dos dados fornecidos por [26] em relação aos diagramas de carga característicos da ilha de S. Miguel (figura 4.8). Apenas relacionando os valores de carga com a sua distribuição pelas diversas fontes de energia é possível obter os reais valores de algumas produções.

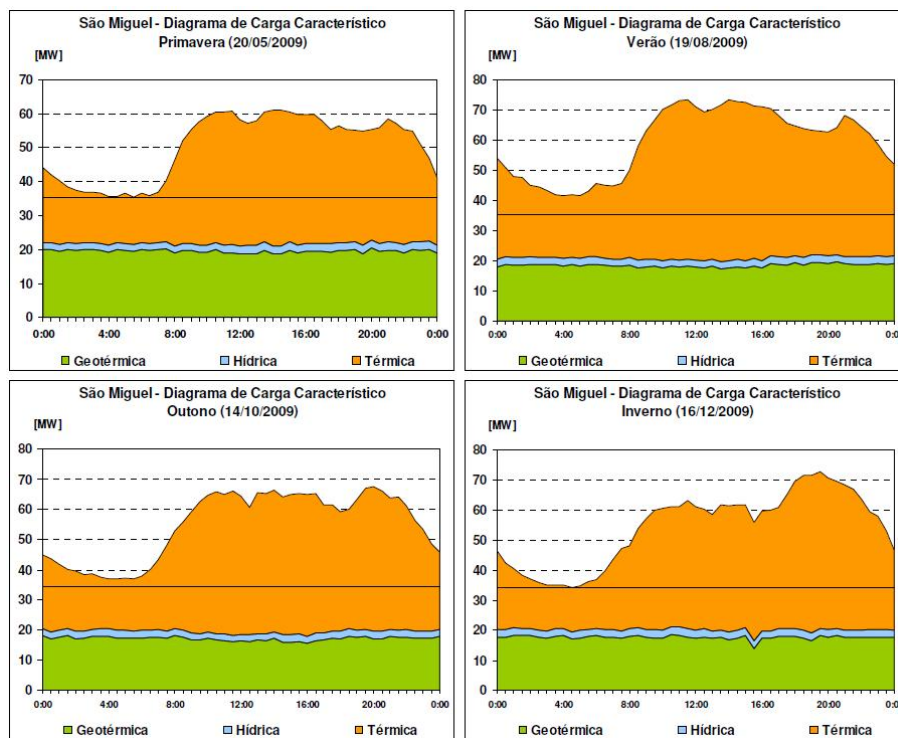


Figura 4.8: Diagramas de carga característicos da ilha de S. Miguel

Pela análise dos diagramas em 4.8, concluí-se que a diferença entre os cenários de cheia e vazio, em termos de produção, resume-se à entrada de funcionamento de mais ou menos geradores térmicos na CTCL. Como já referido, a produção hídrica é desprezada pela sua baixa relevância. Devido ao seu cariz constante ao longo do diagrama de carga, a produção hídrica está englobada na produção renovável geotérmica, nomeadamente em CGRG.

Importa referir que o principal objecto de estudo deste trabalho se centra na análise dinâmica da integração dos veículos eléctricos na rede isolada de S. Miguel. Para essa análise é explorado o cenário de carga que mais fragilidades e problemas de estabilidade apresenta (cenário de vazio). No entanto, com o objectivo de assegurar a estabilidade em regime estacionário é também efectuada uma breve análise aos perfis de tensão ao longo da rede no cenário mais severo de exploração (cenário de cheia), estando desta forma salvaguarda a exploração dos veículos eléctricos e a introdução do parque eólico dos Graminhais.

4.2 Cenários de Carga

4.2.1 Carga Actual

A carga actualmente presente na ilha de S. Miguel situa-se nos 73,61MW no cenário de ponta e 35,78MW no de vazio, não contando com a carga adicional que os VE representam, nem com o aumento de carga de 4MW de crescimento de consumo.

Tabela 4.1: Distribuição da carga actual no cenário de ponta e de vazio sem VE

Subestação	Ponta (MW)	Vazio (MW)
SEAE	5,93	2,35
SECL	4,44	1,72
SEFO	16,13	13,38
SELG	10,72	3,72
SEMF	10,91	5,87
SEPD	19,86	6,27
SESR	5,62	2,47
SEVF	4,28	1,36

A distribuição da carga pelos diversos nós da rede é apresentada na tabela 4.1

4.2.2 Carga Futura

Tendo em consideração a previsão de integração de veículos eléctricos na ilha de S. Miguel, a carga equivalente a 2,5% do parque automóvel bem como um aumento de 4MW de consumo são consideradas no cenário apresentado na figura 4.2. Importa referir que esta nova carga não está distribuída pelos diversos nós da rede. Este facto é analisado e explicado na Metodologia de Análise, onde a abordagem inicial da rede em regime estacionário difere da abordagem seguida durante a análise da estabilidade em regime transitório.

Tabela 4.2: Distribuição da carga futura no cenário de ponta e de vazio com VE

Subestação	Ponta (MW)	Vazio (MW)
SEAE	5,93	2,35
SECL	4,44	1,72
SEFO	16,13	13,38
SELG	18,43	11,43
SEMF	10,91	5,87
SEPD	19,86	6,27
SESR	5,62	2,47
SEVF	4,28	1,36

4.2.2.1 Aumento de Carga

Os valores de potência apresentados nas figuras 4.5 e 4.6 têm o objectivo de alimentar a carga actualmente presente na ilha de S. Miguel nos dois cenários extremos do diagrama de carga. No entanto, tal como explicado em [29], [27] e [28], a situação de exploração da rede está prestes a ser alterada. Esta alteração não se refere apenas à produção, mas também à própria carga.

Tendo em consideração a integração do PE dos Graminhais na rede da ilha em 2015, a carga presente na ilha nesse cenário de futuro é actualizada em 4MW adicionais. Face aos valores de carga actualmente existentes, este aumento corresponde a um crescimento anual de cerca de 2% da quantidade de carga a alimentar.

4.2.2.2 Veículo Eléctrico

Com base em informações obtidas em [30], o parque automóvel seguro de S. Miguel situa-se actualmente em valores perto dos 60000 veículos (tabela 4.3). Considerando uma potência média por veículo de 3kW [14] é possível obter o valor de carga que os veículos eléctricos podem representar no sistema em causa.

Na análise da integração dos VE na rede isolada de S. Miguel torna-se necessário expôr o seu impacto com recurso ao menor número de iterações possível. Assim sendo, a análise efectuada baseia-se em apenas um cenário de integração de veículos eléctricos de 2,5% do parque automóvel. Este cenário, adequa-se à janela temporal de instalação do parque eólico dos Graminhais e à evolução prevista, assumida por muitos construtores automóveis, de integração de veículos eléctricos nesse mesmo espaço de tempo.

Tabela 4.3: Parque automóvel seguro em S. Miguel

Categorias	2009
Total Ligeiros	51429
Total Pesados	1230
Total Agrícolas	1727
Total Motociclos e Ciclomotores	3656
Diversos	517
Total de S. Miguel	58559

Assentes neste cenário de integração único, são criados cenários de participação da carga na exploração da rede eléctrica. A carga dos VE é dividida em carga sem regulação e carga com regulação, sendo a aceitação de participação na gestão da exploração da rede por parte dos clientes distribuída em quatro patamares distintos. Assim sendo, a carga total que os 2,5% de integração de VE representa (3958kW) é controlada como descrito na tabela 4.4 ao longo da análise da simulação dinâmica no capítulo 5.

Tabela 4.4: Cenários de participação dos VE no controlo de carga

Participação Carga	Regulável (KW)	Fixa (KW)
0%	0	3958
50%	1979	1979
100%	3958	0

4.3 Cenários de Produção

4.3.1 Despacho Actual

A distribuição de produção pelas centrais consideradas na rede no actual regime de funcionamento é apresentada na tabela 4.5. Como se pode comprovar, as diferenças de produção entre os dois cenários resume-se à entrada de mais ou menos grupos geradores na CTCL. As centrais geotérmicas apresentam valores de potência constantes, como seria de esperar, havendo apenas uma pequena diferença na CGRG entre os meses de Verão e Inverno.

Tabela 4.5: Distribuição da produção no cenário de ponta e de vazio sem PE

Central	Ponta (MW)	Vazio (MW)
CTCL	55,61	17,78
CGPV	11	11
CGRG	9	9

Apesar de não existir nenhum parque eólico instalado na ilha de S. Miguel são considerados os mesmos cenários descritos em 4.5. Nesta situação, apresenta-se em 4.6 a distribuição das produções nas três centrais existentes (CTCL, CGPV e CGRG) e no futuro PE do actual valor de carga presente na ilha. O valor de 8MW apresentado é justificado na análise do regime dinâmico ao longo do capítulo 4.

Tabela 4.6: Distribuição da produção no cenário de ponta e de vazio com PE

Central	Ponta (MW)	Vazio (MW)
CTCL	47,61	9,78
CGPV	11	11
CGRG	9	9
PE	8	8

Importa referir que, o parque eólico considerado será instalado na zona dos graminhais a 30kV, como descrito em [29], [27] e [28]. Assim sendo, pela proximidade e pela tensão de exploração nesse ponto da rede, a ligação do PE é efectuada na SELG, juntamente com SEVF.

4.3.2 Despacho futuro

A produção futura considerada apresenta o despacho da tabela 4.7. Esta produção considera um aumento total de carga de 7,9MW.

Tabela 4.7: Distribuição da produção no cenário de ponta e de vazio com PE

Central	Ponta (MW)	Vazio (MW)
CTCL	50,81	12,98
CGPV	11	11
CGRG	9	9
PE	12,5	12,5

4.4 Metodologia de Análise

Nesta secção é apresentada a metodologia utilizada na análise da integração de veículos eléctricos na rede isolada da ilha de S. Miguel. Apesar de não fazer parte dos objectivos da presente dissertação, a análise da rede eléctrica em regime estacionário é efectuada durante o processo de construção do modelo dinâmico. Com esta abordagem, pretende-se garantir as condições adequadas de exploração da rede, quer no presente (cenário de cheia) quer no futuro (com todas as alterações propostas, nomeadamente a introdução do PE e o aumento de carga e dos VE em torno do vazio).

4.4.1 Regime Estacionário

A confirmação de viabilidade de exploração em regime estacionário do sistema eléctrico aqui apresentado, está dividida em duas partes distintas. Sendo inicialmente analisado o cenário de vazio (por ser este o alvo da análise dinâmica), rapidamente se torna evidente que o alvo da análise estacionária deve incidir antes no cenário de cheia.

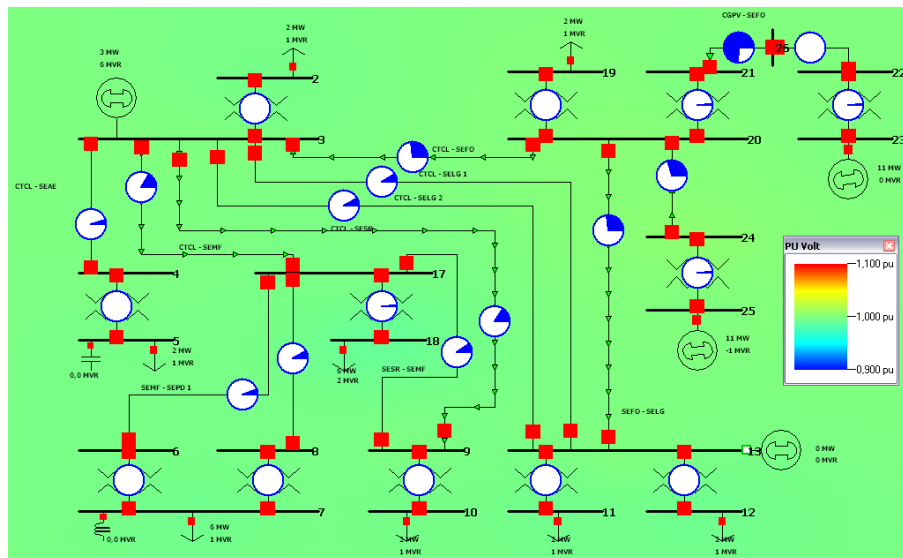


Figura 4.9: Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de vazio sem PE

Esta abordagem, permite garantir que a rede eléctrica isolada da ilha de S. Miguel estará sempre dentro dos limites das tensões de funcionamento e níveis de congestionamento nas linhas

exigidas por [6]. Na situação presente, a rede descrita em 4.2 é transposta para o PowerWorld, onde se confirmam as actuais condições de exploração.

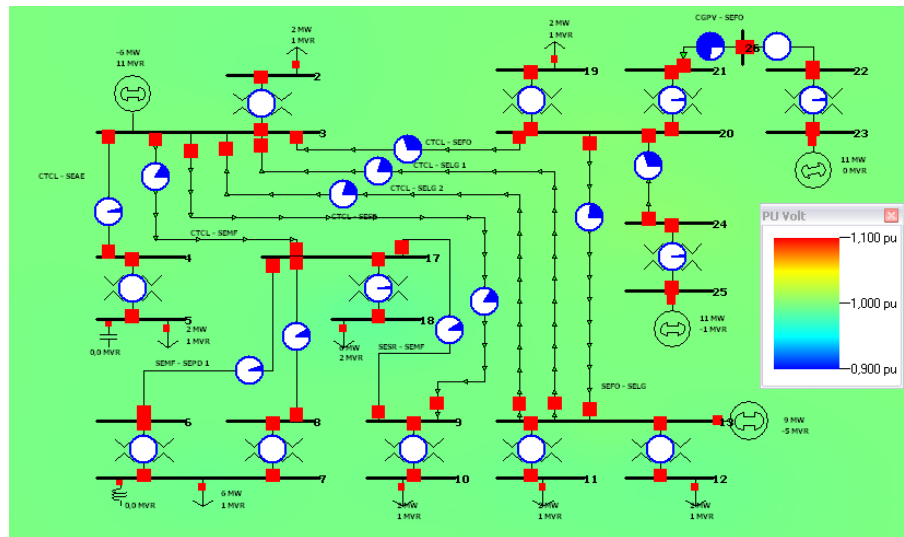


Figura 4.10: Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de vazio com PE

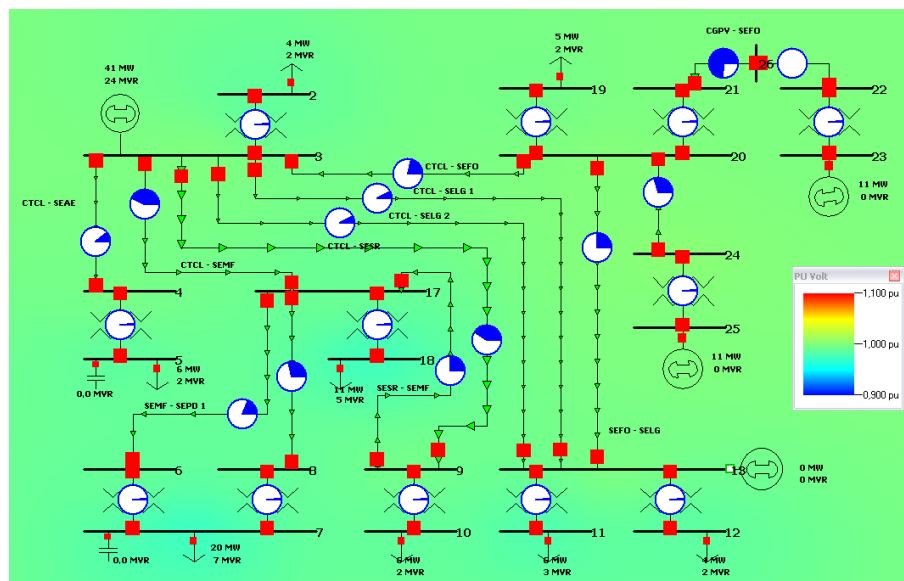


Figura 4.11: Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de ponta sem PE

Na figura 4.9 são apresentados os níveis de tensão presentes na rede em regime normal de exploração no cenário que é a base da análise dinâmica. Uma vez que o cenário de vazio é o mais indicado para explorar a interacção entre PE e VE, a análise é centrada neste cenário de exploração, sendo os resultados e conclusões presentes nos capítulos 5 e 6 baseadas apenas neste cenário de exploração. Indo de encontro à previsão de produção renovável do parque eólico dos Graminhais, na figura 4.10 é apresentada a análise em regime estacionário de exploração da rede.

