

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Dimensionamento de Sistemas de Armazenamento
de Energia para Melhoria da Estabilidade de
Frequência em Redes Isoladas com Elevada
Integração de Energias Renováveis**

Maria Madalena Correia Gaspar

VERSÃO FINAL

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

Orientadora: Prof. Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos

Junho de 2010

Resumo

Nesta dissertação é dimensionado um sistema de armazenamento de energia para uma rede isolada com elevada integração de energias renováveis. Este tipo de redes, por si só, merece especial atenção, visto que, não estando ligada a uma grande rede, é mais difícil fazer com que os valores da frequência se mantenham dentro da gama de valores admissíveis devido ao baixo valor de inércia, mas também porque geralmente integra uma grande quantidade de produção renovável.

Desta forma, a grandeza a que se dá especial atenção no presente trabalho é a frequência. É estudada a variação desta grandeza na resposta do sistema face a perturbações. Perturbações estas que consistem nas variações que a produção renovável experimenta. A produção de energia eléctrica, na rede em estudo, é assegurada por uma central Diesel e dois parques eólicos, e é estudado o comportamento do sistema, quando instalados no mesmo, dois parques fotovoltaicos.

Para realizar o referido estudo, analisam-se dados referentes a séries temporais de produção, em parques eólicos e fotovoltaicos com características semelhantes aos integrados neste sistema, de maneira a serem conhecidas as variações de produção que os parques eólicos e fotovoltaicos experimentam. Com o conhecimento destas variações, são feitas simulações para estudar a resposta do sistema face a este tipo de perturbações.

Tendo em conta os valores de desvios transitórios de frequência obtidos nas simulações, analisa-se a pertinência de instalar um sistema de armazenamento de energia na rede. Para o caso de estudo analisado, verificou-se que é necessária a instalação daquele sistema para garantir que o desvio de frequência esteja dentro dos padrões estipulados, melhorando assim a estabilidade da rede face à ocorrência de variações de produção renovável.

Abstract

In this dissertation is scaled a energy storage system for an isolated grid with high integration of renewable energy. This kind of networks, by itself, deserves special attention because, not being connected to a large network, it is more difficult to make that the values of the frequency of the grid are kept within the range of permissible values due to the low inertia, but also because generally it integrates a large amount of renewable production.

So, in this work it is given special attention to the frequency of the grid. It is studied the variation of this magnitude within the system response to disturbances. These disturbances consist in variations on the renewable production. The production of electrical energy, in the grid that is studied in this work, is assured by a Diesel plant and two wind farms, and is studied the behavior of the system, when installed in it, two photovoltaic plants.

In order to make the study mentioned before, one analyze is made to temporal series of production, in wind farms and photovoltaic plants with similar features to the ones present in the system, so this way is possible to know the variations that are verified in the renewable production. By knowing these variations, simulations can be made and then is possible to study the response of the systems when disturbances, like these variations, occur.

Taking into account the values of the transitory frequency deviations obtained in the simulations, is analyzed the interest of the installation of one energy storage system in the grid. For the case studied in this work, it is verified that is necessary the installation of that system in order to guarantee that the frequency deviation is kept in the standard values, so in this way the stability of the grid is improved when variations on the renewable production occur.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, Prof. Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, pelo tempo disponibilizado para esclarecimento de dúvidas, pelos comentários e conselhos dados durante a execução do trabalho. Agradeço também o fornecimento de dados e de bibliografia, ambos cruciais para a realização do presente trabalho.

Gostaria de mostrar a minha gratidão ao Prof. Doutor Cláudio Domingos Monteiro pelo fornecimento de dados e bibliografia, bem como pela prontidão e tempo disponibilizado para o esclarecimento de dúvidas sobre aspectos pontuais do trabalho.

Por fim, mas não com menos importância, chega o agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, Filomena da Ascensão Correia e José Francisco Gaspar, que, embora tenham estado geograficamente longe, nunca deixaram de me dar apoio e motivação ao longo de todo o curso, especialmente durante os últimos meses.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Considerações Gerais.....	1
1.2 - Objectivos da Dissertação.....	2
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2	3
Rede Isolada em Estudo	3
2.1 - Introdução.....	3
2.2 - Constituição do SEE	3
2.3 - Geradores	5
2.4 - Despacho	5
2.5 - Regulador de Velocidade	6
2.6 - Conclusões	9
Capítulo 3	11
Análise das Variações de Produção Renovável.....	11
3.1 - Introdução.....	11
3.2 - Análise das Séries Temporais de Produção Renovável	11
3.2.1 - Produção Eólica	11
3.2.2 - Produção Fotovoltaica	16
3.2.2.1 - Parque Fotovoltaico 1	17
3.2.2.2 - Parque Fotovoltaico 2.....	19
3.2.2.3 - Parque Fotovoltaico 3.....	21
3.3 - Conclusões	24

Capítulo 4	25
Sistemas de Armazenamento de Energia	25
4.1 - Introdução	25
4.2 - Volantes de Inércia	26
4.2.1- Aspectos Construtivos e Princípio de Funcionamento	26
4.2.2- Vantagens e Desvantagens	27
4.2.3- Aplicações Práticas	27
4.2.4- Fabricantes e Características dos Produtos	29
4.2.5- Modelo Dinâmico Utilizado para o Volante de Inércia no <i>Simulink</i> ®	32
4.3 - Baterias de Iões de Lítio	34
4.3.1- Aspectos Construtivos e Princípio de Funcionamento	34
4.3.2- Vantagens e Desvantagens	35
4.3.3- Aplicações Práticas e Fabricantes	35
4.4 - Conclusões	36
Capítulo 5	37
Resultados Obtidos para o Caso de Estudo	37
5.1 - Introdução	37
5.2 - Critérios de Avaliação	38
5.3 - Perturbações	39
5.3.1- Saída Intempestiva de Toda a Produção Renovável	40
5.3.2- Variações Intermitentes de Produção Renovável	41
5.4 - Resultados das Simulações	42
5.4.1- Sem Inclusão de Sistema de Armazenamento de Energia	42
5.4.2- Com Inclusão de Sistema de Armazenamento de Energia	45
5.5 - Conclusões	49
Capítulo 6	51
Conclusões	51
6.1 - Principais Contribuições	51
6.2 - Perspectivas de Desenvolvimento	51
Referências	53
Anexo A.....	55
Características do Volante de Inércia	55

Lista de figuras

Figura 2.1 - Contribuição de cada um dos tipos de produção para a potência total instalada	4
Figura 2.2 - Despacho para a central térmica e parques eólicos e fotovoltaicos.....	6
Figura 2.3 - Diagrama de blocos do regulador típico utilizado.....	7
Figura 2.4 - Resposta do sistema, em termos de desvio de frequência, face à saída de toda a produção renovável, considerando diferentes valores para os parâmetros do regulador de velocidade típico	8
Figura 3.1 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em MW) de segundo a segundo	13
Figura 3.2 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em % em relação à ponta máxima de produção) de segundo a segundo	14
Figura 3.3 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em MW) de 5 em 5 segundos.....	14
Figura 3.4 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 5 em 5 segundos	15
Figura 3.5 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em MW) de 10 em 10 segundos	15
Figura 3.6 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 10 em 10 segundos	16
Figura 3.7 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em MW) de 5 em 5 segundos no Parque Fotovoltaico 1	18
Figura 3.8 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 5 em 5 segundos no Parque Fotovoltaico 1 ...	18
Figura 3.9 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em MW) de 60 em 60 segundos para o dia 4 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2	19
Figura 3.10 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 60 em 60 segundos para o dia 4 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2.....	20

Figura 3.11 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em MW) de 60 em 60 segundos para o dia 5 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2	20
Figura 3.12 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 60 em 60 segundos para o dia 5 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2	21
Figura 3.13 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 4º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3	22
Figura 3.14 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 7º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3	22
Figura 3.15 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 8º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3	23
Figura 3.16 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 14º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3	23
Figura 4.1 - Partes constituintes de um volante de inércia [8].	26
Figura 4.2 - Nesta figura, encontra-se, do lado esquerdo o volante de inércia propriamente dito [12].	29
Figura 4.3 - Características dos produtos desenvolvidos pela <i>Powercorp</i>	29
Figura 4.4 - Características dos produtos desenvolvidos pela <i>Beacon Power</i>	30
Figura 4.5 - Características dos produtos desenvolvidos pela <i>Pentadyne</i>	31
Figura 4.6 - Características dos produtos desenvolvidos pela <i>ActivePower</i>	31
Figura 4.7 - Características dos produtos desenvolvidos pela <i>Socomec</i>	31
Figura 4.8 - Desvio de frequência <i>versus</i> variação de potência activa.	32
Figura 4.9 - Diagrama de blocos do volante de inércia.	34
Figura 5.1 - Modelo utilizado no <i>Simulink</i> ® para representação da rede.	37
Figura 5.2 - Modelo contido no bloco correspondente às variações na produção dos geradores diesel e desvio de frequência, tendo como entradas as variações de produção renovável e a potência produzida pelo volante de inércia.	38
Figura 5.3 - Perturbação 1: Saída intempestiva de toda a produção renovável	40
Figura 5.4 - Perturbação 2: Variação de 50% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 10% de produção eólica de segundo a segundo; Perturbação 3: Variação de 50% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 20% de produção eólica de 5 em 5 segundos; Perturbação 4: Variação de 50% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 25% de produção eólica de 10 em 10 segundos	41
Figura 5.5 - Perturbação 5: Variação de 80% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 10% de produção eólica de segundo a segundo; Perturbação 6:	

Variação de 80% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 20% de produção eólica de 5 em 5 segundos; Perturbação 7: Variação de 80% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 25% de produção eólica de 10 em 10 segundos	42
Figura 5.6 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia	44
Figura 5.7 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo) sem instalação de um sistema de armazenamento	44
Figura 5.8 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação de um sistema de armazenamento de energia	46
Figura 5.9 - Potência produzida pelo volante de inércia após a ocorrência da perturbação 1	46
Figura 5.10 - Energia libertada pelo volante de inércia após a ocorrência da perturbação 1	47
Figura 5.11 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo) com instalação de um sistema de armazenamento de energia	47
Figura 5.12 - Potência produzida pelo volante de inércia perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo)	48
Figura 5.13 - Energia libertada pelo volante de inércia perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo)	49
Figura A.1 - Características do volante de inércia escolhido para ser instalado na rede isolada em estudo [14].	56

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Potências instaladas na rede isolada em estudo	4
Tabela 2.2 – Características de cada um dos geradores que constituem a central térmica.....	5
Tabela 2.3 – Valor da carga, perdas e produção	5
Tabela 2.4 – Soluções possíveis para o pré-despacho da central térmica	6
Tabela 2.5 – Valores considerados para os parâmetros do regulador de velocidade	8
Tabela 2.6 – Valores considerados para todos os parâmetros do regulador de velocidade.....	9
Tabela 3.1 – Variações máximas de produção eólica para diferentes intervalos de tempo do dia 4	12
Tabela 3.2 – Variações máximas de produção eólica para diferentes intervalos de tempo do dia 5	13
Tabela 3.3 – Variações máximas de produção eólica consideradas nas simulações para a análise do sistema.....	16
Tabela 3.4 – Variações máximas de produção fotovoltaica para diferentes intervalos de tempo do dia 1 no Parque Fotovoltaico 1.....	17
Tabela 4.1 – Parâmetros para três volantes de inércia.	33
Tabela 5.1 – Descrição das perturbações consideradas nas simulações do comportamento dinâmico da rede isolada em estudo.	40
Tabela 5.2 – Valores máximos dos desvios de frequência e valor máximo da variação da produção renovável (sem instalação de volante de inércia)	43
Tabela 5.3 – Valores máximos para os desvios de frequência e valor máximo da variação da produção renovável (considerando a instalação de um volante de inércia)	45

Abreviaturas

AGC	<i>Automatic Generation Control</i>
DC	<i>Direct Current</i>
RG	Reserva Girante
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
UPS	<i>Uninterruptable Power Supply</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Considerações Gerais

Na actualidade, a produção de energia eléctrica é assegurada por grandes centrais térmicas, nucleares e hídricas centralizadas, sendo a energia transportada por longas distâncias e posteriormente distribuída pelos consumidores. Esta situação não é a mais desejada, visto que desta forma há uma dependência dos combustíveis fósseis a nível internacional, além de que se verifica que a instabilidade política tem vindo a afectar o preço dos combustíveis fósseis. Estes aspectos juntamente com as preocupações ambientais e alterações climáticas, fazem com que seja necessário tomar medidas [1].