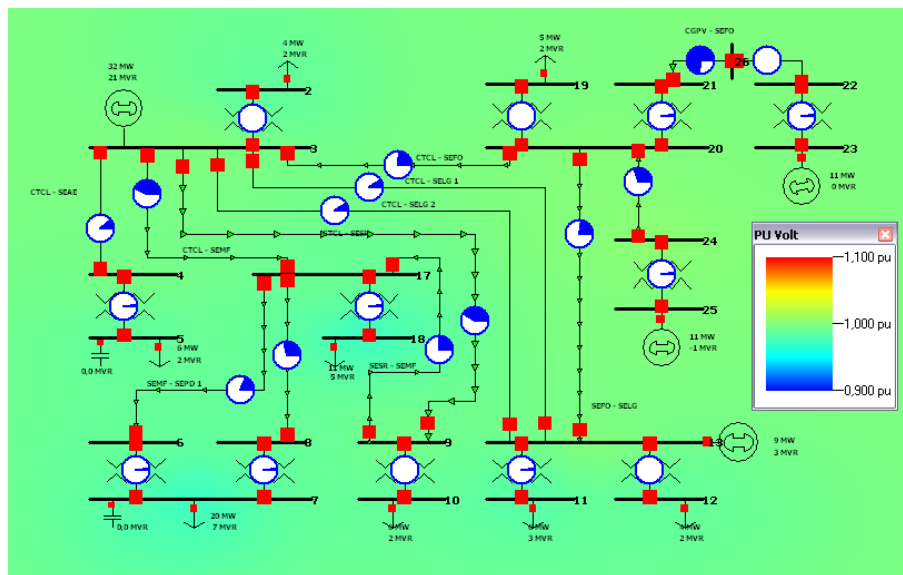


Figura 4.12: Análise da queda de tensão na rede de transporte no cenário de ponta com PE

Apesar de o cenário de ponta não ser alvo da análise dinâmica, este é o cenário mais exigente do ponto de vista de quedas de tensão ao longo da rede AT/MT. Por esse motivo, a breve análise em regime estacionário aqui apresentada, pretende evidenciar a robustez da rede eléctrica da ilha de S. Miguel face a um cenário mais exigente do que o que é necessário.

Tal como no cenário de vazio, o cenário de cheia tem em linha de consideração a actual situação de produção da ilha (figura 4.11) bem como a situação futura com o PE previsto (figura 4.12).

4.4.2 Regime Dinâmico

Depois de confirmada a viabilidade de exploração da rede em regime estacionário no cenário mais severo ao nível das tensões (cheia), importa agora focar a análise da rede no seu comportamento dinâmico, nomeadamente ao nível da frequência. Para essa análise, o cenário mais severo é o cenário de vazio. Como já referido na observação de 4.8, a diferença entre os cenários de vazio e cheia, ao nível da produção, limita-se à entrada de serviço de mais ou menos geradores na CTCL. Sendo a Central Térmica do Caldeirão a única central da rede isolada de S. Miguel que possui capacidade de regulação de energia activa, os valores de potência por si injectados na rede têm uma influência muito grande na reserva girante da mesma. Esta reserva é a responsável pela capacidade de resposta a uma eventual quebra de produção na rede e consequente desvio de frequência.

Contrariamente ao apresentado na análise do regime estacionário, os resultados e conclusões da análise efectuada em regime dinâmico são apresentadas nos capítulos 5 e 6. Esta abordagem diferenciada dos dois regimes de funcionamento é evidente e propositada, visto que o âmbito da presente dissertação se centra no impacto da integração de veículos eléctricos numa rede isolada, o que, como tem vindo a ser explicado, acarreta maioritariamente consequências do ponto de vista

das variações de frequência da rede, ou seja, no regime dinâmico. Como consequência desta abordagem faseada, a simplificação do esquema unifilar da rede foi alvo de alterações de concepção no decorrer do trabalho. Se, numa primeira fase, a rede é representada no seu todo ao nível do transporte AT/MT, depois de confirmar as condições de exploração em regime estacionário a rede sofre simplificações que se tornam ainda mais evidentes quando é implementado o modelo dos veículos eléctricos. Representando os VE um aumento de carga distribuída percentualmente pelos diversos nós da rede, a abordagem normal dita a implementação de cargas reguláveis nos diversos pontos de carga. No entanto, face à diminuta dimensão da rede isolada em análise, ficou comprovado experimentalmente que para o objecto da análise (frequência) não existe diferença qualquer que seja o seu ponto na rede. Assim sendo, o modelo descrito no capítulo 3 é implementado num único ponto de ligação na rede, mais precisamente junto de SELG.

Como descrito em 5, o estudo do comportamento da rede no cenário de vazio em regime dinâmico é dividido em dois casos distintos. Inicialmente é introduzido o PE dos Graminhais na rede e avaliada a quantidade de produção renovável de origem eólica que pode ser absorvida mantendo os mínimos técnicos das máquinas síncronas de CTCL e a reserva mínima na rede. Numa segunda fase são introduzidos os VE na rede bem como a nova carga e aumentada a produção do parque eólico para um valor em redor dos 12,5MW. Este valor injectado na rede fica aquém da potência instalada no parque, estando ajustado a um factor de correcção que tem em consideração velocidades de vento e rendimentos das máquinas na ordem dos 80%.

O impacto dos veículos eléctricos na rede isolada de S. Miguel é explorado em todas as suas componentes ao longo do capítulo 5. Para esse efeito, o cenário de integração escolhido está dividido em três cenários de participação de carga para o controlo de frequência. Para avaliar o seu impacto e possível contribuição para a estabilidade da rede, a carga dos VE é tratada de duas formas distintas ao longo da análise. Na forma mais relevante, os veículos eléctricos são tratados como carga, estando ligada ao nó de SELG uma carga de 7,9MW que corresponde aos VE e ao aumento de 4MW de carga. Não obstante esta análise, os veículos eléctricos são tratados também no modo de funcionamento V2G. Esta forma de funcionamento, permite ao veículo eléctrico funcionar como carga (quando está a ser carregado), mas também como gerador (quando é chamado a intervir na estabilidade da rede). Apesar de ser comprovada a sua mais valia no cenário de 50% de carga controlável, esta abordagem de controlo de VE tem vindo a ser deixada de parte pela comunidade científica. Tal como explicado no capítulo 5, um aumento de participação de carga controlável pode tornar este modo de funcionamento desnecessário.

4.4.2.1 Caracterização da Perturbação

Como explicado ao longo do capítulo 5, a análise dos resultados incidirá no impacto que os veículos eléctricos têm na rede isolada da ilha de S. Miguel. Tendo em vista a previsão de construção do PE dos Graminhais e a sua inclusão no sistema isolado da ilha, o sinal de entrada de vento na turbina eólica apresentado em 4.13 pretende provocar uma queda brusca de produção eólica. Esta queda de produção e consequente variação de frequência são propositadamente elevadas, com o objectivo de evidenciar a integração de VE na rede.

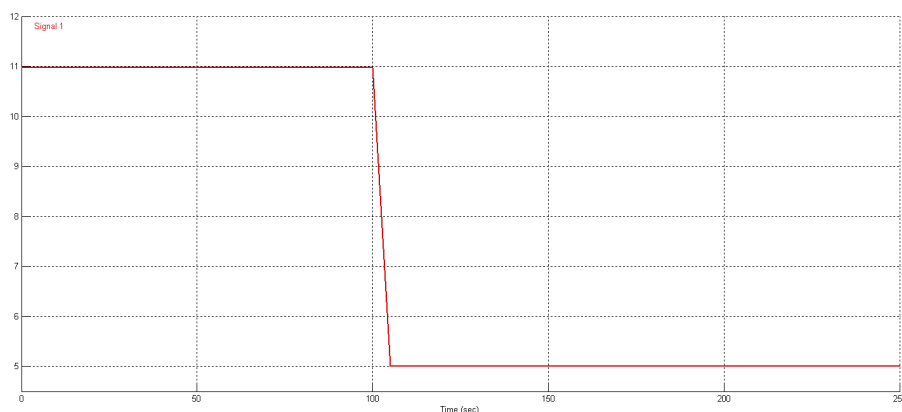


Figura 4.13: Variação do vento na turbina

A perturbação aqui apresentada apenas é utilizada na análise em regime dinâmico. A variação de vento no PE dos Graminhais é constante ao longo de toda a análise, seja o PE constituído por dez ou dezasseis turbinas eólicas.

4.5 Conclusões

No decorrer da Análise e Contrução do Modelo Dinâmico o aspecto que se torna mais evidente é a relevância da topologia da rede eléctrica presente nesta ilha do arquipélago dos Açores. Face ao problema em causa nesta dissertação, a análise da estabilidade transitória pode ser tratada em função de uma rede de barramento único. Tal facto é explicado pela reduzida dimensão da rede e pode ser extrapolado para redes isoladas de dimensão semelhante, desde que estejam garantidas as condições de exploração em regime permanente. Em redes isoladas de pequena dimensão, a frequência presente em qualquer ponto da rede é a mesma, não sofrendo alterações dignas de registo para o controlo da estabilidade transitória.

Capítulo 5

Utilização de Veículos Eléctricos no Aumento da Produção de Origem Renovável na Ilha de S. Miguel

Neste capítulo é seguida uma sequência de análise que pretende demonstrar a participação dos VE no aumento da integração renovável, bem como no controlo primário de frequência da rede e consequente redução das alterações de frequência provocadas pela variação brusca do vento no parque eólico dos Graminhais. São considerados dois tipos de participação de carga dos VE (incontrolável e controlável), sendo neste último, abordado o conceito de funcionamento *vehicle-to-grid*.

O critério de estabilidade dinâmica definido para a rede eléctrica de S. Miguel admite uma variação de frequência máxima de 1Hz, uma vez que os níveis de carga envolvidos já são elevados para um sistema isolado.

Com o objectivo de estabelecer uma comparação directa entre as diferentes abordagens de integração exploradas, a variação de produção eólica é mantida constante em todos os cenários de integração, bem como o cenário de carga (vazio). Desta forma é avaliado o impacto que os diferentes modos de funcionamento dos VE provocam na manutenção de condições de estabilidade dinâmica adequadas para a eficaz operação do sistema.

5.1 Capacidade Actual de Produção Eólica

Como descrito ao longo do capítulo 4, está prevista a instalação de um parque eólico na zona dos Graminhais. A produção eólica em sistemas isolados, além de constituir uma fonte de energia limpa e mais barata que as convencionais, apresenta excelentes condições meteorológicas para a sua exploração.

No entanto, as vantagens desta fonte de energia também acarretam problemas que se refletem particularmente em sistemas energéticos isolados. O carácter intermitente do vento e, em especial, as suas variações bruscas, resultam em efeitos dinâmicos importantes na rede, nomeadamente ao nível da estabilidade da frequência. Tendo sido já referido no capítulo 4, o projecto do PE dos Graminhais prevê a instalação faseada dos grupos aerogeradores. Este facto pode ser explicado pela limitação, face às condições de carga existentes, da penetração da produção eólica na rede da ilha em análise.

5.1.1 PE com dezasseis aerogeradores

A configuração de dezasseis aerogeradores no parque eólico dos Graminhais está prevista no projecto e é a base da análise dinâmica apresentada ao longo do capítulo 5. Nesta configuração, com base em máquinas de 900kW de potência, o PE pode injectar cerca de 12,5MW de potência na rede.

5.1.1.1 Um gerador em CTCL

No cenário de carga alvo desta análise (cenário de vazio anteriormente caracterizado no capítulo 4), a potência que é necessário alimentar ronda os 34MW. Tendo em consideração a produção aproximada de 11MW na CGPV, 9MW na CGRG e 12MW no PE dos Graminhais, a produção em falta para alimentar a carga é de apenas 2MW. Estes 2MW de potência serão da responsabilidade da CTCL sendo para isso utilizada uma unidade de geração de 9,62MVA.

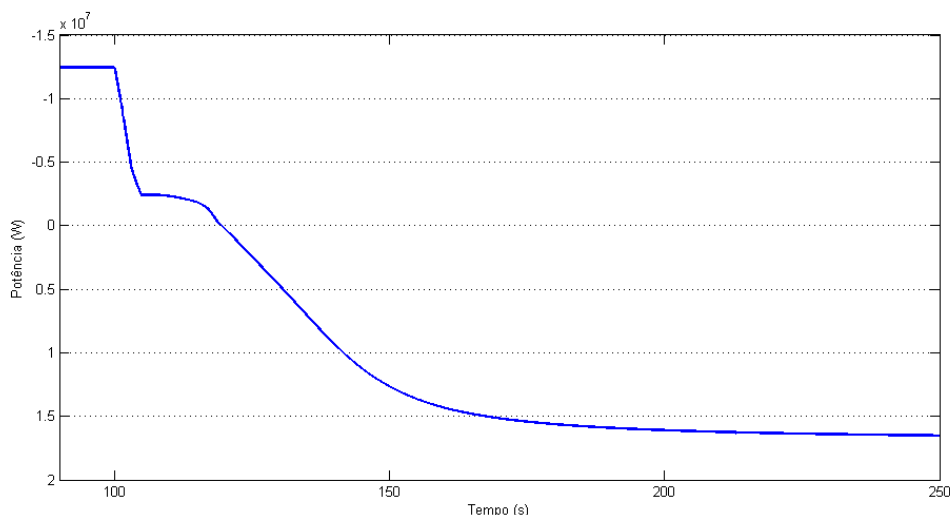


Figura 5.1: Potência activa injectada na rede pelo PE

Na configuração de dezasseis aerogeradores com o sinal de vento considerado, o PE injecta em permanência cerca de 12MW de potência na rede. No entanto, a variação brusca de vento, desce drasticamente a sua produção para cerca de 2MW.

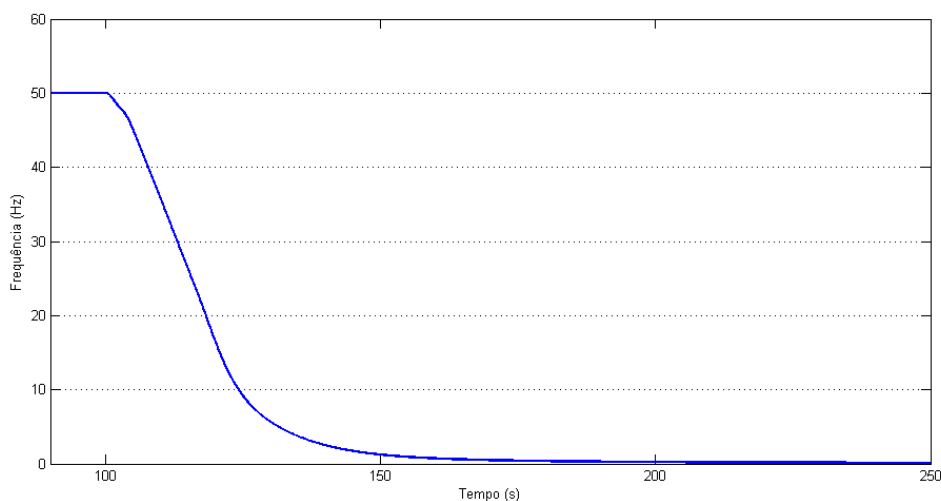


Figura 5.2: Frequência da rede

Face à incapacidade do grupo gerador da CTCL de manter a estabilidade da rede, no gráfico apresentado na figura 5.1 é possível verificar que, a dada altura, o PE dos Graminhais passa a comportar-se como carga, absorvendo potência da rede. Esta situação é consequência da perda de sincronismo da rede apresentada na figura 5.2, não havendo na rede capacidade de reserva suficiente para manter o equilíbrio entre geração e carga.

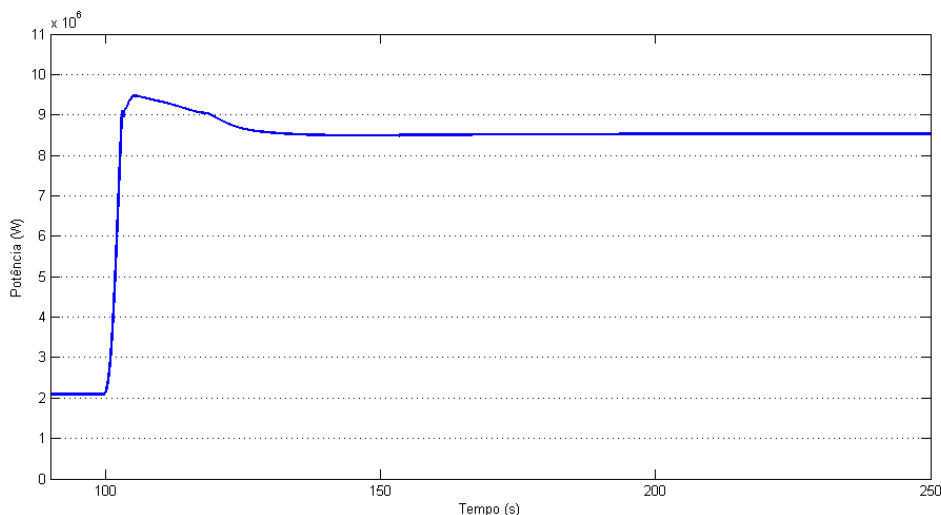


Figura 5.3: Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL

Como se pode observar na figura 5.3, o gerador de 9,25MVA responsável pelo ajuste do diagrama de carga encontra-se, antes da perturbação, a produzir cerca de 2MW de potência. Este valor é inferior ao mínimo técnico de funcionamento da máquina diesel (em redor dos 40% - 3,7MW),

o que por si só é factor de impedimento para a realização do projecto do PE dos Graminhais nas actuais condições. Eventualmente, a sua realização seria possível se a injeção de potência fosse limitada nas horas de vazio. Não obstante a impossibilidade de funcionamento abaixo dos mínimos técnicos, o comportamento dinâmico da rede analisado expõe as limitações de integração de produção eólica na ilha. Quando ocorre a variação brusca de vento apresentada na página 48 (figura 4.13) aos 100 segundos, a Central Térmica do Caldeirão é responsável pela reserva girante do sistema. Perante a perda de produção eólica ilustrada na figura 5.1, o único gerador presente na CTCL injecta o seu máximo na rede para compensar a perda de 10MW de potência no PE.

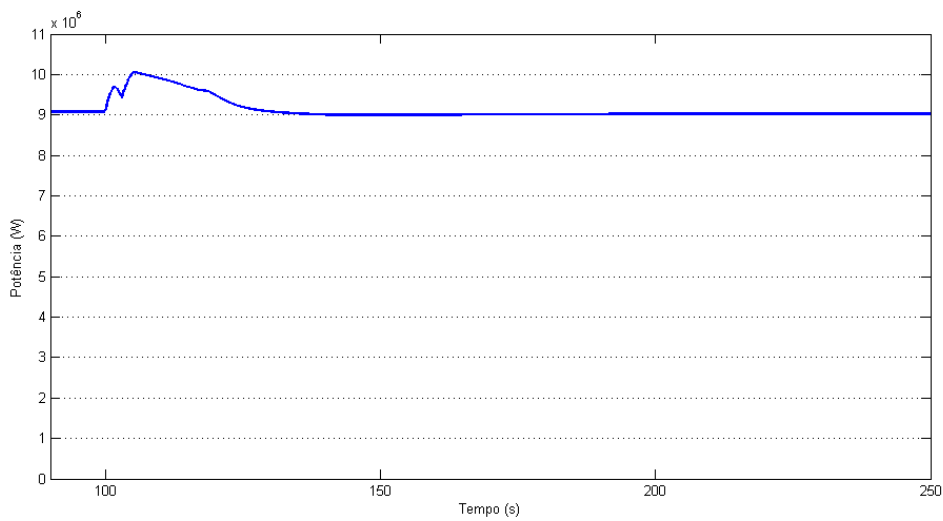


Figura 5.4: Potência activa injectada na rede pela CGRG

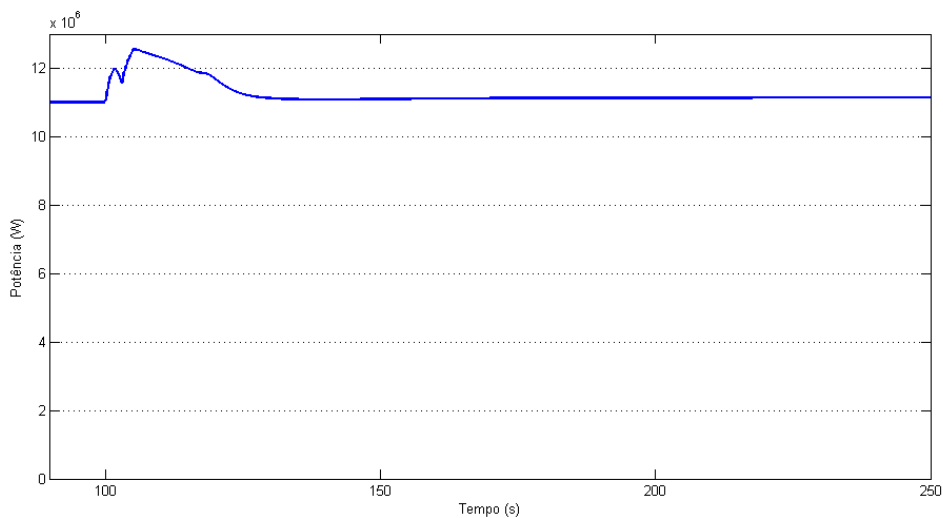


Figura 5.5: Potência activa injectada na rede pela CGPV

Nas figuras 5.4 e 5.5 são apresentadas as evoluções temporais das potências injectadas na rede pelas centrais geotérmicas da ilha de S. Miguel.

Verifica-se que o seu valor se mantém constante antes e depois da variação brusca de produção do PE dos Graminhais, havendo uma pequena variação de potência durante a queda de vento, que resulta da inércia presente nesses grupos geradores. Apesar de tentarem contribuir para o re-equilíbrio do sistema, estas centrais eléctricas possuem um binário constante que não lhes permite aumentar o valor de potência activa injectada.

5.1.1.2 Dois geradores em CTCL

Nesta secção é analisada uma situação de exploração semelhante à apresentada na secção anterior. A simulação considera a introdução de dois grupos diesel de 9,26MVA na Central Térmica do Caldeirão.

Como se pode verificar na figura 5.7, a introdução de um grupo diesel adicional na CTCL permite a estabilização da frequência da rede sem perda de sincronismo, sendo a perda de potência no PE integralmente suportada pelos geradores na CTCL.

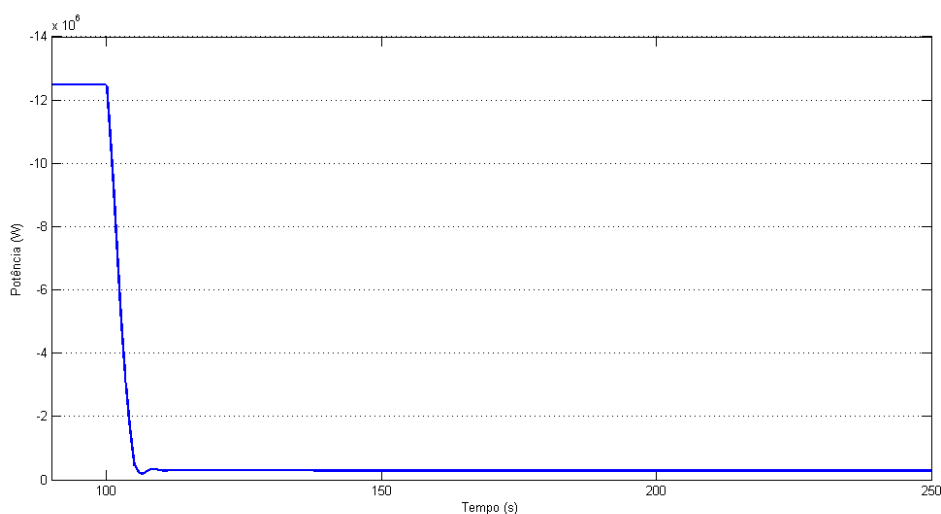


Figura 5.6: Potência activa injectada na rede pelo PE

A introdução do novo gerador térmico resulta numa evolução temporal diferente na potência activa injectada pelo parque eólico dos Graminhais. Na figura 5.6 é possível observar a redução de produção que resulta da variação de vento simulada (de 12,5MW para cerca de 0MW).

Apesar de, em simulação, esta nova abordagem conseguir aguentar a frequência do sistema, o resultado obtido com o novo gerador ultrapassa limites de funcionamento que inviabilizam a sua transposição para a prática. Seja por não serem cumpridos os mínimos técnicos das máquinas diesel ou pela variação de frequência superior a 1Hz por mais de 15 segundos(figura 5.7), a simulação apresentada demonstra que, com as actuais condições de carga no cenário de vazio, a rede isolada

da ilha de S. Miguel não comporta a penetração do PE dos Graminhais com dezasseis turbinas eólicas.

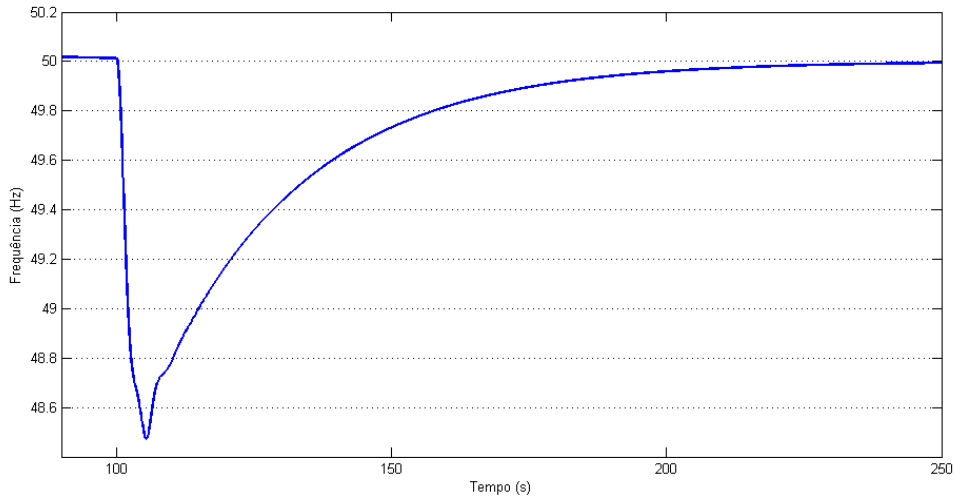


Figura 5.7: Frequência da rede

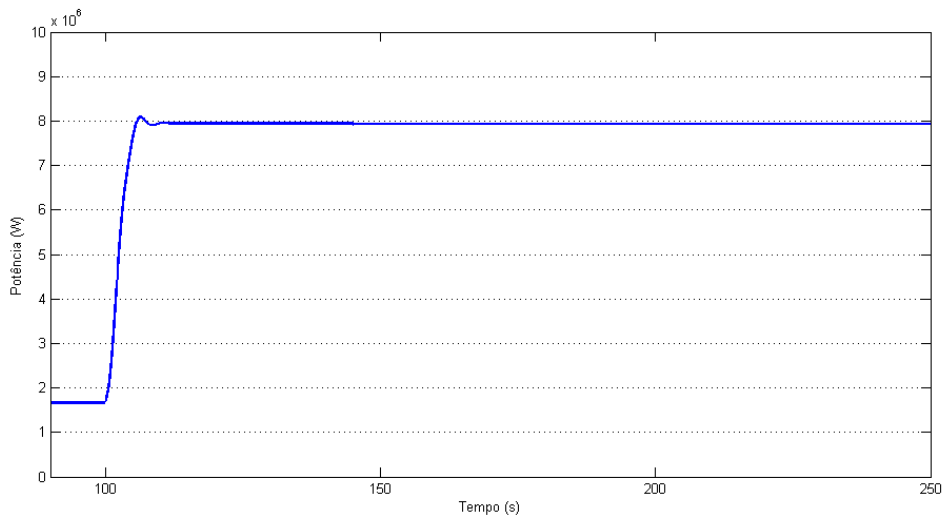


Figura 5.8: Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL

Como se pode observar na figura 5.8, os mínimos técnicos de funcionamento das máquinas presentes na Central Térmica do Caldeirão não são cumpridos. Cada um dos dois geradores da central injecta, antes da variação da produção eólica, pouco mais de 1,5MW de potência no sistema. Este valor fica muito distante dos 3,7MW necessários para cumprir os mínimos técnicos de funcionamento dos geradores diesel.

Apesar deste entrave de funcionamento, esta situação de exploração coloca no sistema mais reserva girante. Aliás, com uma produção conjunta de aproximadamente 3,5MW, as duas unidades de 9,26MVA da Central Térmica do Caldeirão dispõe de uma capacidade de geração em reserva de 15MW. Este valor é superior aos 12,5MW de potência que o PE injecta no cenário considerado. Assim sendo, a reserva introduzida no sistema é suficiente para suprimir a perda de produção eólica.

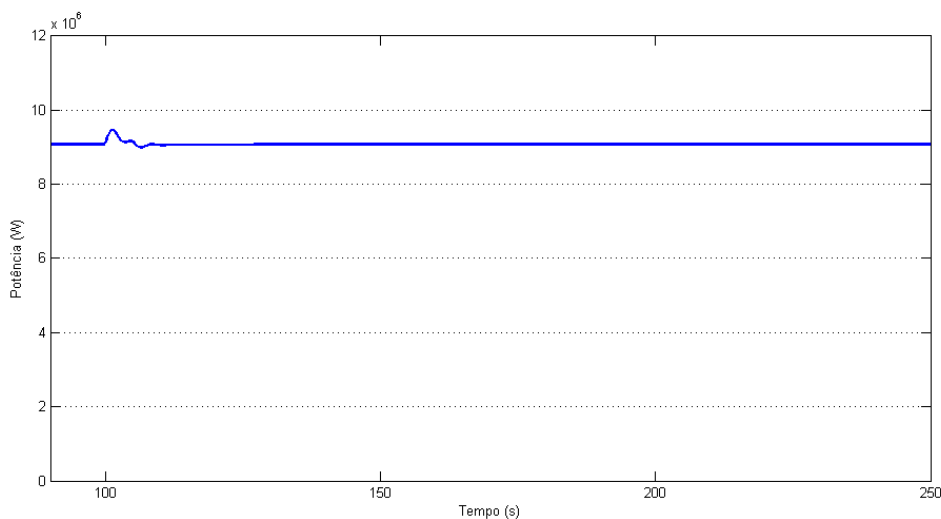


Figura 5.9: Potência activa injectada na rede pela CGRG

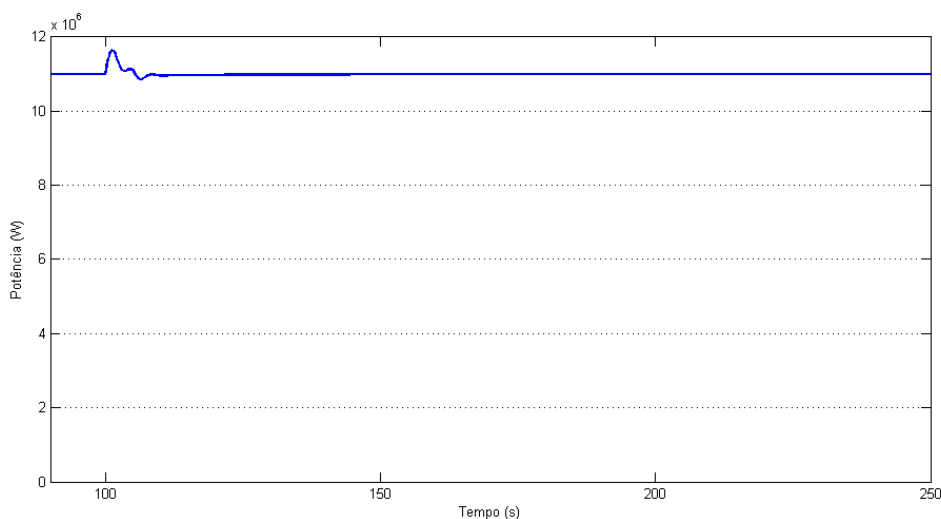


Figura 5.10: Potência activa injectada na rede pela CGPV

Nas figuras 5.9 e 5.10 são apresentadas as potências injectadas pelas centrais geotérmicas de S. Miguel. A menor variação de potência registada, durante a acentuada redução de produção

no parque eólico dos Graminhais, é justificada pela maior reserva que o grupo diesel adicional representa para a rede.