De acordo com [2], uma das medidas a tomar para contrariar os efeitos nefastos sobre o ambiente, é aumentar a integração de produção renovável no sistema eléctrico de energia. Desta forma, ao aumentar a produção de energia utilizando fontes de energia limpas, está a diminuir-se a produção de energia através das centrais térmicas e nucleares.

Nos últimos anos tem-se vindo a verificar uma crescente integração de parques eólicos no sistema eléctrico, onde já houve grandes avanços tecnológicos. Mais recentemente, começou a apostar-se na construção de parques fotovoltaicos. Os avanços tecnológicos, nomeadamente ao nível da electrónica de potência, permitem fazer com que a produção eólica possa ser integrada nas redes sem causar grandes perturbações. Quanto à produção fotovoltaica, ainda há algumas preocupações quanto à sua integração nas redes, visto que esta produção está sujeita a intermitências de grande amplitude sempre que o sol é coberto/descoberto por uma nuvem [3].

A exploração dos tipos de produção nomeados no parágrafo anterior é ainda mais importante numa rede isolada, como por exemplo uma ilha, visto que para além da dependência internacional dos combustíveis fósseis, há o problema do transporte destes mesmos combustíveis do território continental para as ilhas. Assim, é muito importante que se façam estudos de avaliação do comportamento daquele tipo de redes face à integração das energias renováveis.

É no sentido do que foi dito no parágrafo anterior, que se encontra a motivação, presente nesta dissertação, de estudar o comportamento de uma rede isolada, nomeadamente em termos do comportamento transitório da frequência, face às perturbações que podem advir da integração de produção renovável naquela rede.

1.2 - Objectivos da Dissertação

O presente trabalho teve como objectivo a análise da necessidade ou não em instalar dispositivos de armazenamento de energia (volantes de inércia ou baterias de iões de lítio) para melhorar a qualidade de serviço, nomeadamente a estabilidade de frequência, de uma rede isolada, de características reais, com elevada integração de energias renováveis (eólica e fotovoltaica).

Para realizar a referida análise foi necessário recorrer à plataforma de simulação *Simulink*[®], que se encontra disponível no *MatLab*[®], onde se fizeram diversas simulações de maneira a estudar a resposta do sistema face a determinadas perturbações. Estas perturbações consistiram em variações, intempestivas ou intermitentes, da produção eólica e/ou fotovoltaica. Com a análise da resposta do sistema foi então possível determinar se havia ou não necessidade de instalar dispositivos de armazenamento de energia. O modelo dinâmico utilizado para analisar o sistema é simplificado, ou seja, é de barramento único, e envolve a modelização dos sistemas de regulação de frequência e potência activa. De referir que a rede em estudo tem características reais, cujos dados foram fornecidos pelo orientador.

1.3 - Estrutura da Dissertação

O presente documento está estruturado em 6 capítulos e 1 Anexo.

Neste primeiro capítulo está presente a contextualização do trabalho bem como os objectivos em realizar o mesmo.

No capítulo 2 são apresentados aspectos relacionados com o sistema eléctrico de energia em estudo, mais concretamente apresenta as características dos seus componentes.

É no capítulo 3 que é feita uma análise a séries temporais de produção eólica e fotovoltaica de maneira a verificar quais são as variações típicas daquelas produções, pois estas representam as perturbações que serão utilizadas nas simulações.

O capítulo 4 é dedicado aos sistemas de armazenamento de energia, nomeadamente volantes de inércia e baterias de iões de lítio. É referido o seu funcionamento, características, aplicações e alguns fabricantes.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados das simulações da resposta, da rede isolada em estudo, face a perturbações. É feita também, neste capítulo, a análise e as conclusões que se tiram dos resultados obtidos.

O capítulo 6 diz respeito às contribuições da dissertação bem como às perspectivas futuras de desenvolvimento.

No Anexo A apresenta-se o modelo da rede utilizado na plataforma de simulação *Simulink*[®] disponibilizada pelo *MatLab*[®].

Capítulo 2

Rede Isolada em Estudo

2.1 - Introdução

Em todas as redes, sejam elas isoladas ou de grande dimensão, há necessidade em manter o valor da frequência dentro de certos valores de maneira a ser assegurada a qualidade de serviço em regime normal, bem como ser mantida a segurança do sistema em caso de perturbação.

O presente trabalho consiste em fazer a análise dinâmica de uma rede isolada com elevada integração de energias renováveis, nomeadamente eólica e solar. Este tipo de redes merece especial atenção, já que é mais difícil fazer com que a frequência se mantenha dentro da gama de valores estipulados no caso de ocorrer algum tipo de perturbação. É exactamente por esta razão que a gama de valores atrás referida tem maior amplitude neste tipo de redes do que numa rede de grande dimensão onde não se admitem desvios de frequência tão grandes em relação ao valor nominal. Além de se tratar de uma rede isolada, trata-se de uma rede onde a carga é maioritariamente alimentada pela produção renovável, eólica e fotovoltaica. Esta situação traz mais problemas ao sistema, já que estas duas são fontes de energia intermitentes, podendo mesmo a sua produção baixar drasticamente num curto espaço de tempo (segundos).

2.2 - Constituição do SEE

O Sistema Eléctrico de Energia em estudo tem características reais, fornecidas pelo orientador. Este é composto por uma central Diesel, que engloba quatro grupos geradores e dois parques eólicos. Serão adicionados aos grupos produtores mencionados dois parques fotovoltaicos, daí ser necessário o estudo da resposta do sistema face a perturbações, visto que com a inclusão dos parques fotovoltaicos a potência instalada associada à energia renovável irá triplicar. Na tabela 2.1 apresentam-se as potências instaladas no sistema.

Tabela 2.1 – Potências instaladas na rede isolada em estudo

Central Térmica		
Número de unidades	Potência por unidade (MVA)	Potência total instalada (MVA)
4	5,16	20,64
Parque Eólico 1		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
2	0,225	0,45
Parque Eólico 2		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
1	0,66	0,66
Parque Fotovoltaico 1		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
2	0,5	1
Parque Fotovoltaico 2		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
2	0,5	1
Potência não renovável total instalada (MVA)		20,64
Potência renovável total instalada (MW)		3,11

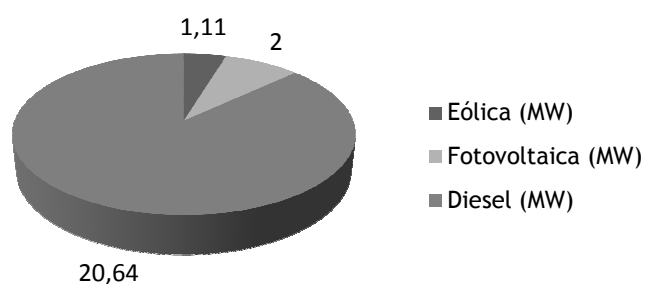


Figura 2.1 - Contribuição de cada um dos tipos de produção para a potência total instalada

Devido à pequena dimensão da rede não é necessário considerar as linhas, nem a sua configuração. No entanto refira-se que os parques eólicos estão ligados a uma subestação e os parques fotovoltaicos estão ligados a outra. Contudo, na eventualidade de reconfiguração de rede, estes podem ficar todos ligados à mesma subestação.

2.3 - Geradores

Como já foi mencionado no presente documento, o sistema em estudo é constituído por 4 geradores térmicos, cujas características se apresentam na tabela que se segue.

Tabela 2.2 – Características de cada um dos geradores que constituem a central térmica

Geradores Síncronos da Central Térmica	
Geradores	G1 a G4
Un (kV)	6.6
Sn (MVA)	5.16
Pmin (MW)	0.7
Pmax (MW)	4.32
H (s) para Sb=Sn	7.34
D (p.u/Hz)	0.01

2.4 - Despacho

O cenário de carga considerado na realização deste trabalho foi o cenário de Horas Cheias de Não Verão (HCNV). Isto porque é no Verão que a carga é máxima, e nesta situação há mais geradores térmicos em funcionamento o que faz com que a rede fique mais forte, e portanto, menos sensível a perturbações que possam ocorrer. No cenário HCNV o valor da carga é menor, há menos geradores térmicos em funcionamento, a rede torna-se mais fraca e menos estável face a perturbações. Daí ser o cenário mais indicado a considerar, visto que o presente trabalho trata um problema de dimensionamento e, geralmente, neste tipo de problema considera-se o pior caso.

Foi efectuado o despacho considerando os valores reais da carga e perdas, previamente fornecidos pelo orientador da dissertação, e que, tanto os parques eólicos como os fotovoltaicos, se encontram a produzir à sua capacidade máxima. Assim sendo a produção, através de fontes renováveis e não renováveis, fica distribuída da forma como se apresenta na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valor da carga, perdas e produção

Carga + perdas (MW)	4,62
Eólica+FV (MW)	3
Diesel (MW)	1,62

Assim, foram analisadas todas as soluções possíveis de pré-despacho para a produção térmica. As soluções consideradas válidas são aquelas que respeitam as restrições técnicas dos geradores e a garantia de existência de reserva girante suficiente. Assim estas restrições são: A potência total produzida pela central Diesel (valor que se encontra na tabela 2.3) tem que respeitar os limites técnicos dos geradores, ou seja a potência produzida pela central térmica tem que ser superior à soma das potências mínimas dos geradores em serviço e inferior à soma das potências máximas dos geradores em serviço; a outra restrição consiste

em a reserva girante (RG) do sistema ter que ser superior a um determinado valor, que neste caso são 3MW, correspondente à potência total instalada nos parques eólicos e fotovoltaicos. Isto porque foi considerada a hipótese de toda a produção renovável sair intempestivamente de serviço no caso de, após reconfiguração da rede, estarem os parques eólicos e os parques fotovoltaicos ligados à mesma subestação e ocorrer, por exemplo, um curto-circuito. A tabela 2.4 contém todas as soluções possíveis para o pré-despacho. Em cada solução de pré-despacho, considerou-se uma igual distribuição de produção pelas máquinas convencionais em serviço.

Tabela 2.4 – Soluções possíveis para o pré-despacho da central térmica

ID	Nr de máquinas a funcionar	Cálculos			Restrições			Solução válida?	Dist Pg por máquina (MW) G1-G4
		Pmin (MW)	Pmax (MW)	RG (MW)	Pmin>Diesel?	Pmax<Diesel?	RG<RGmin?		
1	1	0,7	4,32	2,70	0	0	1	0	1,62
2	2	1,4	8,64	7,02	0	0	0	1	0,81
3	3	2,1	12,96	11,34	1	0	0	0	0,54
4	4	2,8	17,28	15,66	1	0	0	0	0,41

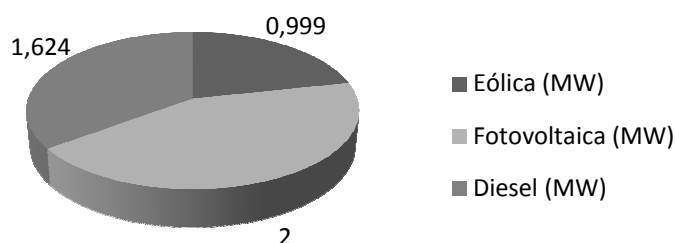


Figura 2.2 - Despacho para a central térmica e parques eólicos e fotovoltaicos

Como se pode verificar através da observação dos valores que constam da tabela 2.4, apenas uma solução respeita todas as restrições. Esta solução corresponde a ter dois geradores térmicos em funcionamento, ficando, desta forma, o sistema com um elevado valor de reserva girante.

2.5 - Regulador de Velocidade

Um SEE ideal seria aquele em que o valor da potência mecânica das máquinas convencionais igualasse sempre o valor da carga juntamente com as perdas. No entanto, na realidade, esta situação não acontece.

A frequência do sistema é dependente do balanço de potência activa. Uma alteração do valor da carga num ponto da rede reflecte-se no sistema através de uma variação do valor da frequência. Por isso é necessário haver um regulador de velocidade em cada grupo gerador para poder fazer o controlo primário da frequência [4].

O controlo secundário é assegurado pelo AGC, *Automatic Generation Control*, que faz com que a frequência retorne ao valor nominal e mantém as trocas de potência entre as áreas de controlo nos valores estipulados, ajustando a produção dos geradores afectos. O AGC tem também como objectivo distribuir a potência requerida, por exemplo um aumento de carga, pelas unidades de maneira a minimizar os custos [4].

Num sistema isolado, O AGC funciona de maneira diferente à que foi mencionada atrás, já que nestes sistemas não há o problema das trocas de potência nas interligações. Contudo, continua a ser função do AGC trazer a frequência para o valor nominal. Isto é conseguido através do acrescento de um controlo integral que actua nos reguladores das unidades com AGC. Este controlo integral mantém a frequência nos 50 Hz em regime estacionário. Esta acção suplementar de controlo é muito inferior ao controlo primário de frequência e entra em funcionamento após o valor desta ter estabilizado (após controlo primário) [4].

Assim, sempre que há um desequilíbrio entre a potência mecânica desenvolvida pela turbina da máquina e a produção solicitada pela rede, o valor da frequência sofre desvios em relação ao valor nominal, visto que o valor da frequência está relacionado com a velocidade de rotação das máquinas convencionais. Portanto, é necessário que a cada turbina esteja associado um regulador de velocidade que controle a potência mecânica da turbina, de modo a eliminar as oscilações do valor da frequência, e também fazer com que esta volte ao seu valor nominal após qualquer tipo de perturbação.

O regulador de velocidade utilizado no presente caso de estudo foi um regulador típico com a configuração que se apresenta na figura 2.3.

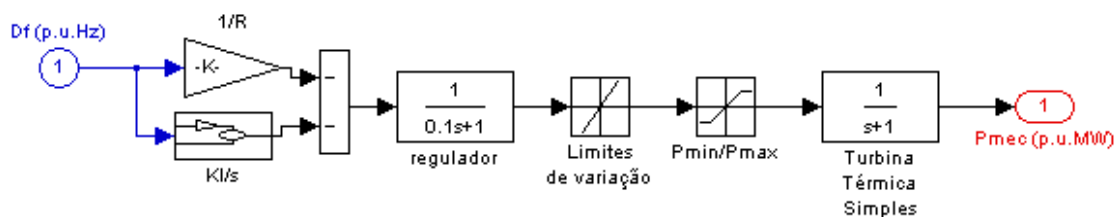


Figura 2.3 - Diagrama de blocos do regulador típico utilizado

O regulador utilizado, apresentado na figura 2.3, é equivalente ao *TGOV1 - Steam Turbine-Governor* (acrescentado de um bloco de controlo integral) existente no PSSTME [5].

De modo a perceber qual a influência do valor dos parâmetros deste regulador, nomeadamente o estatismo (R) e o ganho integral (KI), na resposta do sistema, foi feita uma análise prévia de resposta do sistema perante a consideração de diferentes valores para estes parâmetros. A perturbação considerada foi a saída intempestiva de toda a produção renovável. Os pares de valores considerados para R e KI são apresentados na tabela 2.5.

Na primeira simulação utilizaram-se os valores $KI=7$ p.u.MW/p.u.Hz e $R=0.05$ p.u.Hz/p.u.MW por serem valores típicos. Nas outras duas simulações consideraram-se valores decrescentes para o KI e crescentes para o R visto que esta situação torna a resposta da rede mais lenta, mas menos oscilatória.

Tabela 2.5 – Valores considerados para os parâmetros do regulador de velocidade

Parâmetro	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	7	1	0.5
R (p.u.Hz/p.u.MW)	0.05	0.07	0.09

Em seguida apresenta-se a figura 2.4 onde estão representadas as respostas do sistema, ao nível do desvio de frequência, face à saída intempestiva de toda a produção renovável, utilizando os três pares de valores para os parâmetros do regulador de velocidade apresentados na tabela 2.5.

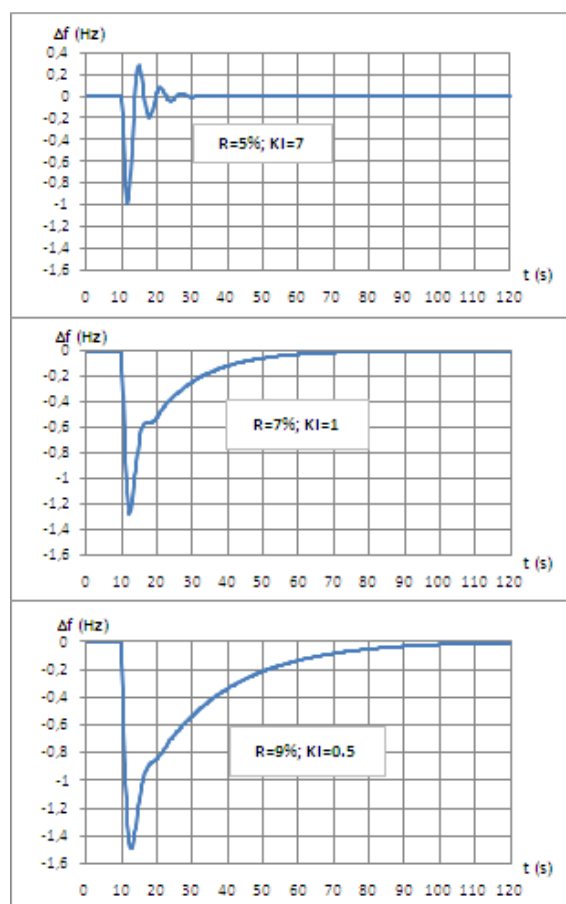


Figura 2.4 - Resposta do sistema, em termos de desvio de frequência, face à saída de toda a produção renovável, considerando diferentes valores para os parâmetros do regulador de velocidade típico

Como se pode constatar através da observação da figura 2.4, os valores escolhidos para os parâmetros influenciam claramente a resposta do sistema. Verifica-se que quanto maior o valor do estatismo e menor o valor do ganho integral, pior é a resposta do sistema em termos de desvio de frequência, visto que o regulador se torna “mais lento”. Na prática, numa rede isolada, é comum adoptar esta estratégia (i.e, valor elevado de R e baixo de KI, para obter resposta lenta), de modo a evitar muitas oscilações de frequência do sistema e assim garantir um maior tempo útil de vida para os reguladores de velocidade e respectivos geradores. Por

outro lado, em termos de desvios transitórios da frequência, o comportamento do sistema torna-se mais severo. Como já foi referido neste documento, o objectivo deste trabalho é dimensionar um sistema de armazenamento de energia para regulação do valor da frequência. De maneira a dimensionar o referido sistema para o pior cenário de exploração do mesmo, considerou-se o regulador de velocidade com o qual a frequência tem um pior comportamento.

Os parâmetros considerados para o regulador de velocidade encontram-se na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Valores considerados para todos os parâmetros do regulador de velocidade

Sistema de controlo de velocidade	
Tipo	Regulador de velocidade típico de uso comum
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	0.5
R (p.u.Hz/p.u.MW)	0.09
Constante de tempo do regulador (s)	0.1
Constante de tempo da turbina (s)	1

2.6 - Conclusões

A rede isolada em estudo é constituída por uma central térmica, dois parques eólicos e dois parques fotovoltaicos. Para realizar o despacho considerou-se que a produção renovável se encontra à sua produção máxima, ficando desta forma apenas dois geradores térmicos em serviço. No modelo da rede é ignorada a sua topologia devido à sua pequena dimensão.

O regulador de velocidade que irá ser considerado nas simulações é o regulador típico cujas características principais são: Estatismo (R) de 0.09 p.u.Hz/p.u.MW e ganho de controlo integral (KI) de 0.5 p.u.MW/p.u.Hz, ambos os valores na base da máquina. Estes valores foram escolhidos de entre três pares de valores porque foi com estes que a rede respondeu da pior forma à perturbação mais severa, que corresponde à saída intempestiva de serviço de toda a produção renovável.

Capítulo 3

Análise das Variações de Produção Renovável

3.1 - Introdução

Nenhum sistema eléctrico de energia é imune a perturbações. Devido a este facto, torna-se necessário estudar a reacção daquele face aos diversos tipos de perturbações que possam ocorrer. O SEE em estudo neste trabalho não é excepção e é por isso que, antes de analisar a resposta do sistema face a perturbações, é necessário primeiro saber quais as que podem ocorrer, e qual a sua frequência de ocorrência.

O problema em questão no presente trabalho é a estabilidade do valor da frequência, e como o sistema em estudo tem uma elevada integração de energias renováveis, nomeadamente eólica e fotovoltaica, as perturbações mais preocupantes são as variações na produção de energia eléctrica utilizando aquelas fontes de energia. Para saber quais as variações de produção mais frequentes e/ou as mais severas para o sistema é feita uma análise estatística baseada em dados reais referentes a estes dois tipos de produção.

3.2 - Análise das Séries Temporais de Produção Renovável

Tal como já mencionado na secção 1.2 do presente documento, os dados utilizados para a execução das tarefas que constituem este trabalho, são reais e foram fornecidos pelo orientador. Nos referidos dados constam séries temporais de produção eólica e fotovoltaica. Estas são úteis para determinar, através de análise estatística, quais as perturbações mais frequentes relacionadas com aqueles dois tipos de produção de energia eléctrica. A descrição desta análise é feita nas subsecções 3.2.1 e 3.2.2 que se seguem.

3.2.1 - Produção Eólica

As séries temporais de produção eólica não dizem respeito a nenhum dos parques eólicos do SEE em estudo, mas sim a um parque eólico com características semelhantes àqueles em termos tecnológicos. As séries consideradas são referentes aos dias 4 e 5 de Novembro de 2009. Do dia 4 há dados relativos à produção, segundo a segundo, entre as 0:00 e 4:46 horas, enquanto relativamente ao dia 5 os dados de produção estendem-se desde as 0:00 até às

12:00 horas. A análise estatística consiste em verificar quanto é que a produção varia, aumentando ou diminuindo, de determinado em determinado tempo. Em seguida será dada uma explicação mais detalhada sobre a referida análise.

Em primeiro lugar é de salientar que a análise foi feita para os dois dias separadamente. Posto isto, e começando pelo dia 4, antes de qualquer outra acção, registou-se o valor da produção máxima para aquele dia. Depois criou-se um vector que contém a diferença de produção de um segundo para o outro. Foi criado um segundo vector, que mostra a variação, segundo a segundo, em percentagem, em relação à ponta de produção do dia. Optou-se por fazer em relação à ponta de produção do dia, pois não é totalmente realista considerar a hipótese de que os parques irão estar, por norma, a produzir à máxima potência, ou seja, ao valor correspondente à potência instalada. Portanto, tendo agora os dois vectores descritos atrás, é possível saber que variação máxima segundo a segundo, tanto a aumentar como a diminuir, sofreu a produção no dia 4, em MW e em percentagem em relação à ponta máxima.