5.1.2 PE com dez aerogeradores

A configuração de dez aerogeradores no parque eólico dos Graminhais está prevista na fase inicial do projecto. Não é esta a base da análise dinâmica apresentada ao longo deste capítulo, no entanto, face às actuais condições de carga presentes na ilha de S. Miguel no cenário de vazio, a calendarização prevista para a instalação dos diversos grupos geradores do PE é justificada pela análise efectuada nesta secção.

Com dez turbinas eólicas em vez de dezasseis, a potência injectada pelo parque eólico com as condições de vento descritas na figura 4.13 apresenta a evolução temporal da figura 5.11. Nesta configuração, a produção eólica inicial de 8MW é reduzida de tal forma que, após a perturbação do vento, o seu valor é quase nulo.

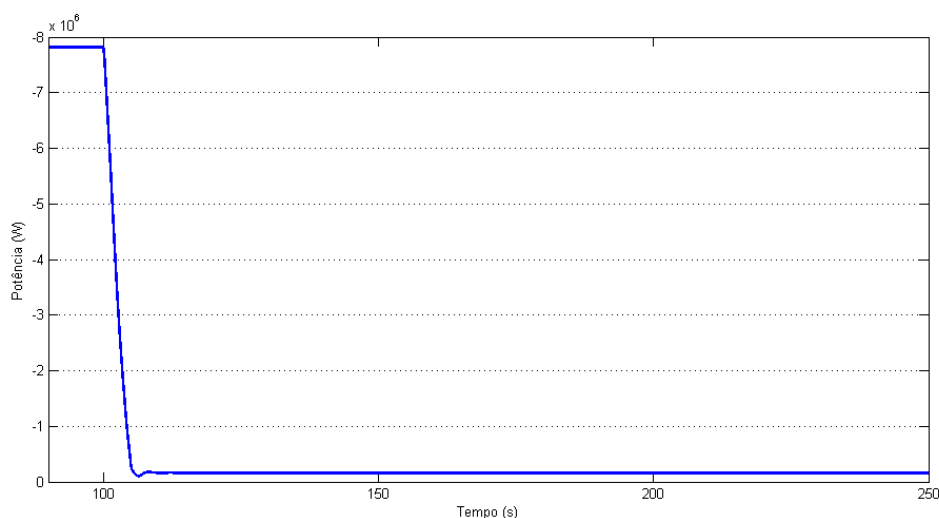


Figura 5.11: Potência activa injectada na rede pelo PE

Tendo por base os dois geradores de 9,26MVA que, antes da variação de vento, injectam pouco mais de 4MW cada um, existe na CTCL reserva de produção adicional de 10MW. Este valor é suficiente para suprimir a falha dos 8MW do PE, sendo que a resposta dada na estabilização de frequência da rede fica dependente da inércia e rapidez de resposta dos grupos diesel em funcionamento.

Na figura 5.12 é apresentada a variação de frequência da rede face à perda de produção do PE dos Graminhais. A menor perda registada no PE com dez turbinas eólicas permite ao sistema eléctrico responder de forma mais eficaz. Os geradores da CTCL operam dentro dos limites técnicos de funcionamento e o desvio de frequência registado é inferior a 1Hz, garantindo assim as condições de operação da rede.

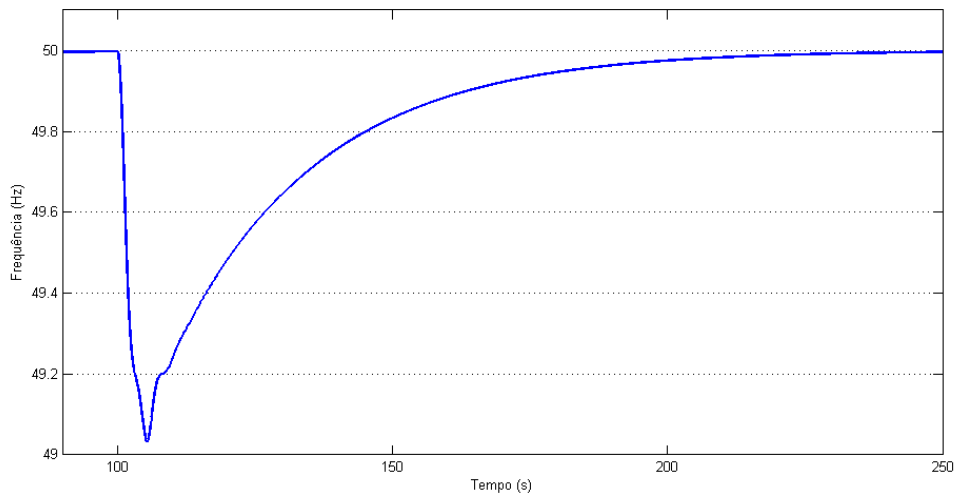


Figura 5.12: Frequência da rede

Como se pode observar em 5.13, os dois geradores diesel da CTCL já se encontram a funcionar dentro dos mínimos técnicos e possuem capacidade de reserva suficiente para sustentar o sistema na eventual falha de produção eólica do parque dos Graminhais.

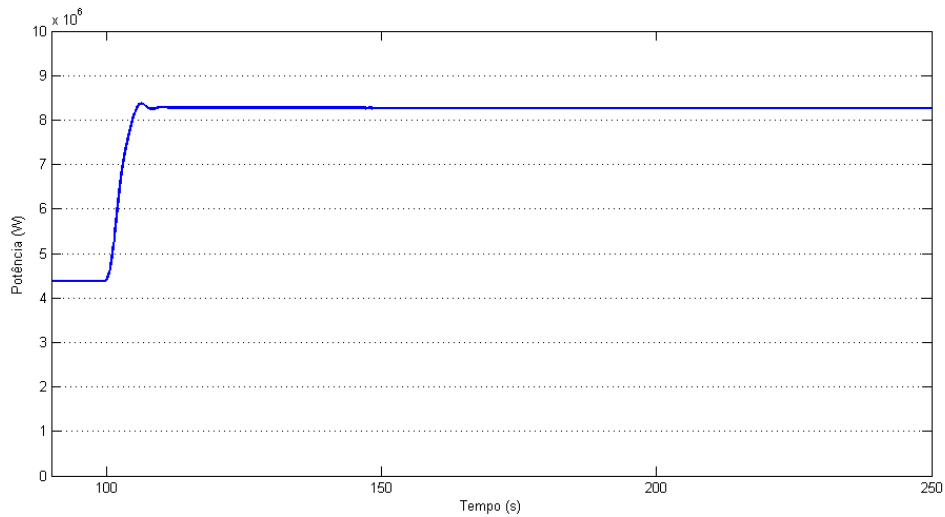


Figura 5.13: Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL

As evoluções de produção na CGPV e na CGRG são semelhantes às apresentadas nas figuras 5.10 e 5.9 respectivamente, não sendo, por esse motivo, representadas nesta secção.

5.1.3 Análise Resultados

Dada a perda de sincronismo registada na figura 5.2, o funcionamento com um único gerador na Central Térmica do Caldeirão não é considerado na análise de resultados. Esta mesma configuração de produção na CTCL não é analisada no PE com dez turbinas eólicas, uma vez que, apesar de conseguir injectar potência suficiente em regime nominal, não possui nenhuma capacidade de reserva necessária para responder à perda de produção do PE simulada.

Assim sendo, a análise apresentada nesta secção compara o comportamento actual da rede em dois cenários de penetração eólica distintos. Factor comum aos dois cenários é a presença de dois geradores diesel de 9,26MVA na CTCL.

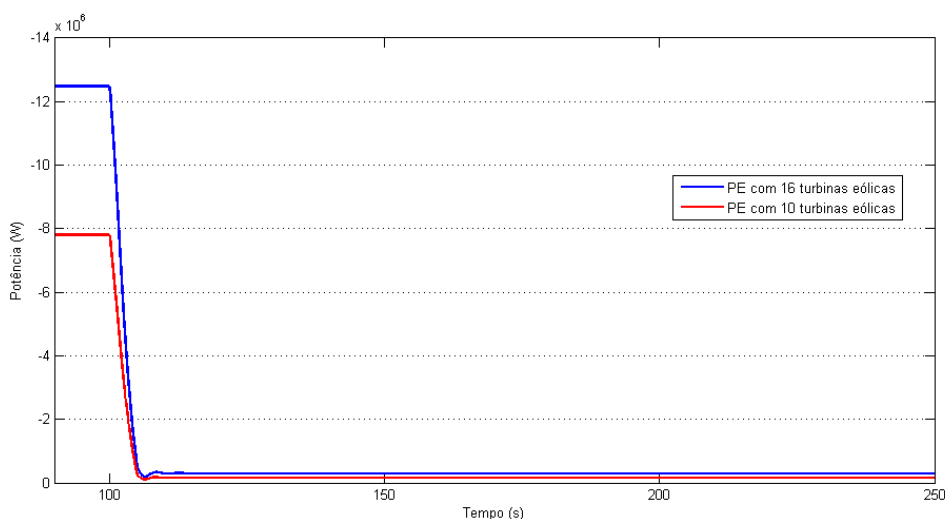


Figura 5.14: Potência activa injectada na rede pelo PE

Na figura 5.14 podem observar-se os valores de potência injectada pelo PE dos Graminhais nos dois cenários considerados. É importante referir que, apesar da diferença dos valores de potência registada antes da perturbação, os valores posteriores aos 100 segundos são praticamente iguais. Esta facto é explicado pela curva característica de funcionamento do aerogerador implementado na simulação. O sinal ilustrado na figura 4.13, depois da redução de vento, apresenta um valor baixo que não permite a obtenção de bons valores de produção eólica. O rendimento obtido com esta velocidade de vento é muito baixo, não havendo por isso uma diferença digna de registo entre as duas configurações do PE.

Se, na figura 5.16 se verifica o incumprimento dos mínimos técnicos de funcionamento das unidades de 9,26MVA para o cenário de dezasseis turbinas eólicas no PE, em 5.15 observa-se uma variação de frequência superior a 1Hz durante um longo período de tempo (15s). As evoluções temporais da frequência na rede nos dois cenários são bastante distintas. Este comportamento é consequência das perdas de potência envolvidas em cada um e das reservas girantes disponíveis na CTCL. Na integração do PE com dez turbinas eólicas, verifica-se que, além de serem cumpridos

os limites técnicos das máquinas diesel, a variação de frequência sentida na rede é inferior a 1Hz, estando garantidas assim as condições de operação no sistema isolado.

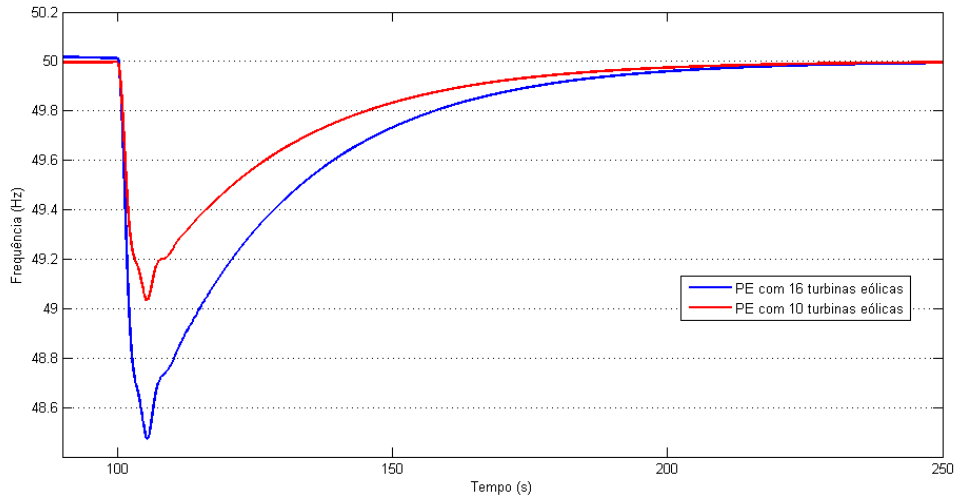


Figura 5.15: Frequência da rede

Na presença destes resultados, conclui-se que a rede eléctrica isolada da ilha de S. Miguel não comporta a introdução de um parque eólico com 14,4MW de potência instalada. A carga no cenário de vazio actual é insuficiente para que este nível de produção intermitente seja absorvido sem causar problemas de estabilidade na exploração da rede.

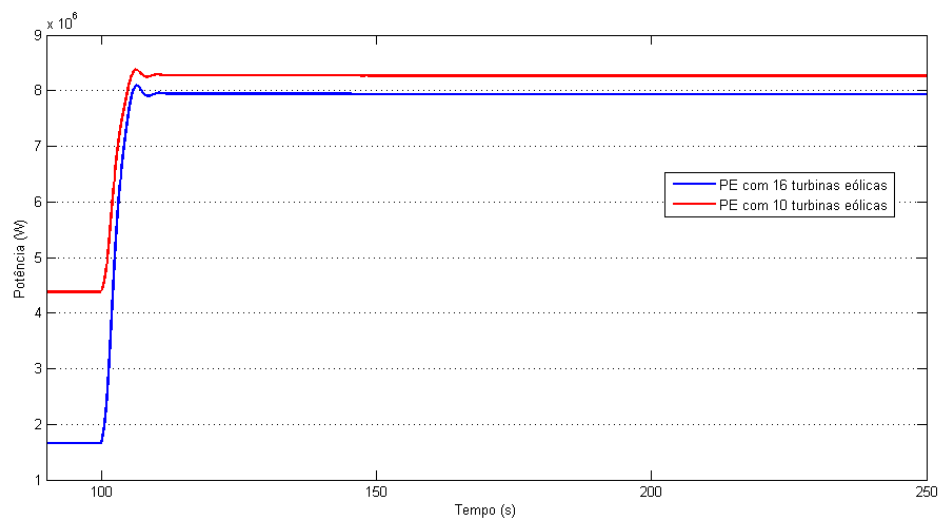


Figura 5.16: Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL

Como se pode verificar na figura 5.16, o funcionamento dos grupos geradores apresentam diferenças principalmente no valor de potência injectada antes da perturbação. No cenário em que

o PE possui dez turbinas eólicas os geradores de CTCL funcionam acima dos mínimos técnicos (3,7MW). No entanto, o mesmo já não ocorre quando o PE está instalado com dezasseis turbinas de igual potência.

O incumprimento dos limites de funcionamento deste tipo de gerador são razão suficiente para inviabilizar a integração do PE dos Graminhais com dezasseis aerogeradores no actual nível de carga presente no cenário de vazio alvo desta análise. No entanto, este não é o único factor que torna a implementação desta configuração de exploração impraticável.

5.2 Integração dos Veículos Eléctricos

A integração dos veículos eléctricos nesta rede eléctrica é apresentada como um cenário futuro (2015). Nestas condições prevê-se um aumento de carga fixa de 4MW, consequência de uma taxa de crescimento do consumo definida no capítulo 4. Além deste aumento de carga fixa, a penetração de 2,5% de veículos eléctricos na frota automóvel é responsável pela introdução de 3,7MW de carga eventualmente controlável.

Como apresentado no capítulo 4, a carga de vazio considerada em 2015 apresenta um valor em torno dos 42,7MW de potência. Na presença destes valores de carga, a produção eólica considerada utiliza as dezasseis turbinas eólicas previstas para o PE dos Graminhais. Com uma potência instalada de 14,4MW e um rendimento de aproximadamente 80%, o parque eólico injecta cerca de 12,5MW na rede.

5.2.1 0% de Carga Controlável nos VE

Como apresentado no capítulo 2, os VE podem ser considerados em três modos de funcionamento distintos. O modo de funcionamento como carga simples define a potência associada à bateria dos VE como uma carga que absorve potência da rede, sem qualquer capacidade de regulação. Nesta situação, é simulada a perda de produção do PE no sistema eléctrico de S. Miguel e analisada estabilidade dinâmica.

Em 5.17 é apresentada a produção do parque eólico dos Graminhais. Esta variação do valor de potência injectada é constante ao longo desta secção.