O processo descrito no parágrafo anterior foi repetido para intervalos de tempo de 5, 10, 20 e 60 segundos. No entanto, para a análise apenas se teve em conta os intervalos de 1, 5 e 10 segundos, visto que variações de produção que se processem em tempos superiores àqueles não afectam de forma significativa a resposta do sistema face a estas perturbações. Em seguida apresenta-se a tabela 3.1 com as variações máximas verificadas na produção eólica relativamente ao dia 4 de Novembro.

Tabela 3.1 — Variações máximas de produção eólica para diferentes intervalos de tempo do dia 4

Dia 4		
$\Delta t = 1 \text{ s}$	$\Delta P_{gmax} \text{ (MW)}$	0,083
	$\Delta P_{gmin} \text{ (MW)}$	-0,080
	$\Delta P_{gmax} \text{ (%)}$	8,00%
	$\Delta P_{gmin} \text{ (%)}$	-7,71%
	N	17148
$\Delta t = 5 \text{ s}$	$\Delta P_{gmax} \text{ (MW)}$	0,044
	$\Delta P_{gmin} \text{ (MW)}$	-0,047
	$\Delta P_{gmax} \text{ (%)}$	4,22%
	$\Delta P_{gmin} \text{ (%)}$	-4,47%
	N	3410
$\Delta t = 10 \text{ s}$	$\Delta P_{gmax} \text{ (MW)}$	0,069
	$\Delta P_{gmin} \text{ (MW)}$	-0,066
	$\Delta P_{gmax} \text{ (%)}$	6,65%
	$\Delta P_{gmin} \text{ (%)}$	-6,37%
	N	1711

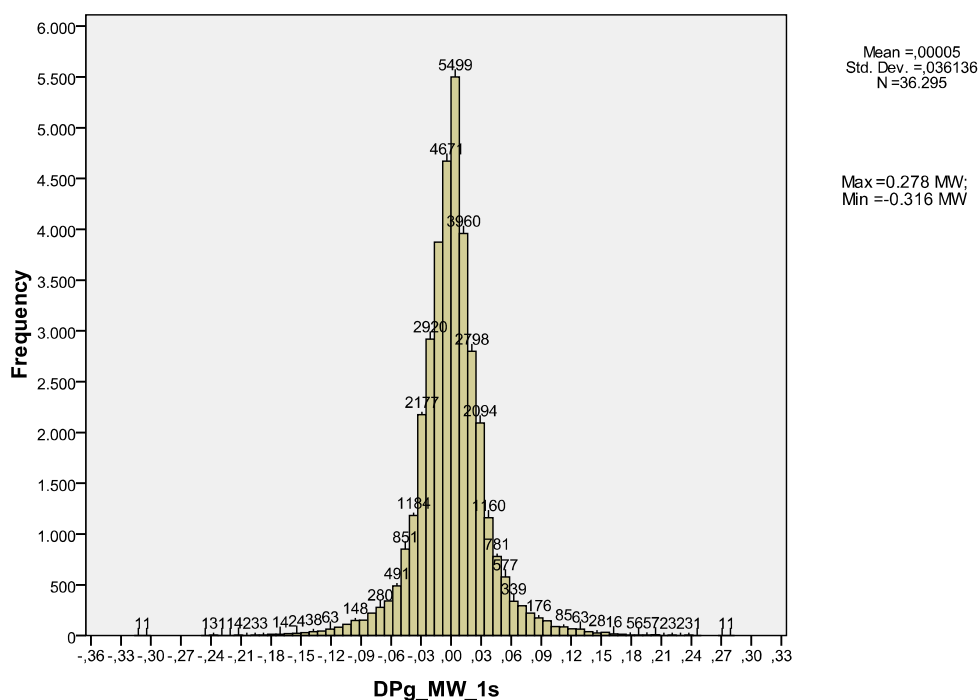
Onde **N** representa o número de células que constituem o vector, **$\Delta P_{gmax} \text{ (MW)}$** e **$\Delta P_{gmin} \text{ (MW)}$** representam, respectivamente, as variações de produção máximas em MW a aumentar e a diminuir de um instante para o outro e **$\Delta P_{gmax} \text{ (%)}$** e **$\Delta P_{gmin} \text{ (%)}$** significam o mesmo que as anteriores, mas em percentagem (em relação à ponta de produção do dia).

Todo o processo descrito para o dia 4 de Novembro foi repetido para o dia 5 tendo sido obtidos os resultados que se apresentam na tabela 3.2.

Tabela 3.2 — Variações máximas de produção eólica para diferentes intervalos de tempo do dia 5

Dia 5		
$\Delta t = 1 \text{ s}$	ΔP_{gmax} (MW)	0,278
	ΔP_{gmin} (MW)	-0,316
	ΔP_{gmax} (%)	4,45%
	ΔP_{gmin} (%)	-5,06%
	N	36296
$\Delta t = 5 \text{ s}$	ΔP_{gmax} (MW)	0,720
	ΔP_{gmin} (MW)	-1,014
	ΔP_{gmax} (%)	11,55%
	ΔP_{gmin} (%)	-16,26%
	N	7231
$\Delta t = 10 \text{ s}$	ΔP_{gmax} (MW)	1,017
	ΔP_{gmin} (MW)	-1,560
	ΔP_{gmax} (%)	16,30%
	ΔP_{gmin} (%)	-25,02%
	N	3618

Comparando os valores das tabelas 3.1 e 3.2 verifica-se que no dia 5 a produção teve maiores variações em qualquer um dos instantes de tempo considerados. Portanto foram os valores referentes a este dia que foram considerados para análise. Assim sendo o passo que se seguiu foi utilizar o Programa *SPSS* para fazer os histogramas de maneira a verificar a distribuição das variações de produção, (em MW e percentagem em relação à ponta de produção), ou seja o valor da variação e sua frequência de ocorrência relativamente ao dia 5. Desta forma fica-se a conhecer quais as variações que mais frequentemente poderão ocorrer nos parques eólicos. Em todo o caso, para avaliar a necessidade ou não de dispositivo de armazenamento de energia no SEE apenas se teve em conta a variação máxima. Os referidos histogramas encontram-se em seguida.

**Figura 3.1** - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em MW) de segundo a segundo

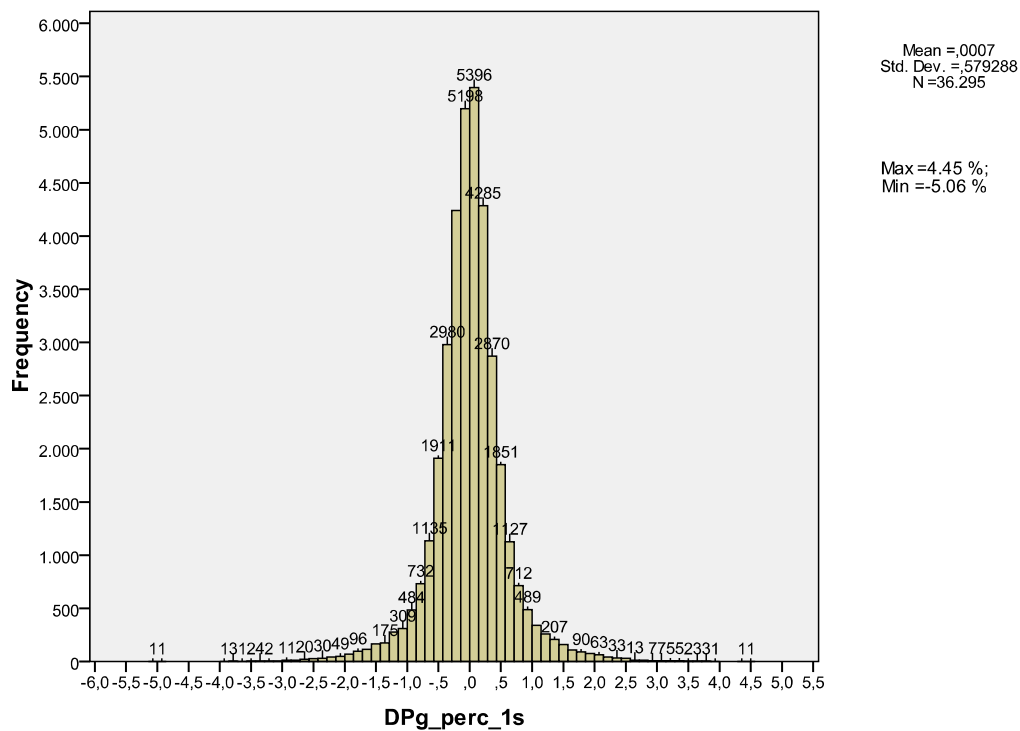


Figura 3.2 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em % em relação à ponta máxima de produção) de segundo a segundo

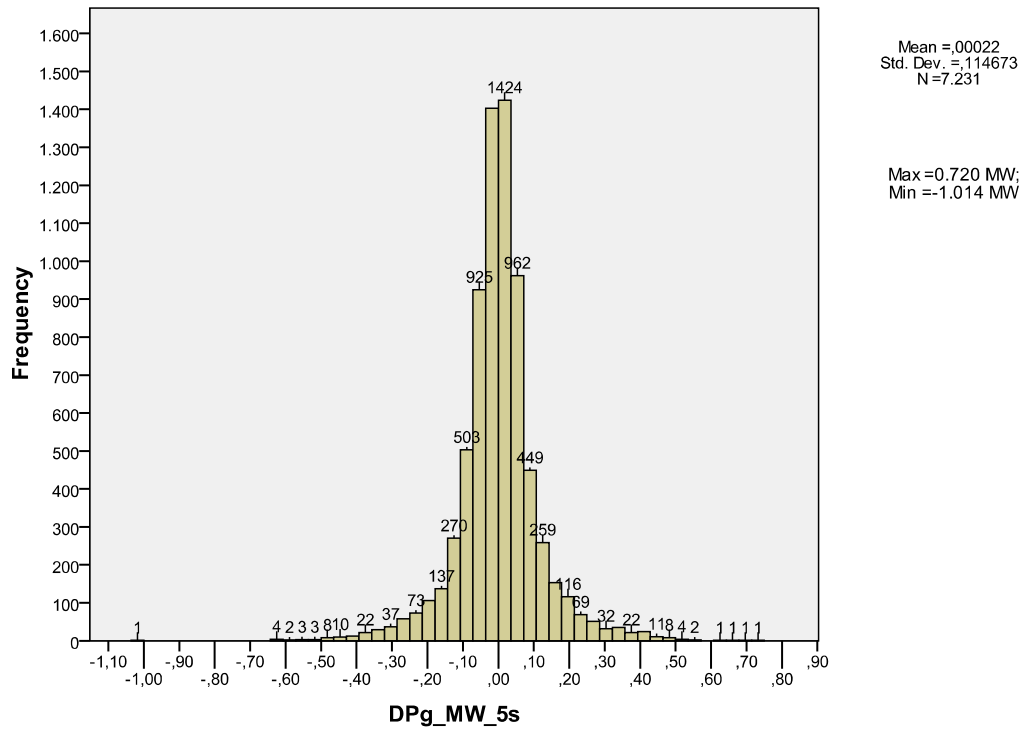


Figura 3.3 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em MW) de 5 em 5 segundos