Mesmo sem qualquer função de controlo, a necessidade de introduzir um novo gerador diesel para alimentar a nova carga introduz uma maior reserva no sistema permitindo que a variação de frequência ilustrada em 5.18 seja inferior à verificada em resultados anteriores. No entanto, trata-se ainda de um comportamento que tende a ultrapassar os limites de variação de frequência aceitáveis para redes isoladas com dimensão considerável, pelo que a segurança de operação ainda não está integralmente garantida.

Com uma capacidade de produção total de 27,7MW de potência, a Central Térmica do Caldeirão representa toda a reserva girante do sistema nestas condições de exploração. Cada um dos três geradores diesel injecta 4MW de potência na rede quando o PE está a produzir 12,5MW. Este valor cumpre o limite mínimo de operação da máquina térmica e garante uma reserva de 15,7MW

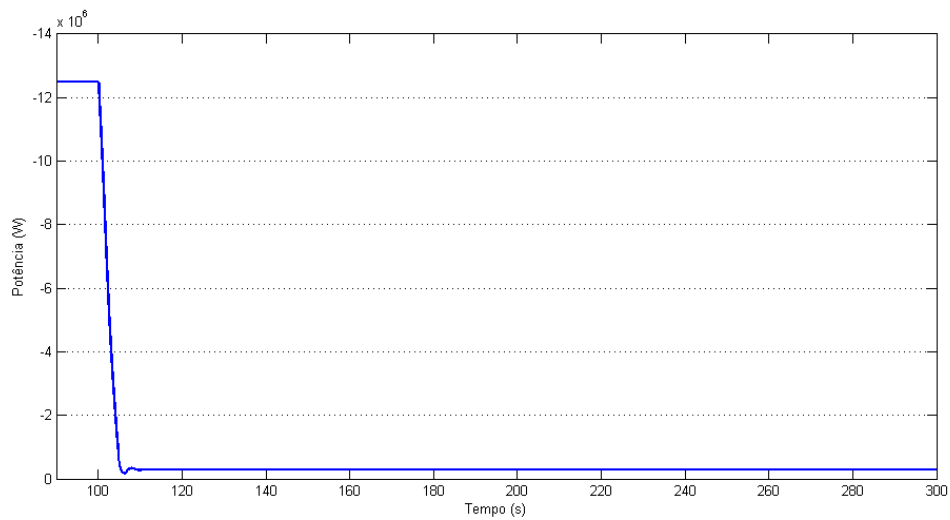


Figura 5.17: Potência activa injectada pelo PE

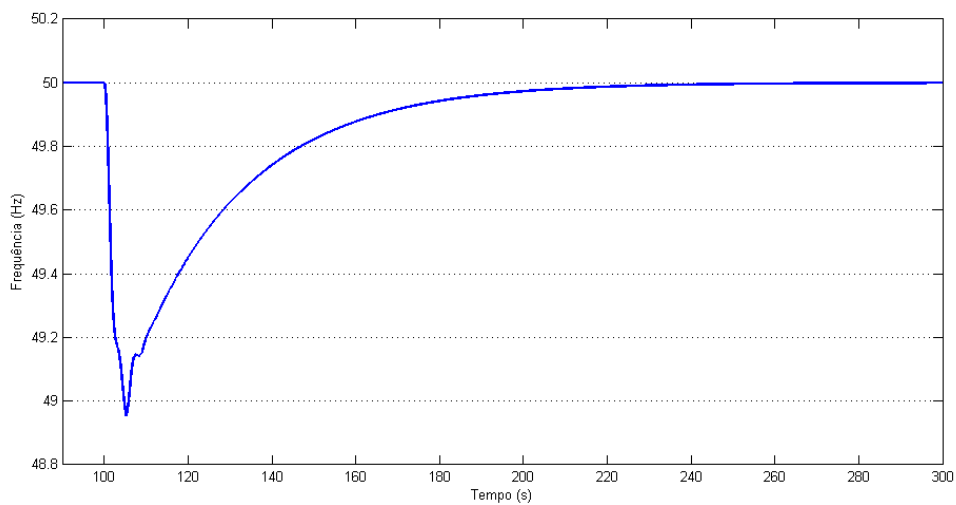


Figura 5.18: Frequência na rede

no sistema. Na figura 5.19 verifica-se que, havendo perda de produção no parque eólico, as máquinas diesel passam a injectar mais 4MW cada uma, compensando assim a quebra de produção eólica.

Neste modo de funcionamento não é usada a variação de frequência lida localmente no interface inversor, sendo o valor de potência dos VE controlável nulo.

Na figura 5.20 são apresentadas as potências injectadas pelas centrais geotérmicas da ilha. Como se constata, os valores de potência são constantes, uma vez que estas centrais possuem binário constante, não conseguindo responder às variações de frequência sentidas na rede.

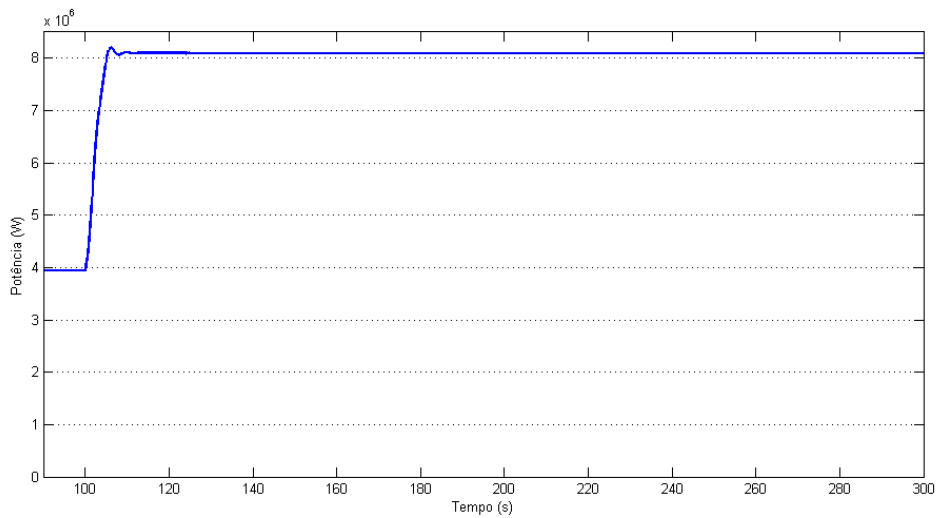


Figura 5.19: Potência activa injectada por cada gerador de CTCL

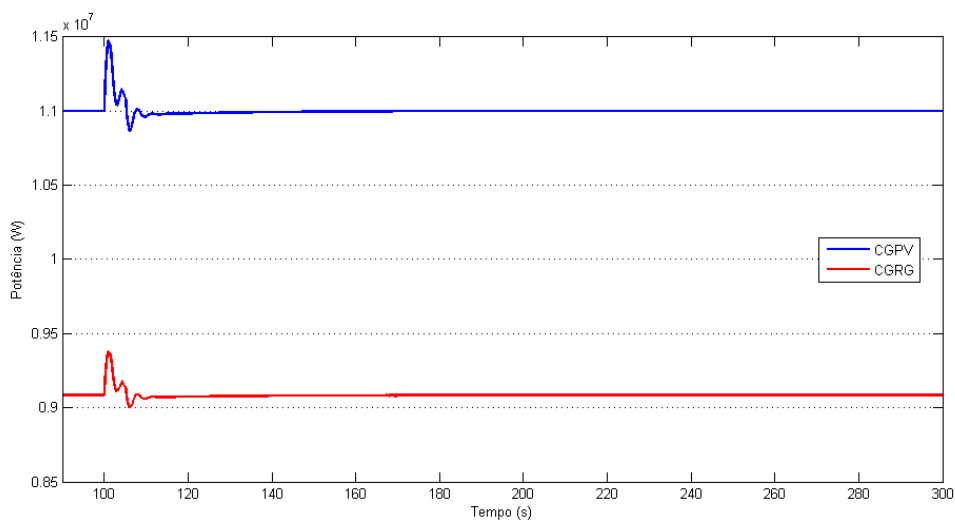


Figura 5.20: Potência activa injectada por CGPV e CGRG

5.2.2 50% de Carga Controlável nos VE

Um outro modo de funcionamento considerado define que a potência absorvida pelas baterias dos VE pode ser regulada em função de determinadas condições de operação da rede, nomeadamente a frequência.

Dos 7,7MW de nova carga considerada no cenário futuro, apenas 3,7MW são relativos a veículos eléctricos. Considerando que metade desses veículos aceita participar em funções de suporte da estabilidade da rede, a parcela de carga controlável corresponde a 1,9MW.

Os valores de potência injectados nos barramentos da CGRG e CGPV são idênticos aos apresentados na secção anterior. Estas centrais injectam em permanência 9MW e 11MW na rede (figura 5.20), respectivamente, independentemente da carga existente.

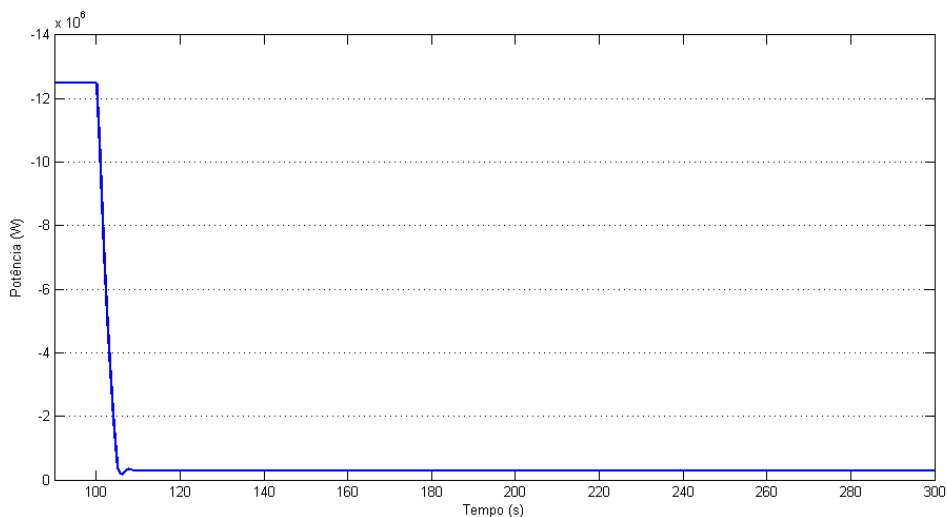


Figura 5.21: Potência activa injectada pelo PE

Na figura 5.21 é apresentada a variação de produção no PE dos Graminhais. A diferença de potência activa injectada por esta central é a responsável pelo ajuste observado em CTCL e na carga dos VE.

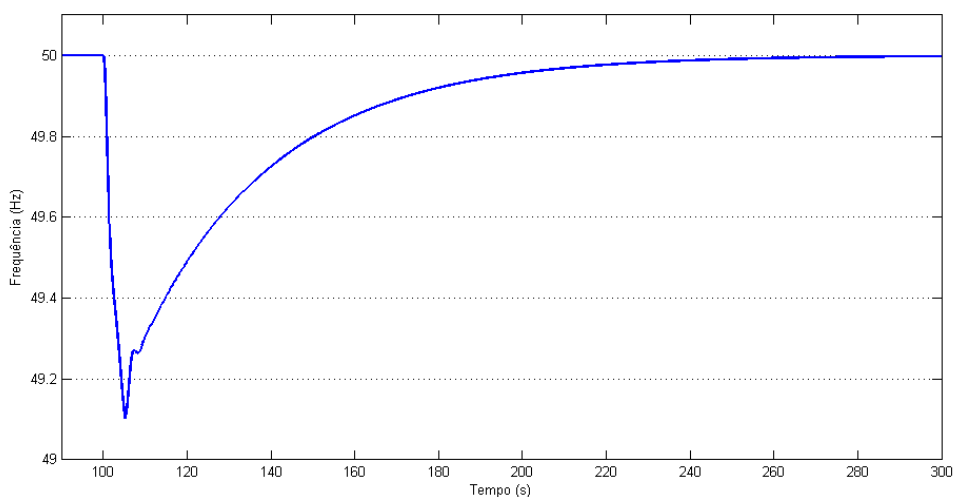


Figura 5.22: Frequência na rede

A evolução temporal da frequência na rede isolada de S. miguel é apresentada na figura 5.22. Apesar de o total de carga regulável representar menos de 5% do total de carga da ilha, verifica-se

que a sua regulação diminui o valor de variação de frequência. Desta forma, a participação dos VE como carga controlável constitui uma reserva importante para efeitos de controlo primário de frequência, permitindo aumentar as condições de segurança dinâmica da rede.

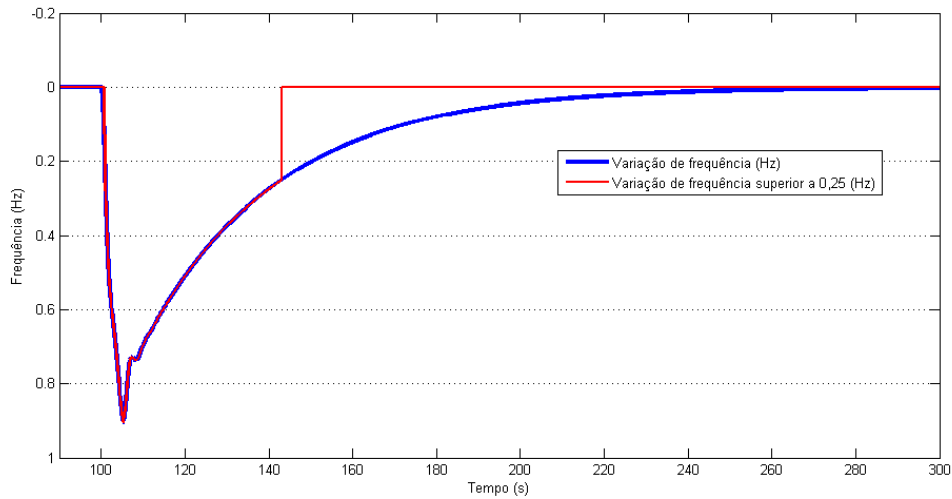


Figura 5.23: Variação de frequência para controlo dos VE

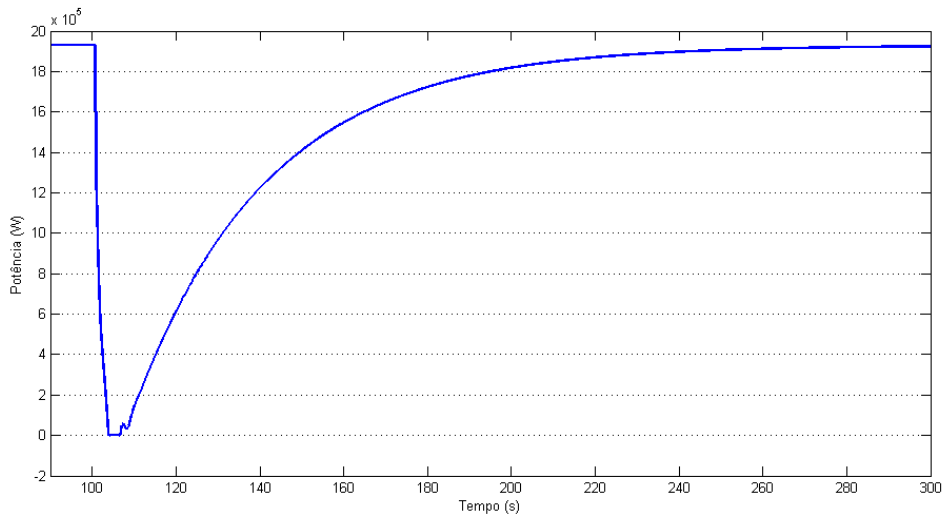


Figura 5.24: Potência activa controlável dos VE

Sendo a base de controlo da potência activa controlável dos VE ilustrada na figura 5.24, a leitura local da frequência e o seu ajuste a sinal de controlo da função K_P ilustrada em 3.12 é apresentada na figura 5.23. Como se pode observar em 5.24, a perturbação introduzida na rede pela produção do parque eólico provoca uma redução de carga dos 1,9MW de VE reguláveis. No entanto, verifica-se uma limitação deste modo de funcionamento em torno dos 105 segundos. A

redução da carga atinge o limite de carga controlável, não podendo contribuir mais para a reposição da frequência na rede.

À medida que a frequência da rede retoma o seu valor nominal, em resultado da regulação de frequência proporcionada pelos geradores na CTCL, verifica-se que a carga dos VE retoma também o valor apresentado antes da perturbação.

Quando comparado com o modo de funcionamento de carga simples, a potência injectada pela CTCL apresenta valores idênticos aos apresentados na figura 5.19. No entanto, em 5.25 observa-se uma variação na injeção de potência activa mais suave durante a variação brusca da produção eólica.

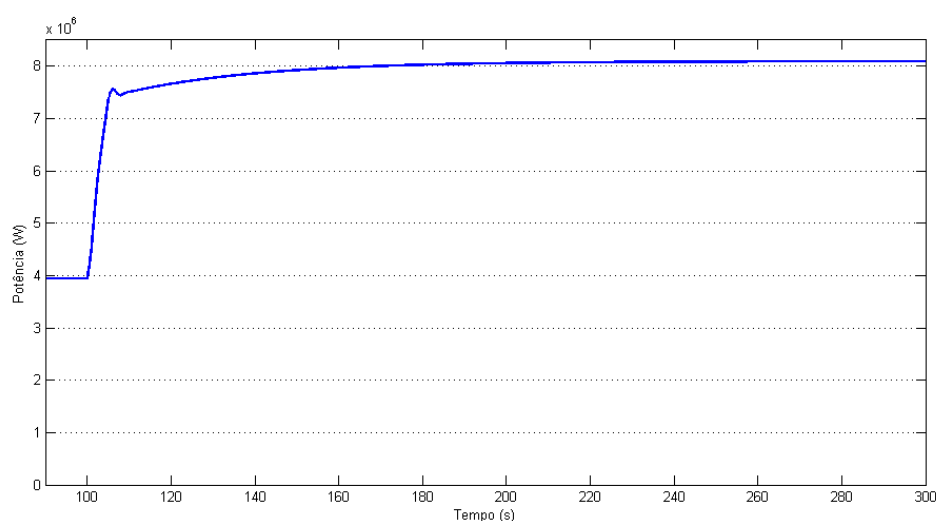


Figura 5.25: Potência activa injectada por cada gerador de CTCL

Apesar de terem de alimentar o mesmo valor de carga, os geradores síncronos da Central Geotérmica do Caldeirão não precisam de repôr de forma tão rápida a potência no sistema, uma vez que há uma redução de carga nos veículos eléctricos que participam na regulação da frequência da rede. A participação de 1,9MW na gestão do balanço de potência activa da rede é sentida, não apenas no perfil de produção da CTCL, mas principalmente na frequência da rede que é relação directa do balanço entre geração e carga.

5.2.2.1 O Modo de funcionamento *Vehicle-to-grid*

O modo de funcionamento V2G é um modo de carga controlável onde, além de ajustar a potência absorvida, é também possível injectar potência activa em caso de necessidade da rede.

Este modo de funcionamento apenas é analisado neste cenário de integração de veículos eléctricos. Tal como mencionado nos capítulos 2 e 3, este modo de funcionamento deixa de fazer sentido para valores de integração mais elevados. Nessas condições, a simples redução de uma carga de elevado valor tem um impacto semelhante à injeção de potência no sistema, não sendo

necessária a injeção por parte dos veículos eléctricos. Aliás, este facto é constactado na secção seguinte onde se analisa uma participação de 100% dos VE ligados à rede.

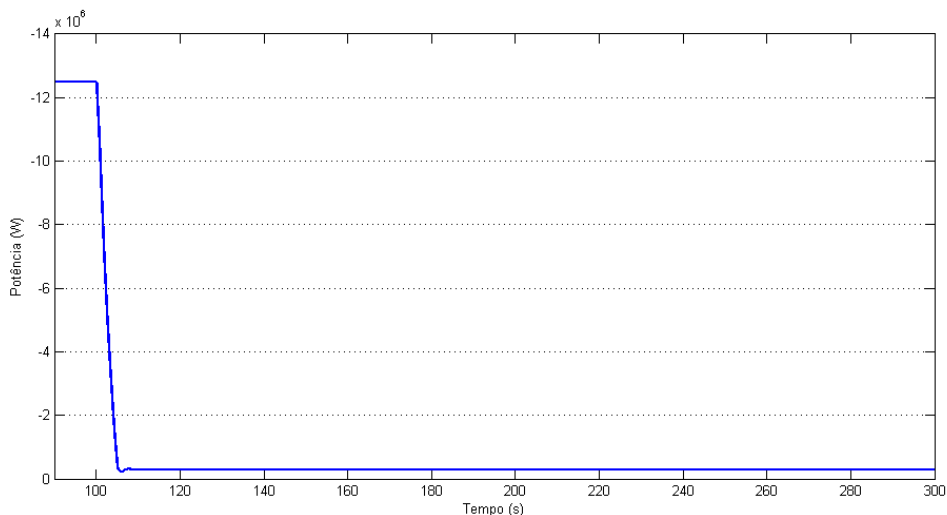


Figura 5.26: Potência activa injectada pelo PE

Em 5.26 é apresentada a produção do parque eólico e a sua redução de potência. Como se pode verificar na figura 5.27, o valor mínimo de frequência do sistema é de 49,15Hz.

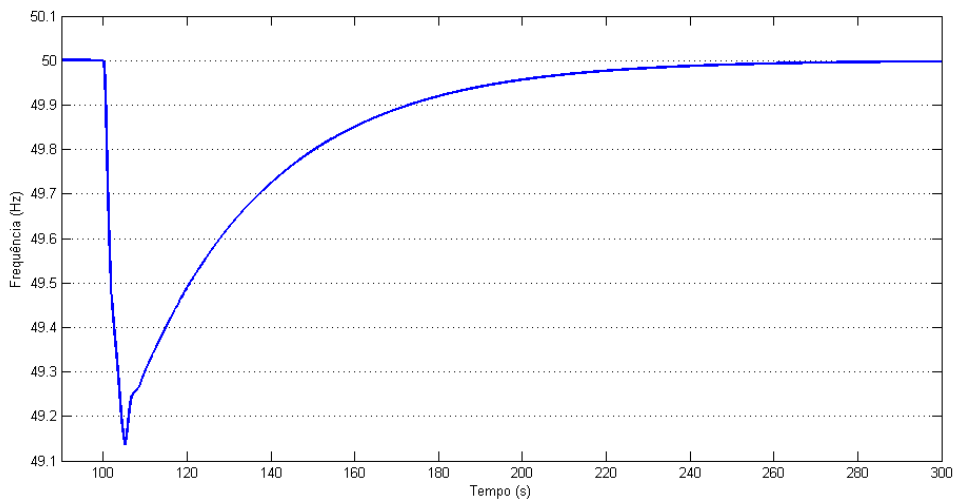


Figura 5.27: Frequência na rede

De forma análoga à verificada no funcionamento como carga regulável, quando os VE estão a funcionar no modo *vehicle-to-grid* é necessário efectuar a leitura local do valor da frequência na rede. Assim sendo, na figura 5.28 estão representadas as variações temporais da frequência

para controlo dos VE. Importa referir que o gráfico da variação de frequência superior a 0,25Hz representado resulta da implementação da *dead-band* descrita no modelo.

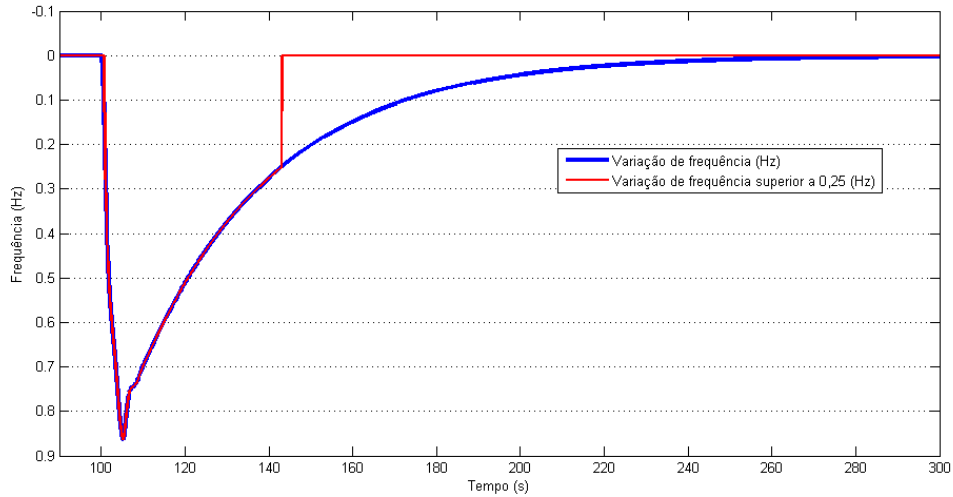


Figura 5.28: Variação de frequência para controlo dos VE

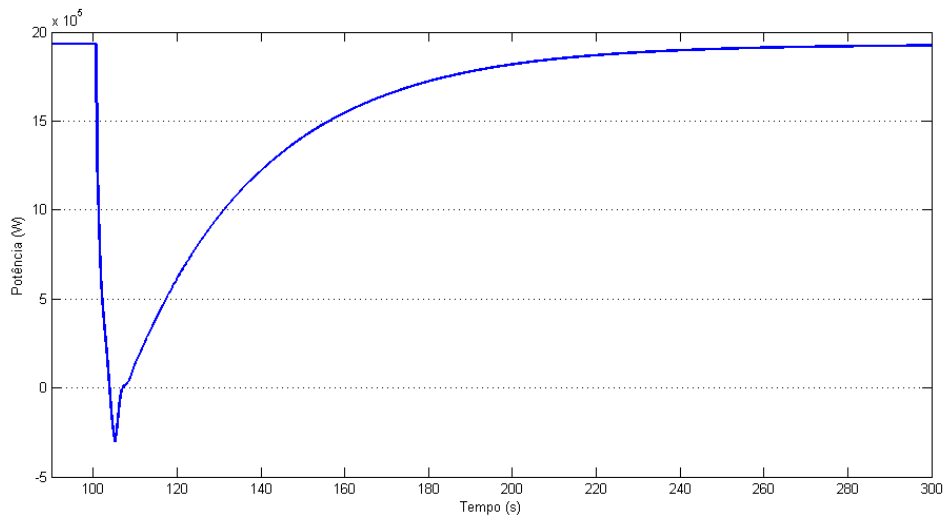


Figura 5.29: Potência activa controlável dos VE

Na figura 5.29 está representada a potência activa controlável dos VE. Contrariamente ao modo de funcionamento como carga dinâmica, onde existia uma limitação de controlo de carga em torno dos 105 segundos, verifica-se agora que os VE ligados à rede injectam uma pequena quantidade de potência activa no sistema. Esta injeção de potência, embora represente muito pouco no global do sistema eléctrico, provoca um reequilíbrio mais eficaz do balanço de potência na rede.

Utilizando o mesmo valor de carga regulável (1,9MW), a estabilidade da rede é analisada sem a restrição sentida em 5.24. Com este modo de funcionamento activo, as potências injectadas na rede pelas centrais geotérmicas e por cada um dos grupos diesel da Central Térmica do Caldeirão são ilustradas nas figuras 5.31 e 5.30.

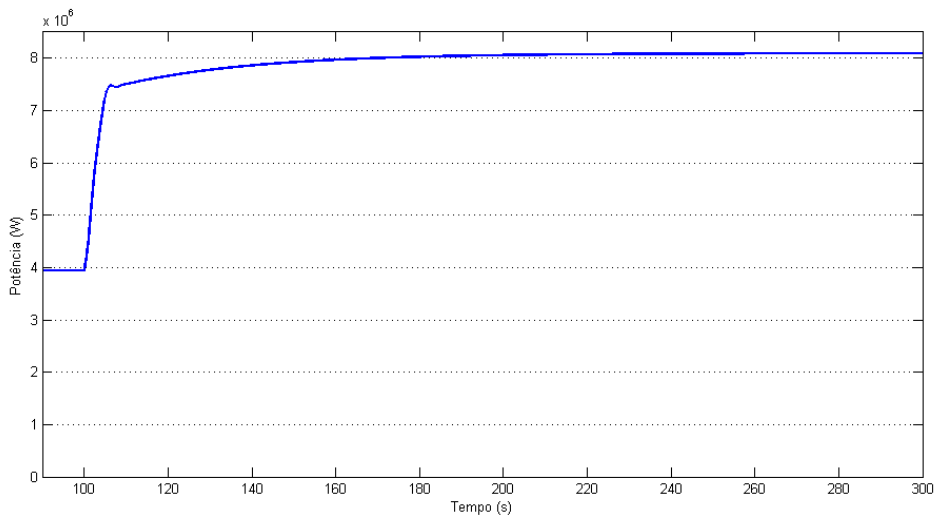


Figura 5.30: Potência activa injectada por cada gerador de CTCL

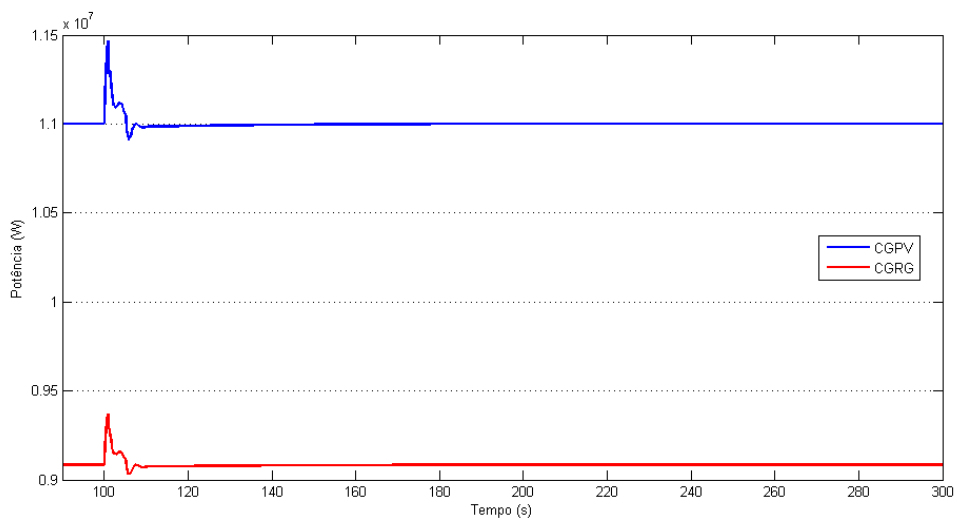


Figura 5.31: Potência activa injectada por CGPV e CGRG

5.2.2.2 Análise de Resultados

Os modos de operação de carga regulável e *vehicle-to-grid* apresentam resultados diferenciados que resultam das suas possibilidades de participação. Se no modo de carga regulável apenas é

efectuado um ajuste de carga em função das capacidades de potência presentes na rede, no modo V2G existem duas fases de ajuste de carga. Numa fase inicial é efectuada a redução de carga de forma exactamente igual ao modo de carga controlável. No entanto, quando a redução de carga se esgota por não haver mais carga para regular, da-se início à segunda fase que caracteriza o modo de funcionamento em *vehicle-to-grid*. Nesta fase da regulação, a potência que era absorvida como carga passa a estar disponível como geração, injectando potência até ao valor que as baterias dos VE representavam como carga.