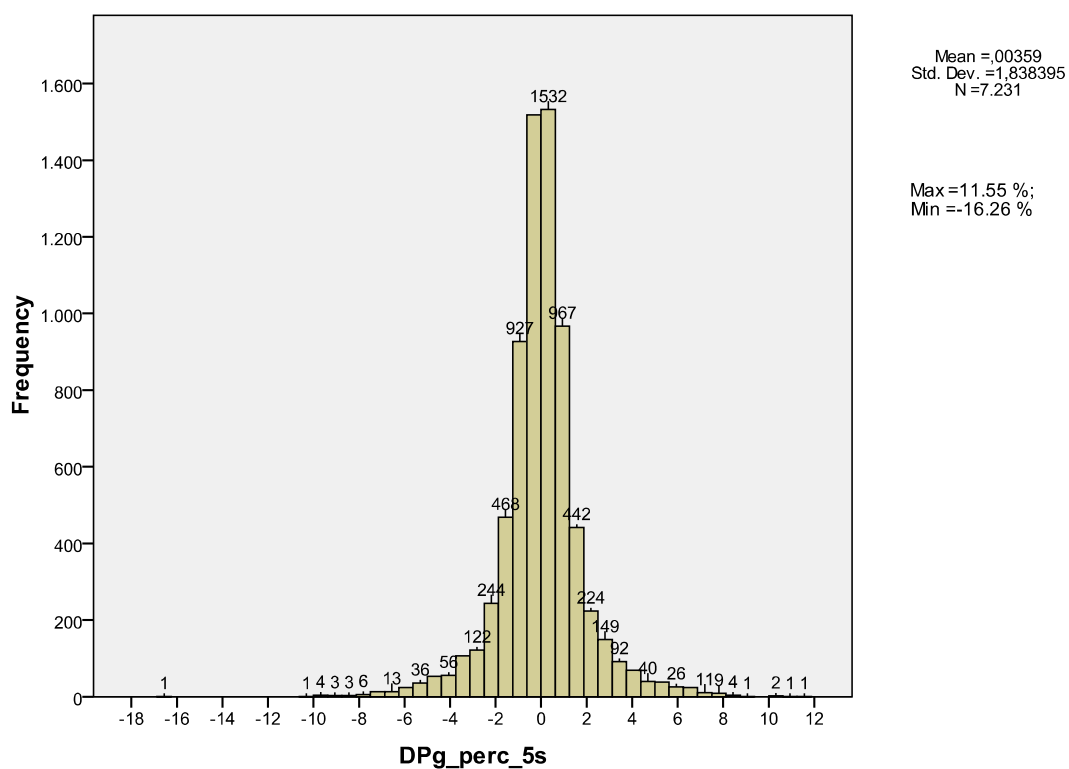


Figura 3.4 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 5 em 5 segundos

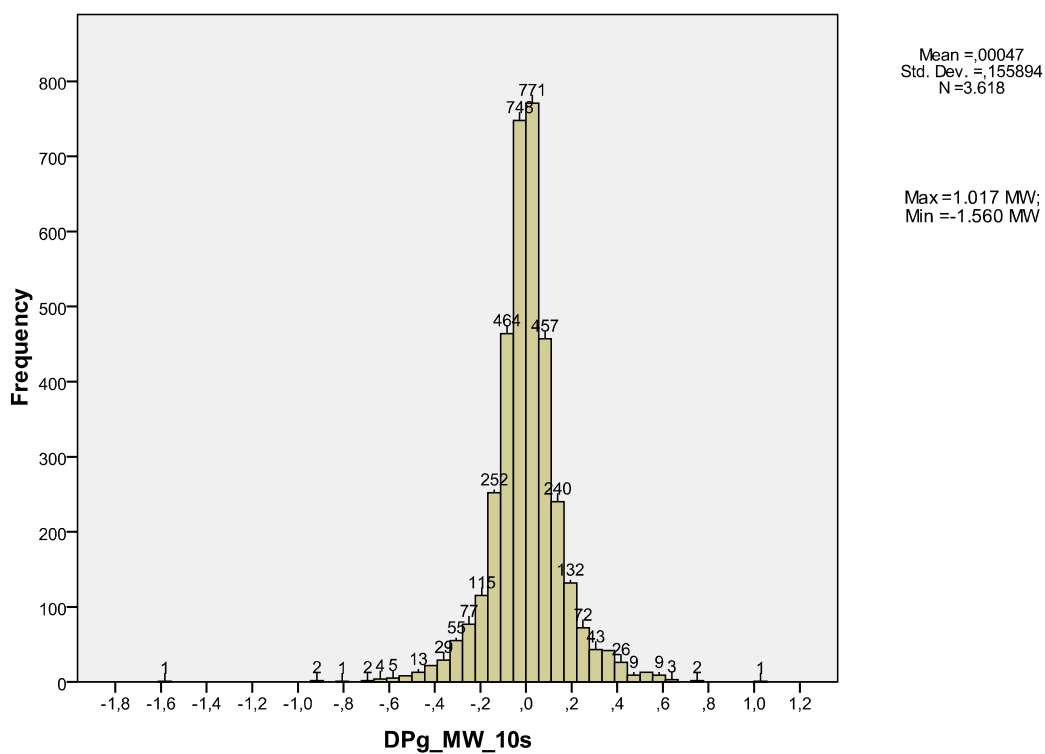


Figura 3.5 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em MW) de 10 em 10 segundos

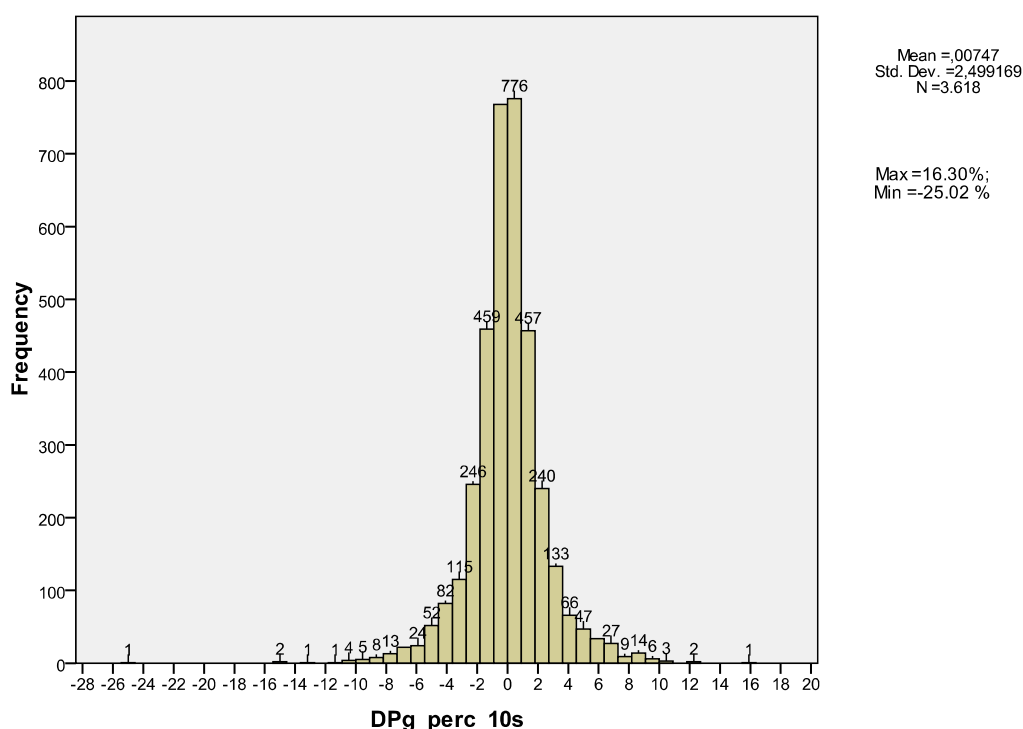


Figura 3.6 - Frequência de ocorrência de variações na produção eólica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 10 em 10 segundos

Os valores considerados para análise, nas simulações da resposta do sistema face a perturbações, não correspondem exactamente às variações máximas verificadas na produção dos parques eólicos. Optou-se por se fazer aproximação por excesso aos valores encontrados nesta subsecção. Apresenta-se em seguida uma tabela que contém estes valores.

Tabela 3.3 — Variações máximas de produção eólica consideradas nas simulações para a análise do sistema

Variações na produção (Descrição)	Variações na produção (MW)
± 10% de 1 em 1 segundos	0.1
± 20% de 5 em 5 segundos	0.2
± 25% de 10 em 10 segundos	0.25

3.2.2 - Produção Fotovoltaica

Para analisar os dados referentes à produção fotovoltaica procedeu-se de forma equivalente ao que foi descrito na subsecção 3.2.1 em relação à produção eólica. Novamente salienta-se que os dados referentes a este tipo de produção são reais, tendo sido registados em parques fotovoltaicos, do tipo convencional, em operação. Assim sendo, seguem-se as análises estatísticas feitas a dados referentes a três parques fotovoltaicos diferentes, que

serão aqui denominados de Parque Fotovoltaico 1, Parque Fotovoltaico 2 e Parque Fotovoltaico 3.

3.2.2.1 - Parque Fotovoltaico 1

Os dados relativos ao primeiro parque são séries de produção registadas no dia 1 de Fevereiro de 2010 das 08:00 às 20:00 horas. A potência máxima produzida neste dia foi de 481.53 kW, sendo 600 kW a potência instalada neste parque. Para a análise estatística, a diferença em relação ao que foi descrito no ponto 3.2.1 é que os dados relativos à produção estão espaçados temporalmente em 5 segundos. Portanto foi feita a análise estatística para os instantes de tempo de 5 e 10 segundos. As variações máximas experimentadas por este tipo de produção estão representadas na tabela que se segue.

Tabela 3.4 – Variações máximas de produção fotovoltaica para diferentes intervalos de tempo do dia 1 no Parque Fotovoltaico 1.

Dia 1		
$\Delta t = 5 \text{ s}$	$\Delta P_{gmax} \text{ (MW)}$	130,743
	$\Delta P_{gmin} \text{ (MW)}$	-132,284
	$\Delta P_{gmax} \text{ (%)}$	27,15%
	$\Delta P_{gmin} \text{ (%)}$	-27,47%
	N	8633
$\Delta t = 10 \text{ s}$	$\Delta P_{gmax} \text{ (MW)}$	130,743
	$\Delta P_{gmin} \text{ (MW)}$	-129,926
	$\Delta P_{gmax} \text{ (%)}$	27,15%
	$\Delta P_{gmin} \text{ (%)}$	-26,98%
	N	4317

Como se pode constatar através da observação da tabela 3.4, as variações de produção são semelhantes nos dois intervalos de tempo considerados. Por esta razão é que, para a análise da resposta do sistema face a perturbações, apenas se consideraram as variações de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos. Isto porque, por exemplo, uma variação de 100 kW em 5 segundos é mais severa do que uma variação de 100kW em 10 segundos.

Como se pode observar pelas figuras 3.7 e 3.8 as variações máximas (de cerca de 28%) ocorrem num número muito pequeno de vezes. Quer atendendo às características térmicas de um parque fotovoltaico, quer da experiência de exploração deste tipo de produção, sabe-se que a produção fotovoltaica pode baixar drasticamente, podendo chegar mesmo a anular-se, num curto espaço de tempo (segundos) com a simples passagem de uma nuvem [3]. Supõe-se que este fenómeno não se observou na série temporal analisada para o Parque 1, apenas devido à insuficiência de dados estatísticos, dado que foi analisada uma série temporal referente a um só dia.

Por esta razão é que para as simulações se considerou que a produção podia variar 50 % e 80%, ambos de 5 em 5 segundos.

Em seguida apresentam-se os histogramas, representados pelas figuras 3.7 e 3.8, que mostram a frequência das variações de produção fotovoltaica, tanto em MW como em percentagem em relação à ponta máxima do dia.