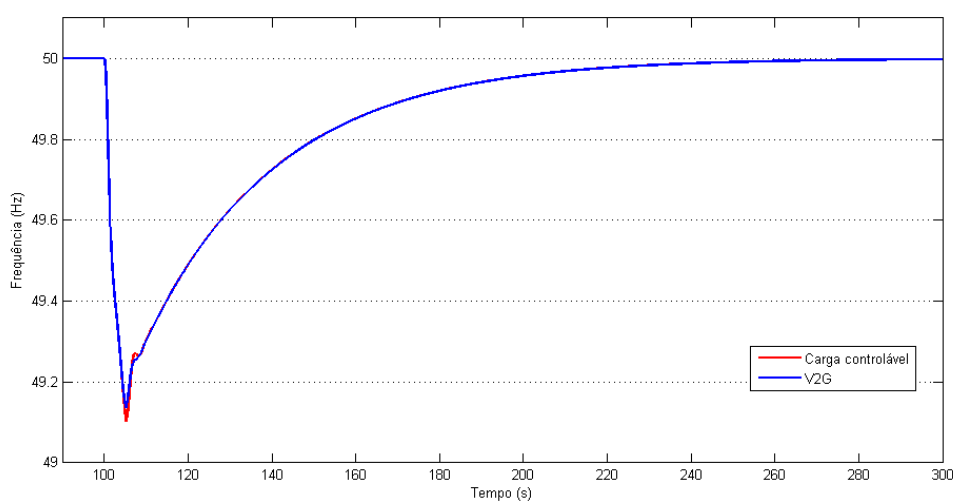


Figura 5.32: Frequência na rede

O resultado obtido na estabilidade da frequência na rede eléctrica isolada de S. Miguel apresentado na figura 5.32 reflete as diferenças de controlo entre os dois modos aqui apresentados. No modo de carga controlável a variação de frequência é superior à registada no modo V2G em cerca de 0,5Hz. Esta melhoria registada com a injeção de potência por parte dos veículos eléctricos, apesar de reduzida, demonstra o impacto positivo associado a este modo de funcionamento.

Como se pode verificar na figura 5.33, a injeção de potência activa por parte dos VE na rede resume-se a um intervalo de tempo reduzido (aproximadamente 5 segundos). Assim sendo, a potência injectada está perfeitamente englobada na potência total disponível pelas baterias dos VE ligados à rede, não havendo o risco de estar a simular uma injeção superior à realmente disponível.

Quando é efectuada uma comparação directa entre as produções dos geradores da CTCL nos dois modos de funcionamento dos veículos eléctricos verifica-se uma diferença de resposta muito interessante. A área existente entre as variações de produção com carga controlável e V2G na Central Térmica do Caldeirão (figura 5.34) representa um terço do valor da área existente entre as variações de potência activa controlável apresentada em 5.33. De facto, a energia injectada pelos VE no modo *vehicle-to-grid* é a mesma que deixa de ser injectada na rede pelos três grupos diesel da CTCL.

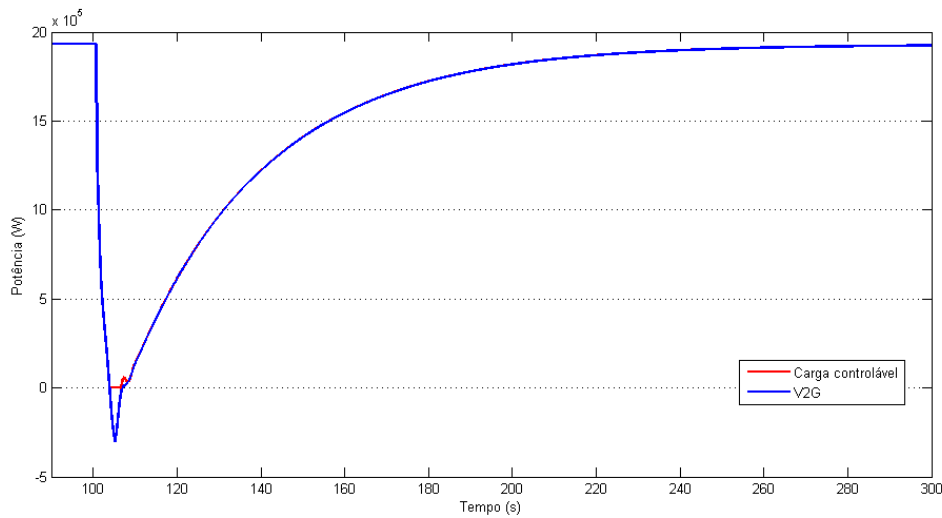


Figura 5.33: Potência activa controlável dos VE

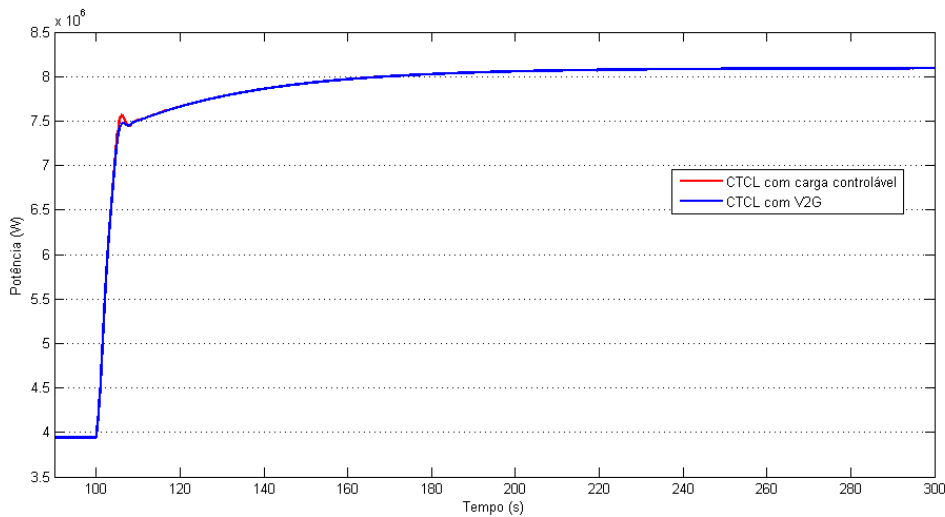


Figura 5.34: Potência activa injectada na rede por cada gerador de CTCL

5.2.3 100% de Carga controlável nos VE

Tendo por base a mesma integração de VE apresentada no capítulo 4, nesta secção é analisado o impacto que uma maior participação da carga dos VE tem na regulação de frequência do sistema.

Sendo que, neste cenário, se considera que a totalidade da carga dos veículos eléctricos está disposta a participar na operação do sistema, a parcela de carga controlável corresponde a 3,7MW de potência.

Este cenário de participação é definido pela função de controlo 3.14. Assim sendo, a participação da carga está limitada à redução da potência que esta absorve da rede em função da frequência

existente no sistema.

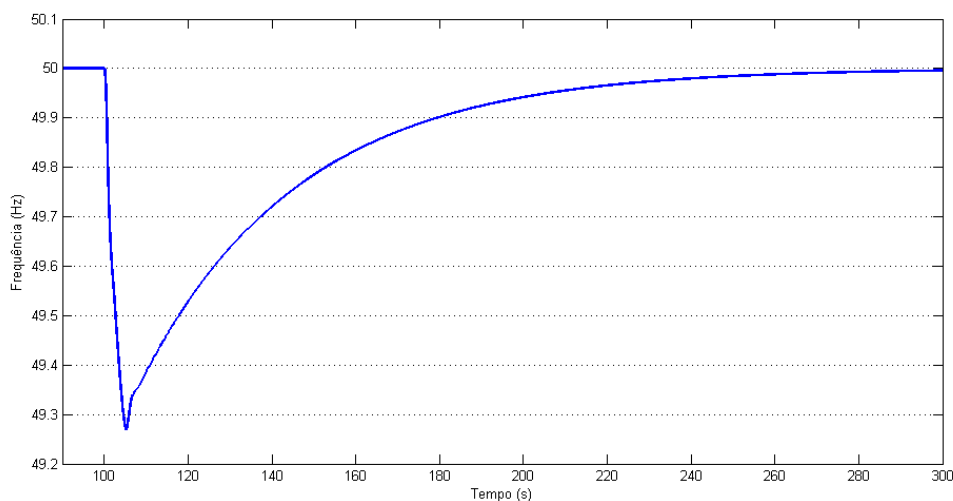


Figura 5.35: Frequência na rede

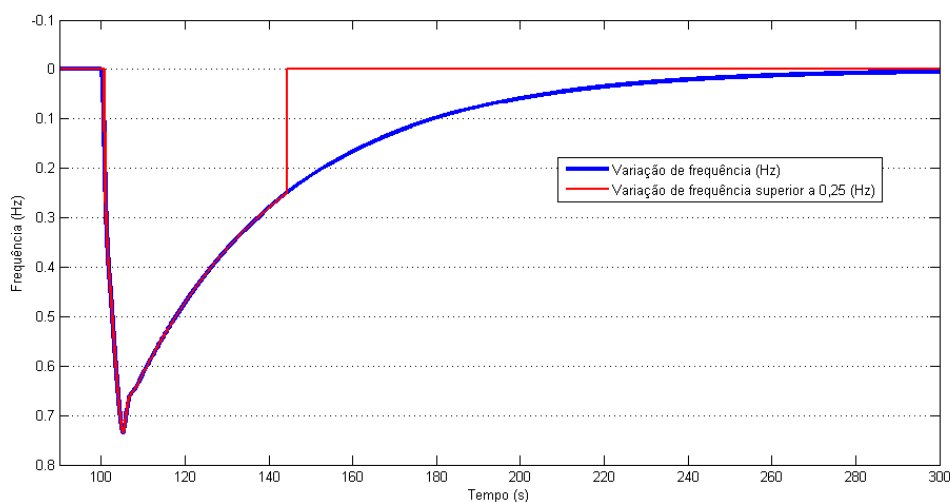


Figura 5.36: Variação de frequência para controlo dos VE

Com a regulação de carga disponível para a totalidade dos VE considerados no cenário de integração de 2,5%, a estabilidade transitória da rede aumenta. Nestas condições de exploração, o desvio de frequência fica limitado a 0,7Hz, distanciando-se do desvio máximo de 1Hz (figura 5.35).

Confirmando o que foi referido na análise de resultados da secção anterior, a redução de 3,7MW de potência na carga da rede introduz um efeito semelhante a uma injeção de potência na rede. Na verdade, a regulação de aproximadamente 10% da carga total presente no sistema

tem um impacto muito significativo, que se traduz directamente no balanço de potências da rede e, por relação directa, na estabilidade dinâmica da sua frequência.

Fazendo uso da variação de frequência para controlo dos VE ilustrada em 5.36, a potência activa controlável dos VE apresenta a evolução temporal da figura 5.37.

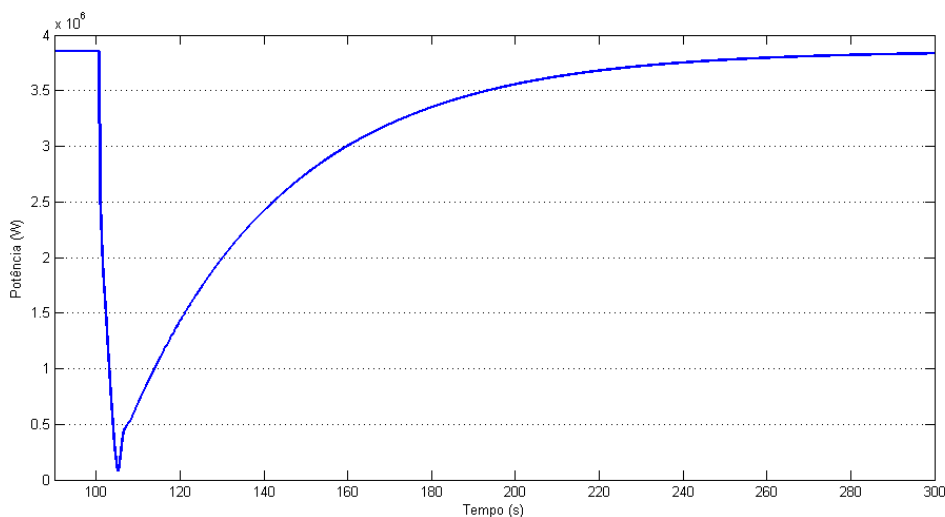


Figura 5.37: Potência activa controlável dos VE

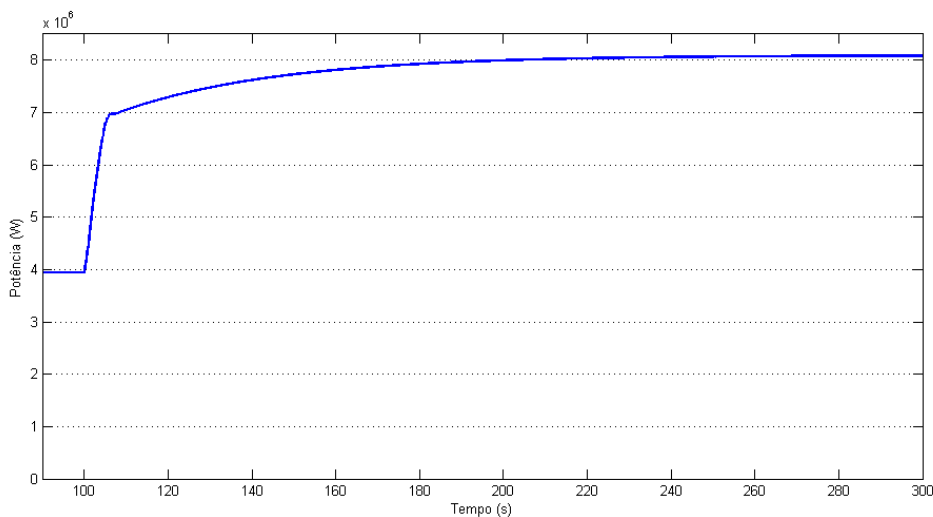


Figura 5.38: Potência activa injectada por cada gerador de CTCL

Como se pode verificar na figura 5.38, os valores de potência máximo e mínimo injectados por cada um dos geradores da Central Térmica do Caldeirão são exactamente os mesmos que ocorrem nos outros cenários de integração dos VE. Os 4MW produzidos em cada grupo diesel antes da

perturbação da produção eólica correspondem a 12MW de potência total da CTCL e destinam-se a alimentar a carga existente no sistema. Da mesma forma, os 4MW adicionais injectados depois da perda de potência do PE correspondem à potência perdida (12MW) que é assumida pelos geradores síncronos desta central térmica.

Apesar de os valores extremos coincidirem nos vários modos de funcionamento por serem a compensação da produção do PE dos Graminhais, o mesmo não ocorre na transição entre eles. De facto, a transição observada na produção dos geradores da CTCL é ainda mais suave que a registada no cenário com 50% de carga controlável. A menor dependência destes geradores síncronos na regulação da frequência da rede é explicada pela maior percentagem de carga regulada.

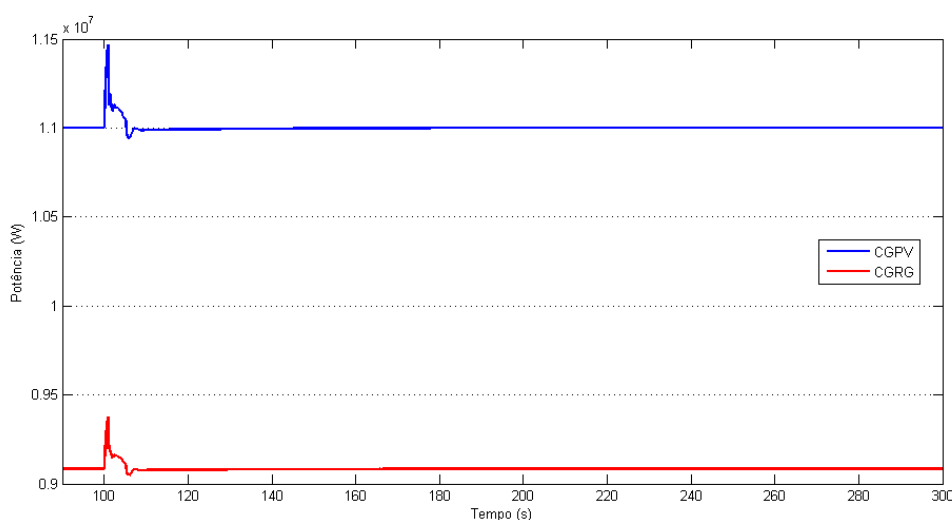


Figura 5.39: Potência activa injectada por CGPV e CGRG

O valor de potência injectado pela Central Geotérmica da Ribeira Grande e pela Central Geotérmica do Pico Vermelho mantém a característica constante desta análise. Como se pode constatar em 5.39, a CGRG injecta em permanência 9MW de potência e a CGPV 11MW. Estes valores de potência são constantes em qualquer cenário de carga ou tipo de participação dos VE considerado.

5.2.4 Análise de Resultados

A análise apresentada nesta secção foca apenas o modo de funcionamento dos veículos eléctricos como carga controlável. Assim sendo, os três cenários de participação analisados ao longo do capítulo 5 são comparados com o objectivo de evidenciar as diferenças dos resultados obtidos.