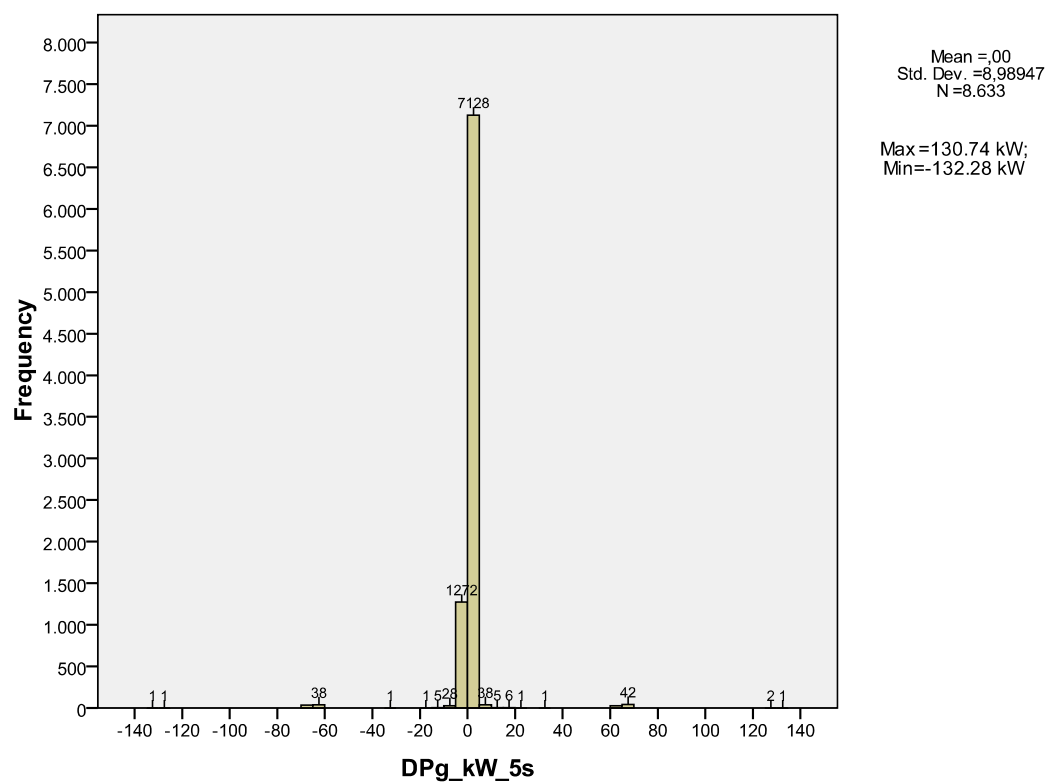


Figura 3.7 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em MW) de 5 em 5 segundos no Parque Fotovoltaico 1

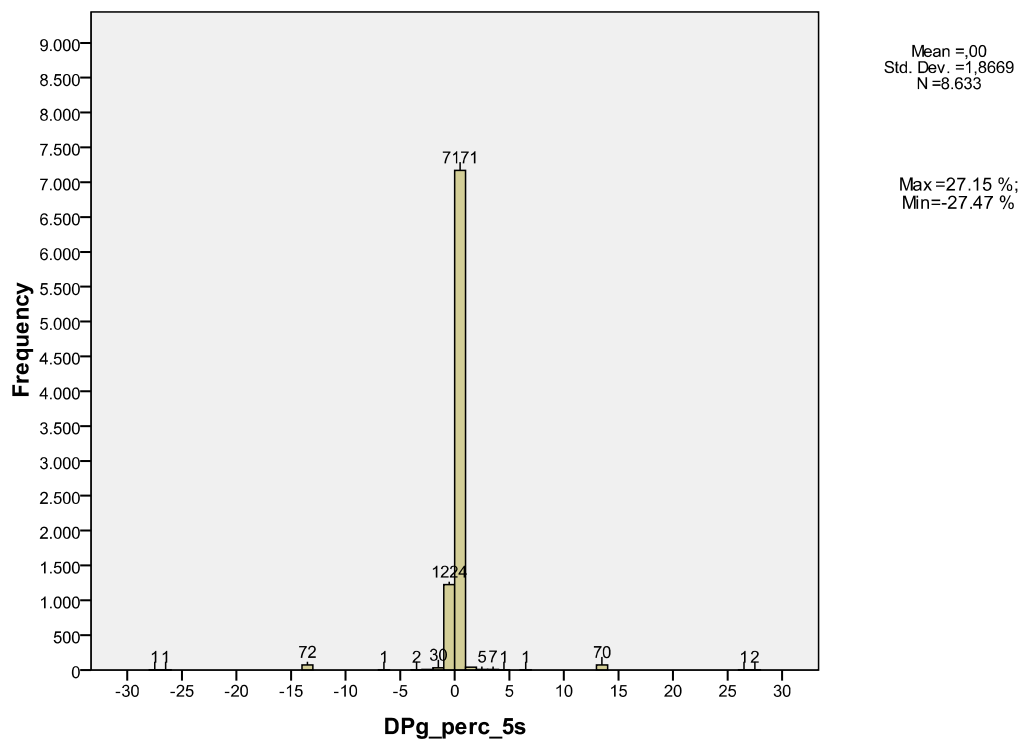


Figura 3.8 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 5 em 5 segundos no Parque Fotovoltaico 1

3.2.2.2 - Parque Fotovoltaico 2

A situação descrita em 3.2.2.1, no final da página 17, veio a verificar-se com a análise de novos dados, que foram obtidos posteriormente. Estes novos dados consistem em séries temporais de produção fotovoltaica para dois dias diferentes de um parque denominado Parque Fotovoltaico 2, (dias 4 e 5 de Maio de 2010), entra as 01:00 e 23:59 horas. O parque tem potência instalada de 2000 kW, mas os dados apenas se referem a um grupo de 1000 kW. A diferença em relação aos dados obtidos anteriormente é que, as novas séries de produção têm um intervalo de tempo de 60 segundos. Contudo considerou-se que estas variações são possíveis de acontecer no intervalo de tempo considerado anteriormente (5 segundos). Isto porque, à partida, o que faz com que a produção fotovoltaica varie é a interposição de nuvens entre o sol e os painéis solares receptores da radiação solar, e é sabido que num instante “está sol” como no instante a seguir é “encoberto” por uma nuvem. Daí se ter tirado relevo ao intervalo de tempo dos dados.

Embora as simulações da resposta do sistema já estivessem feitas, analisaram-se os novos dados de maneira a serem verificados ou não os pressupostos. Assim sendo, primeiro, analisaram-se as séries de produção, tendo sido obtidos os resultados que se apresentam nas figuras que se seguem.

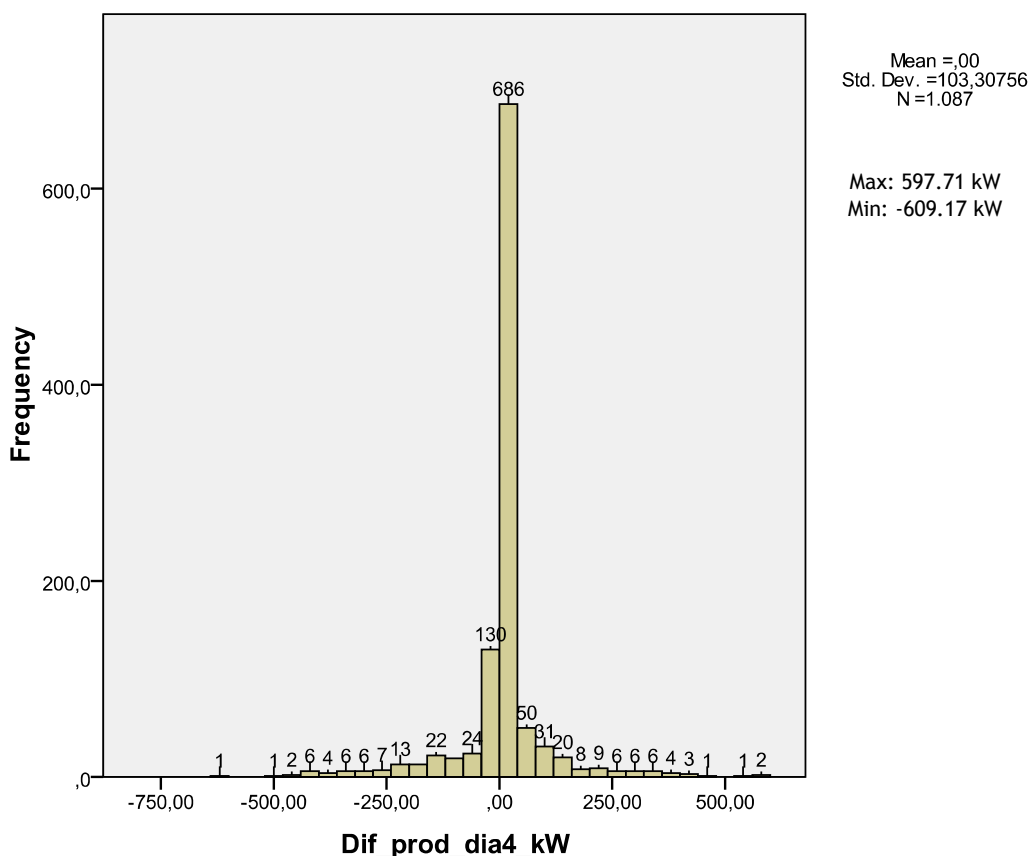


Figura 3.9 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em MW) de 60 em 60 segundos para o dia 4 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2

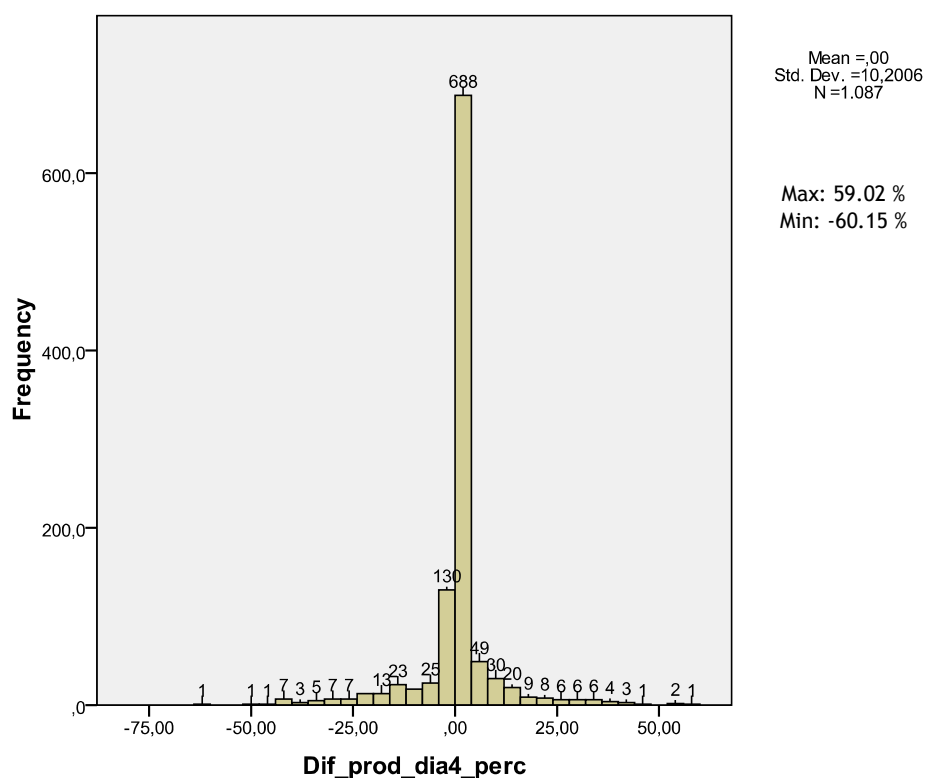


Figura 3.10 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 60 em 60 segundos para o dia 4 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2

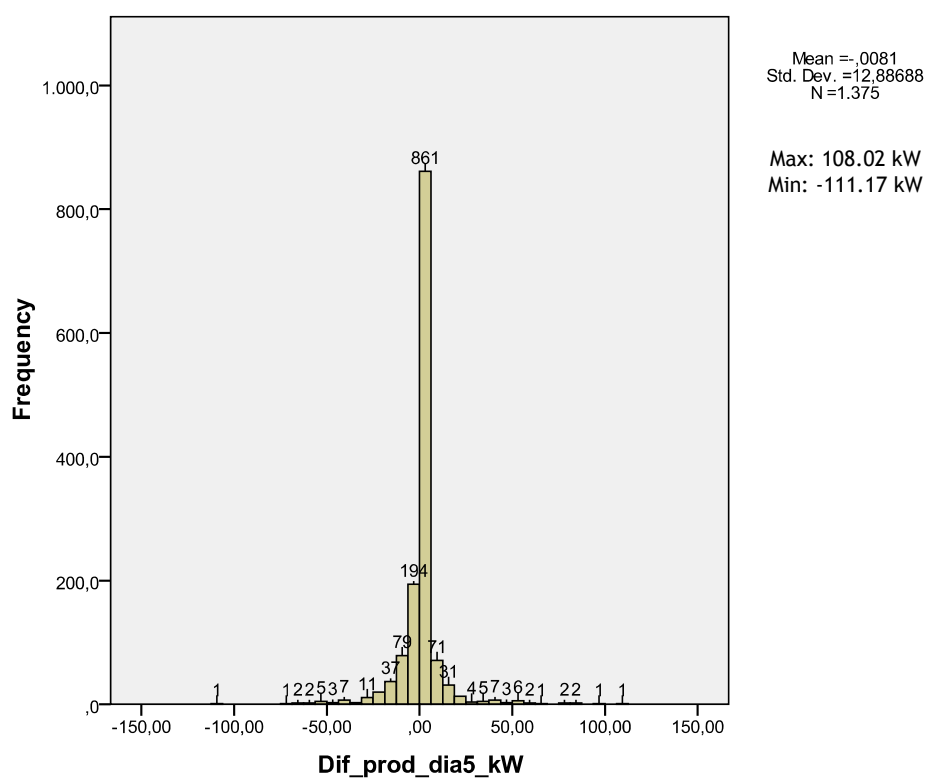


Figura 3.11 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em MW) de 60 em 60 segundos para o dia 5 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2

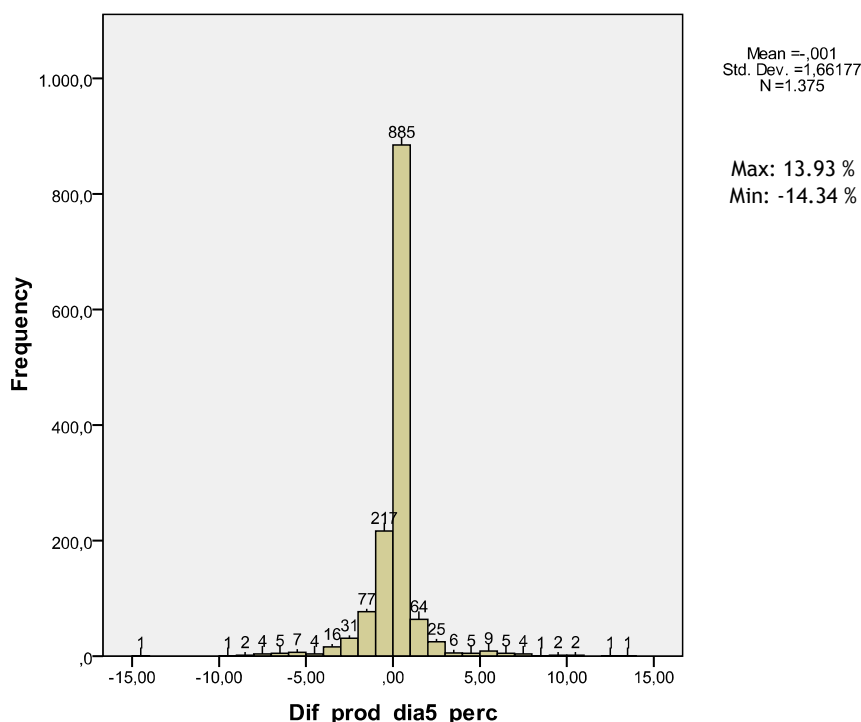


Figura 3.12 - Frequência de ocorrência de variações na produção fotovoltaica (em % em relação à ponta máxima de produção) de 60 em 60 segundos para o dia 5 de Maio de 2010 no Parque Fotovoltaico 2

Como se pode verificar pela observação da figura 3.10, não foi irrealista ter considerado o pressuposto de que a produção fotovoltaica poderia aumentar ou diminuir o seu valor em 50% num curto de espaço de tempo, visto que naquela figura se observa uma variação de cerca de 60%. A apresentação das figuras 3.11 e 3.12 é relevante para demonstrar que a produção fotovoltaica pode ser constante e sofrer variações mínimas ao longo de um dia como pode sofrer grandes variações, como as observadas nas figuras 3.9 e 3.10. Como o presente trabalho tem como objectivo o dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia para regulação de frequência, há que considerar o pior caso como medida de segurança, porque embora as perturbações mais severas sejam pouco frequentes, é importante considerá-las de maneira ao sistema estar preparado para o caso de ocorrerem.

3.2.2.3 - Parque Fotovoltaico 3

As figuras 3.13 a 3.16 dizem respeito à variação da radiação recebida por um parque fotovoltaico, denominado Parque Fotovoltaico 3, com 17.28 kW de potência instalada. A análise estatística que consta daquelas figuras teve por base séries de radiação solar medidas no parque para as primeiras 14 horas de 28 dias seguidos, cuja data é desconhecida. Também aqui, os valores das séries estão espaçados de 60 segundos, tal como no Parque Fotovoltaico 2. Como não há informação relativa ao valor da produção, considerou-se que o valor da potência produzida pelo parque é proporcional à quantidade de radiação recebida pelos painéis.

Dos 28 dias foram escolhidos 4 dias perturbados para analisar estatisticamente, tal como foi feito para as séries de produção. As quatro figuras que se seguem dizem respeito à variação de radiação recebida, em percentagem em relação ao pico de radiação recebido

para aquele dia, e vêm corroborar o que foi referido em 3.2.2.1, no final da página 17, visto que dos quatro dias analisados, em apenas 1 é que se verificaram variações inferiores a 50%.

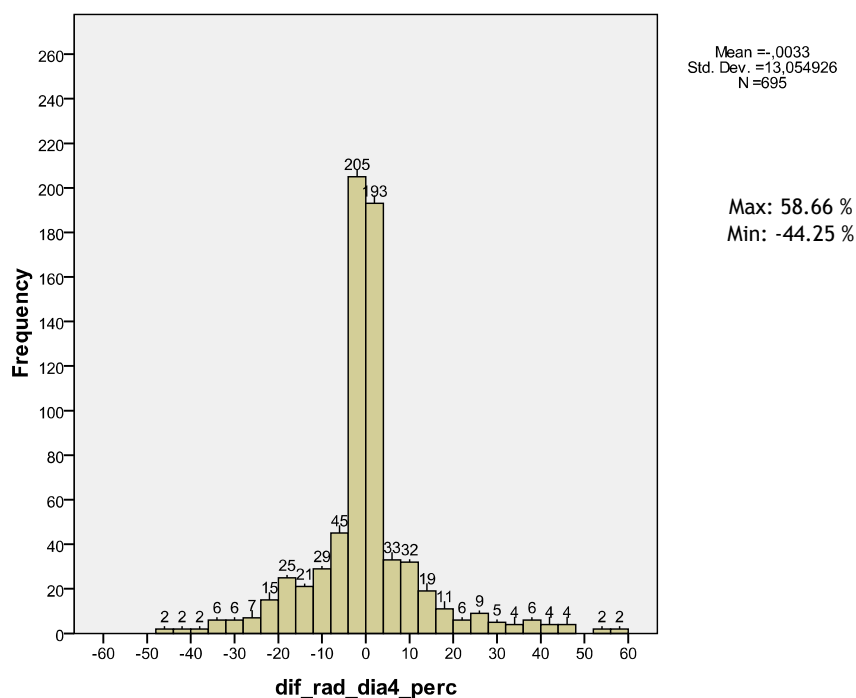


Figura 3.13 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 4º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3

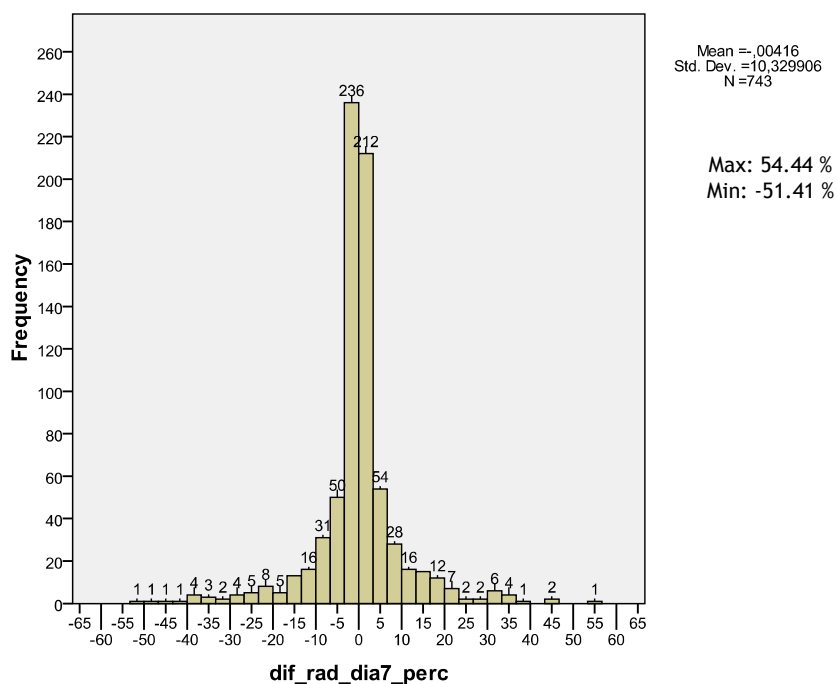


Figura 3.14 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 7º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3

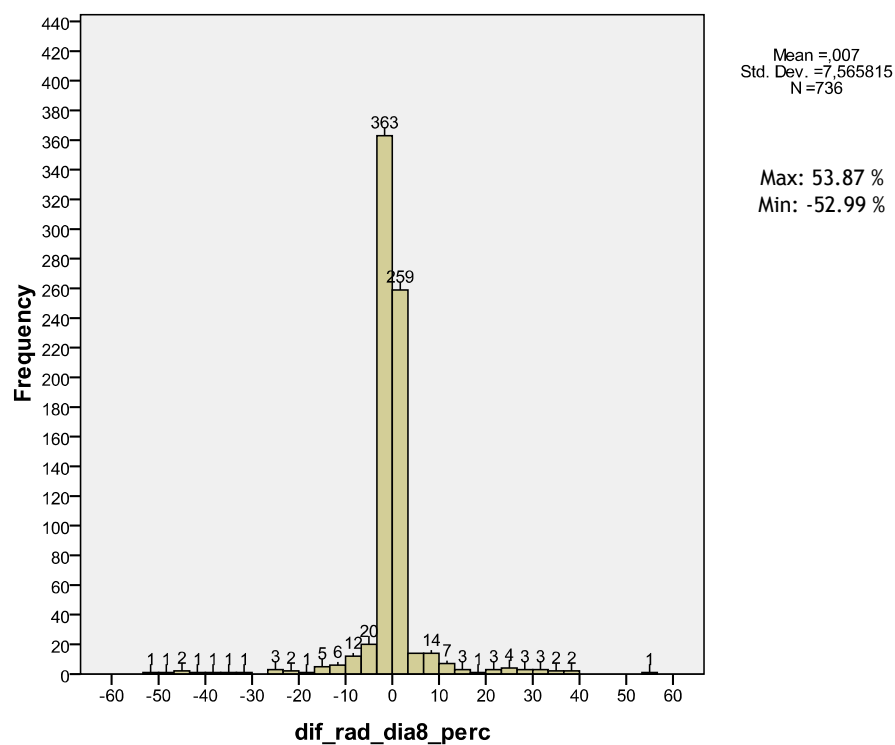


Figura 3.15 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 8º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3