Esta comparação só é viável, uma vez que as condições de exploração da rede são mantidas constantes nas três análises efectuadas. As centrais geotérmicas apresentam os mesmos perfis de produção constantes em qualquer cenário de carga apresentado. O Parque Eólico dos Graminhais sofre sempre a mesma variação de vento e conseqüente variação de produção. Os geradores presentes na CTCL, responsáveis pela reposição da geração perdida no parque eólico, são mantidos

e a carga ligada à rede é sempre a mesma. O único factor variável nesta análise é a percentagem de participação da carga representativa dos VE nas funções de controlo da frequência da rede.

Os três cenários de participação abordados apresentam resultados que refletem o impacto que a gestão activa desta carga/geração provoca na estabilidade transitória do sistema eléctrico, permitindo melhorar as condições de operação face a maiores níveis de integração de produção renovável.

Como se pode verificar na figura 5.40, os valores de carga disponíveis para regular a frequência da rede diferem em função da percentagem de carga que aceita participar nas operações de gestão do sistema.

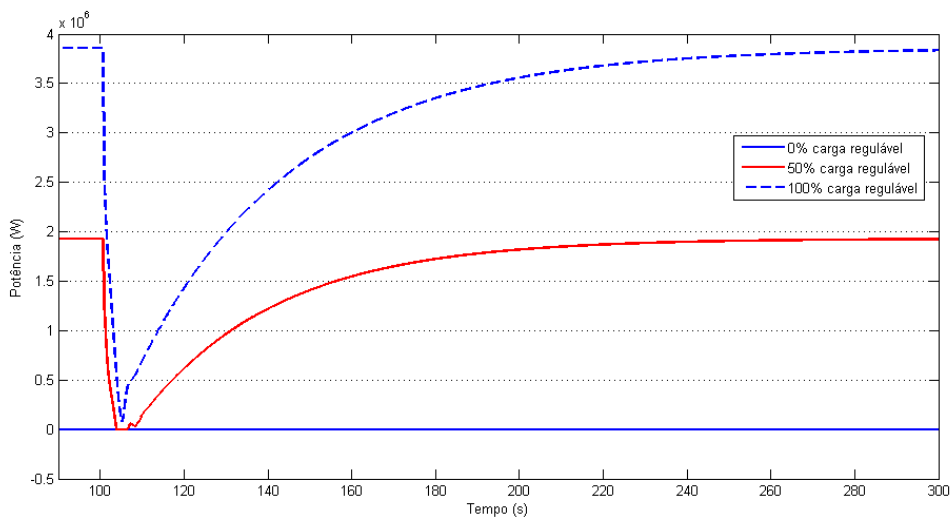


Figura 5.40: Potência activa controlável dos VE

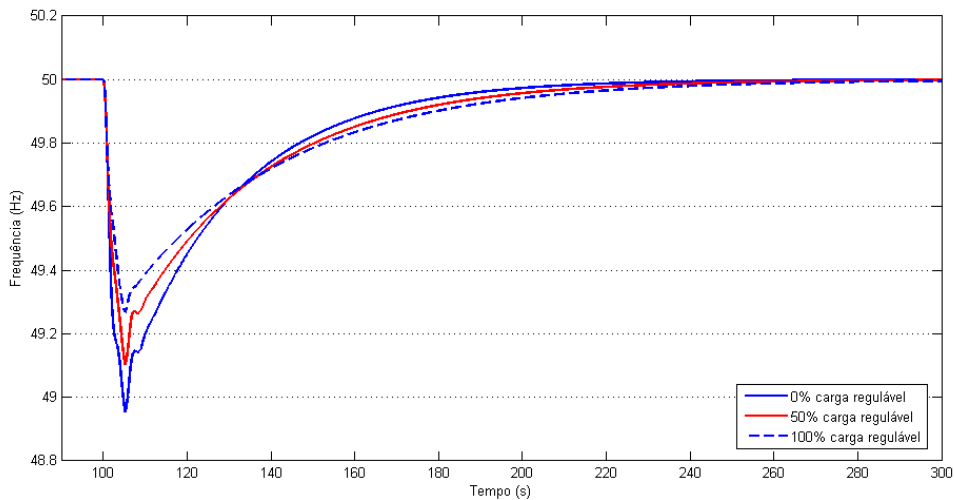


Figura 5.41: Frequência na rede

Seja em produção ou em carga, um valor de potência activa regulável na rede é uma ferramenta que permite interagir e participar na regulação da frequência do sistema. A energia armazenada nas baterias dos VE apresenta características de despacho imediatas, que contribuem para a sua participação no controlo primário de frequência. As variações de potência no interface inversor não apresentam inércia ou atrasos de resposta como os geradores diesel considerados nesta rede. A injeção ou consumo de energia é apenas limitada pela sua capacidade.

Na figura 5.41 são apresentadas as variações de frequência sentidas nos três cenários de participação. Com base nestes resultados, pode concluir-se que um aumento de participação de carga na regulação da frequência da rede aumenta a sua estabilidade. Neste caso, a carga regulável representa a integração de veículos eléctricos na rede isolada da ilha de S. Miguel.

A participação da totalidade dos VE ligados na rede representa perto de 10% do total da carga. Para a rede considerada, a regulação de 3,7MW de carga proporciona uma diminuição da variação de frequência de 0,25Hz face ao cenário em que não existe regulação de carga. A tendência observada no decorrer das análises apresentadas permite concluir que, a participação de um maior valor de potência de VE nas operações de gestão da rede vem aumentar a estabilidade transitória da mesma, nomeadamente ao nível da frequência do sistema.

5.3 Conclusões

Neste capítulo foi estudado o contributo dado pela capacidade de controlo dos VE (controlo de carga e operação em V2G) para efeitos de regulação primária de frequência em redes isoladas, tendo sido demonstrada a sua contribuição para o aumento da segurança dinâmica na rede em situações de maiores níveis de integração de renováveis.

Tendo por base as actuais condições de carga no cenário de vazio, constata-se que a penetração de produção renovável neste sistema isolado está limitada à primeira fase do projecto do Parque Eólico dos Graminhais, com 10 turbinas eólicas e uma injeção de potência na rede de 8MW.

Na perspectiva de aumentar a penetração de produção eólica prevista na segunda fase do projecto é analisado um cenário de carga futuro. Nessas condições são adicionados 4MW de carga na rede que representam o aumento de consumo esperado em 2015 e 3,7MW de VE com diferentes capacidades de regulação. Este novo cenário de carga viabiliza o aumento de potência eólica instalada para os 14,4MW previstos na segunda fase do projecto.

Neste sentido, a regulação da carga pertencente aos VE é utilizada no controlo primário de frequência da rede, permitindo a maior penetração da produção eólica intermitente sem perda de qualidade de serviço e garantindo a estabilidade dinâmica do sistema.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Principais Conclusões e Resultados Obtidos

A integração de veículos eléctricos em sistemas isolados permite um aumento dos aproveitamentos de energia renovável de carácter intermitente. Além de permitir um aumento de geração convencional e conseqüente aumento da inércia do sistema, a sua participação na gestão das operações da rede possibilita um aumento da reserva girante do sistema melhorando a sua robustez.

O aumento dos valores da reserva potencia a exploração da produção renovável eólica sem perda de condições de estabilidade dinâmica. Este factor é muito importante em sistemas isolados, uma vez que a dependência de recursos externos fósseis representa, por vezes, custos associados muito superiores aos que se encontram em grandes sistemas eléctricos. As ilhas apresentam tipicamente excelentes condições atmosféricas de vento que proporcionam elevados valores de potência, conseguidos de uma fonte de energia limpa, inesgotável e disponível no meio de forma gratuita.

A flexibilidade e controlabilidade de carga apresentada pelos interfaces de electrónica de potência presentes nos veículos eléctricos apresenta um conjunto de condições que tornam este novo tipo de carga ideal para a participação no controlo e regulação da frequência da rede. Além de diminuir a dependência energética do petróleo na área da mobilidade, a capacidade de regulação apresentada pelos VE permite a implementação de controlos locais de frequência. A carga controlável dos VE pode ser usada como reserva para fornecimento de controlo primário de frequência, aumentando a segurança dinâmica da rede.

No seguimento da análise dos resultados obtidos no capítulo 5 podem ser efectuadas as seguintes considerações:

- **Capacidade Actual de Produção Eólica** — A rede eléctrica isolada da ilha de S. Miguel não comporta a introdução de um parque eólico que injecte mais de 8MW de potência. A carga actualmente existente no cenário de vazio é insuficiente para que seja absorvido

um maior nível de produção intermitente sem causar problemas de estabilidade ao nível da frequência na rede.

- **VE como Carga Não Controlável** — O aumento de carga (4MW de crescimento de consumo e 3,7MW de VE) num sistema isolado obriga à introdução de um novo gerador com capacidade de regulação, conferindo ao sistema melhores condições de estabilidade dinâmica.
- **VE como Carga Controlável** — A regulação da carga dos VE permite contribuir para o controlo primário da frequência da rede e conseqüente aumento de penetração de energia renovável.
- **Vehicle-to-grid** — Com um princípio de funcionamento semelhante ao de carga controlável, este modo de funcionamento possui também capacidade de injectar potência activa na rede e melhorar a resposta dada na estabilização da frequência da rede.

A metodologia de análise implementada ao longo desta dissertação pode ser facilmente aplicada a outros sistemas eléctricos isolados. Com as respectivas adaptações ao nível das unidades de geração e dos valores de potência envolvidos em cada interveniente é possível realizar estudos de simulação dinâmica que avaliem o impacto da integração dos veículos eléctricos em diversas redes eléctricas isoladas.

6.2 Trabalho Futuro

O estudo apresentado neste trabalho foca a sua análise no comportamento dinâmico de uma rede isolada quando sujeita a variações de produção de fonte renovável, sendo a estabilidade da rede observada do ponto de vista da frequência.

A integração de veículos eléctricos nas redes energéticas isoladas está ainda a dar os primeiros passos. No caso concreto da ilha de S. Miguel, este estudo apresenta-se como um bom ponto de partida para estudos futuros que englobem outras áreas de análise.

A análise efectuada à integração dos VE pode ser estendida ao nível das tensões presentes nos diversos pontos da rede a à simulação de defeitos mais severos no PE. A título de exemplo, a ocorrência de um curto-circuito num ponto específico da rede coloca dificuldades acrescidas às máquinas síncronas, podendo ser estudada a contribuição dos veículos eléctricos neste tipo de perturbação.

Uma outra área de estudo pode centrar-se em mecanismos remuneratórios para incentivar a participação dos proprietários de VE neste tipo de serviços. As participações simuladas ao longo deste trabalho podem e devem ser consideradas participações na gestão e operação do sistema com direito a remuneração, de forma semelhante a outros sistemas de suporte da rede que são chamados a intervir na ocorrência de perturbações.

Numa vertente mais prática e próxima de produto físico final, deve ser abordada a componente dos interfaces baseados em electrónica de potência. Estes inversores devem ser concebidos com

capacidade de leitura e controlo local da estabilidade da rede. Sendo também responsáveis pela gestão e criação de históricos de funcionamento, devem ser capazes de interagir com os diversos intervenientes de operação do sistema, permitindo a implementação de um sistema remuneratório eficaz.

Referências

- [1] European Wind Energy Association. www.ewea.org.
- [2] European Transmission System Operators. "European Wind Integration Study (EWIS) Towards a Successful Integration of Wind Power into the European Electricity". January 2007. Final Report.
- [3] Emmanouel S. Karapidakis. "Transient Analysis of Crete's Power System with Increased Wind Power Penetration". Abril 2007. POWERENG 2007, Setúbal, Portugal.
- [4] Luís Filipe Marques da Silva. "Análise do Comportamento Dinâmico da Rede Eléctrica da ilha do Chipre em Situações de Perturbação e em Cenários de Integração Eólica". Julho 2008. FEUP.
- [5] J. A. Peças Lopes, M. H. Vasconcelos, Ruy Lopes dos Santos, J. D. Fonseca. "Estudos de Impacto Eléctrico da Integração de Produção Eólica Adicional nas Redes Eléctricas da República de Cabo Verde - Caso de Santiago.
- [6] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. "Manual de Procedimentos do Acesso e Operação do SEPM". Abril 2004. Artigo 59º do Regulamento de Relações Comerciais.
- [7] J. Tomic, W. Kempton. "Using Fleets of Electric-Drive Vehicles for Grid Support". June 2007. *Journal of Power Sources*, vol. 168, pp. 459-468.
- [8] W. Kempton, J. Tomic. "Vehicle-to-Grid Power Implementation: From Stabilizing the Grid to Supporting Large-Scale Renewable Energy". 2005. *Journal of Power Sources*, 144, pp. 280-294.
- [9] J. N. Fidalgo, J. A. Peças Lopes, Vladimiro Miranda. "Neural Networks Applied to Preventive Control Measures for the Dynamic Security of Isolated Power Systems with Renewables". November 1996. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 4.
- [10] E. S. Karaoidakis, N. D. Hatziaargyriou. "Online Preventive Dynamic Security of Isolated Power Systems Using Decision Trees". May 2002. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2.
- [11] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares, P. M. Rocha Almeida. "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System". January 2011. *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1.
- [12] Henrik Lund, W. Kempton. "Integration of Renewable Energy Into the Transport and Electricity Sector Through V2G". Julho 2008. *Energy Policy*, vol.36, pp.3578-3587.
- [13] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares, P. M. Rocha Almeida, P. C. Baptista, C. M. Silva, E. L. Farias. "Quantification of Technical Impacts and Environmental Benefits of Electric Vehicles Integration on Electricity Grids".

- [14] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares, P. M. Rocha Almeida. "Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid". 2009. 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania.
- [15] J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida, F. J. Soares. "Using Vehicle-to-Grid to Maximize the Integration of Intermittent Renewable Energy Resources in Islanded Electric Grids". Junho 2009. ICCEP 2009 - International Conference On Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact, Capri, Italy.
- [16] J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida, F. J. Soares, C. L. Moreira. "Electric Vehicles in Isolated Power Systems: conceptual Framework and Contribution to Improve the Grid Resilience". Março 2010. CMTEE 2010 - Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency, vilamoura, Portugal.
- [17] C. L. Moreira. "Identification and Development of Microgrids Emergency Control Procedures". 2008.
- [18] "Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies". August 1992. IEEE Standard 421.5-1992.
- [19] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi and D. Poli. "Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply". 2002. Proceedings IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.
- [20] F. Katiraei, M. Iravani. "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units". November 2006. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no.4, pp. 1821-1831.
- [21] F. Katiraei, M. Iravani, P. W. Lehn. "Microgrid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process". January 2005. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no.1, pp. 248-257.
- [22] R. Lasseter and P. Piagi. "Providing Premium Power Through Distributed Resources". 2000. Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences.
- [23] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira. "Defining Control Strategies for Micro-Grids Islanded Operation". June 2006. IEEE PWRS - IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 916-924.
- [24] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares, P. M. Rocha Almeida, P. C. Baptista, T. L. Farias. "Quantification of Technical Impacts and Environmental Benefits of Electric Vehicles Integration on Electricity Grids". Maio 2009.
- [25] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares, P. M. Almeida, M. Moreira da Silva. "Smart Charging Strategies for Electric Vehicles: Enhancing Grid Performance and Maximizing the Use of Variable Renewable Energy Resources". May 2009. ES24, Stavanger, Norway.
- [26] Electricidade dos Açores. "Caracterização das Redes de Transporte e Distribuição de Energia Eléctrica da Região Autónoma dos Açores". Março 2010. Situação em 31 de Dezembro de 2009.
- [27] Empresa de Electricidade e Gáz. "Parque Eólico dos Graminhais, Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução". Abril 2007. Volume II - Sumário Executivo do Recape do Parque Eólico dos Graminhais.

- [28] Electricidade dos Açores. "EDA Informa". Julho Agosto 2010. nº 135.
- [29] Empresa de Electricidade e Gáz. "Parque Eólico dos Graminhais, Estudo de Impacte Ambiental". Volume II - Resumo não Técnico.
- [30] Instituto de Seguros de Portugal. "Parque Automóvel Seguro"2005 - 2009.