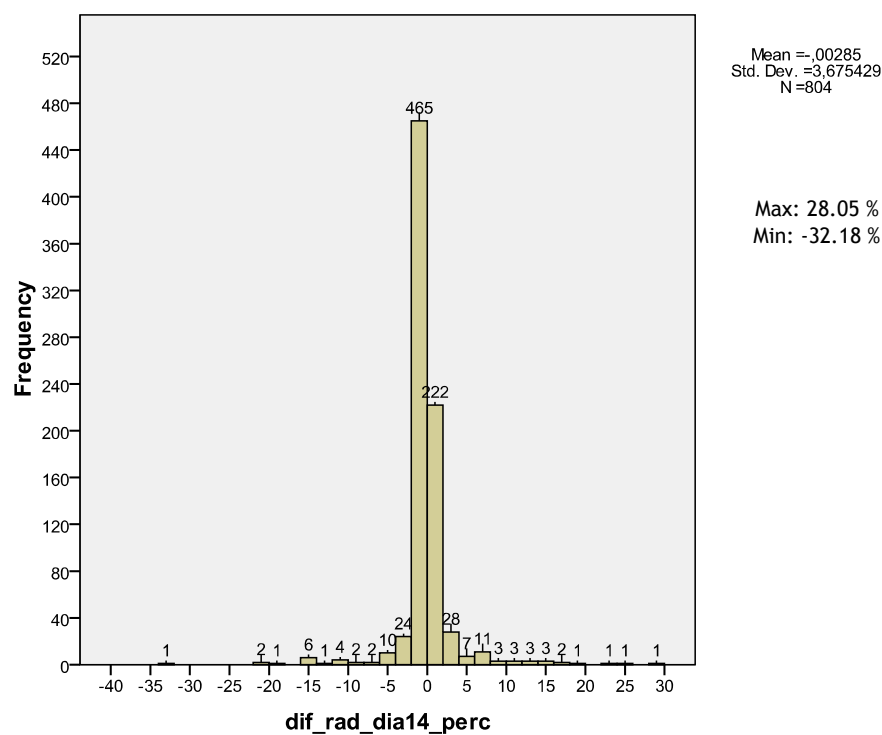


Figura 3.16 - Frequência de ocorrência de variações na radiação recebida (em % em relação ao pico de radiação recebido neste dia) de 60 em 60 segundos para o 14º dia da série temporal no Parque Fotovoltaico 3

3.3 - Conclusões

A principal conclusão a tirar do que foi apresentado neste capítulo é que a produção renovável está sujeita a variações. Estas variações podem ser maiores ou menores consoante os dias, mas no geral pode afirmar-se que a produção fotovoltaica vê a sua produção variar muito mais do que a produção eólica. Estando os sistemas eléctricos modernos, a entrar numa época em que se planeia a instalação, nos próximos anos, de elevadas parcelas de produção fotovoltaica, tal como se descreve em [6] para o caso Português, é portanto necessário analisar com cuidado as redes onde se prevê a instalação deste tipo de produção. Deve ser dada mais importância à instalação de parques fotovoltaicos, também porque hoje em dia a produção eólica já não provoca tantas perturbações nas redes devido à sua evolução tecnológica, nomeadamente na electrónica de potência que faz o desacoplamento entre o gerador eólico e a rede, não permitindo assim que as variações na produção eólica provoquem tanta instabilidade naquela.

Capítulo 4

Sistemas de Armazenamento de Energia

4.1 - Introdução

Sempre que há um desequilíbrio entre o valor da produção e do consumo há um desvio do valor da frequência em relação ao valor nominal, desvio este que é positivo no caso de haver excesso de produção e negativo no caso de o valor do consumo superar o valor da produção. Devido à crescente integração, nas redes, de produção de energia eléctrica utilizando como fontes as energias renováveis, há uma maior instabilidade no valor da frequência. Esta situação acontece porque, como foi apresentado no capítulo 3, aquelas fontes de energia são fontes intermitentes, ou seja não é certo que a produção corresponda ao valor previsto. [7]. Além disso, quanto maior a integração de energias renováveis no sistema, menos produção é atribuída aos geradores térmicos. Esta situação faz com que sejam retirados de serviço alguns geradores, visto que há um limite técnico mínimo de funcionamento, o que diminui a inércia do sistema, tornando-o ainda mais instável, principalmente se se tratar de redes isoladas [8].

Todas as redes possuem determinados valores de reserva para colmatar falhas que surjam na produção e assim, estabilizar o valor da frequência. Em linhas gerais, aquela reserva consiste na reserva girante e reserva rápida. A reserva girante é o aumento de produção que os grupos que já estão em funcionamento podem ter até atingirem o seu limite técnico máximo e a reserva rápida consiste em grupos (térmicos e hídricos) que estão parados mas a postos para entrar em serviço mal lhes seja dada ordem para tal [9]. O que acontece é que estes grupos, embora sejam rápidos quando comparados a outros, podem demorar até 10 minutos a entrar em funcionamento, e estes tempos são elevados no que respeita a regulação de frequência.

É devido a estes factores que é necessário recorrer a sistemas de armazenamento de energia para melhorar a estabilidade de frequência dos sistemas eléctricos. Nas secções que se seguem serão apresentados dois tipos de sistema de armazenamento de energia que são utilizados hoje em dia na regulação de frequência. Estes sistemas são: volantes de inércia e baterias de iões de lítio.

4.2 - Volantes de Inércia

Um volante de inércia não é mais do que um sistema que armazena energia (cinética) através da rotação de um disco em torno do seu eixo [10]. A quantidade de energia armazenada depende da massa e geometria do corpo rotativo e da sua velocidade de rotação [1].

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4-1)$$

Onde E (J) é a energia cinética, J (kg.m²) é a inércia do corpo rotativo e ω é a velocidade angular (rad.s⁻¹) [1].

Através da expressão (4-1) constata-se que a quantidade de energia armazenada é proporcional à sua massa e ao quadrado da sua velocidade de rotação [10]. Nas subsecções que se seguem serão aprofundados aspectos relacionados com os volantes de inércia.

4.2.1 - Aspectos Construtivos e Princípio de Funcionamento

Como foi referido atrás, um volante de inércia consiste numa massa que roda em torno de um eixo. Contudo há diferentes tipos de volantes, cada um com as suas características. Em primeiro lugar, os volantes de inércia podem ser classificados quanto à sua velocidade de rotação: baixa velocidade ou alta velocidade. Os volantes de baixa velocidade são normalmente feitos de aço, enquanto que os de alta velocidade são feitos de fibra de carbono e vidro visto que são materiais que melhor aguentam o desgaste provocado pelas rotações. Este último tipo de volante cria preocupações no que respeita às perdas por fricção (dos rolamentos e resistência do ar) [10]. É por esta razão que este tipo de volante é colocado dentro de um compartimento em vácuo e que possui rolamentos magnéticos (em vez de rolamentos mecânicos) que não têm qualquer contacto com o volante, não possuem partes móveis, nem necessitam de lubrificação. Estes rolamentos suportam o peso do volante através de forças magnéticas repulsivas [1].

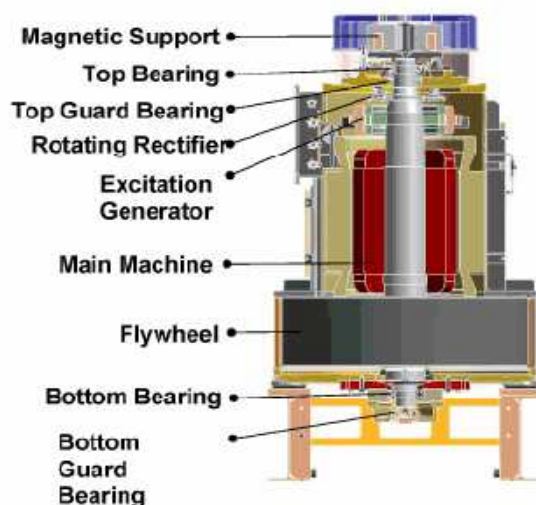


Figura 4.1 - Partes constituintes de um volante de inércia [8].

Quando integrados num sistema eléctrico de energia, os volantes de inércia funcionam da seguinte forma: Quando há excesso de produção em relação ao consumo, o volante absorve energia da rede, encontrando-se assim no estado de carga; quando a produção é inferior ao consumo, o volante começa a descarregar, libertando energia para a rede [1].

4.2.2 - Vantagens e Desvantagens

O objectivo da presente subsecção é referir as vantagens e desvantagens dos volantes de inércia. Por vezes, será necessário comparar os volantes com outros tipos de sistema de armazenamento, de maneira a evidenciar as suas vantagens e desvantagens.

Os volantes de inércia possuem inúmeras vantagens. Enumeram-se em seguida algumas delas.

- Não há emissões de dióxido de carbono [7];
- Resposta muito rápida face a perturbações [7];
- Suporta aumentos de carga [7];
- Necessitam de pouca manutenção [10];
- Tempo de vida elevado (20 anos) [10];
- Baixo valor para as perdas em stand-by (entre 0.1% e 1%) [10];

Outras vantagens dos volantes têm que ser referidas em comparação com as baterias. Note-se que o termo “baterias” não se refere especificamente às baterias de iões de lítio que se apresentam na subsecção seguinte, mas sim às baterias em geral.

Embora os volantes necessitem de um maior investimento inicial em relação às baterias, têm um tempo de vida muito superior (20 anos) e muito pouca manutenção, enquanto as baterias duram 4, 5 anos e requerem muita manutenção [10].

Outros aspectos a considerar é que os volantes ocupam entre 5 a 10 vezes menos espaço em relação a baterias da mesma potência. O tempo de vida dos volantes é praticamente independente do número de ciclos carga/descarga (o que não acontece com as baterias), além de que é possível saber facilmente o estado de carga do volante através da sua velocidade de rotação, enquanto nas baterias essa informação não é obtida tão directamente. Em aplicações que requerem potências elevadas, este tipo de sistema proporciona elevados valores de potência e energia e parece ser a tecnologia mais fiável [1].

4.2.3 - Aplicações Práticas

Em linhas gerais, os volantes de inércia aplicam-se a sistemas onde são necessários vários ciclos de carga e descarga, como por exemplo, sistemas com integração de produção de energia eléctrica utilizando fontes de energia renováveis. Os volantes estão mais indicados em situações onde é necessário entrar rapidamente em funcionamento, mas durante pouco tempo, ou seja no caso de ocorrer uma quebra abrupta de produção estes sistemas asseguram a carga, durante umas poucas dezenas de segundos, até entrar em funcionamento a reserva, girante e/ou estática, existente no sistema, contribuindo assim para que os valores, em particular o valor da frequência, se afastem o menos possível do valor nominal [1].

Em [8,11] é apresentado um exemplo prático de uma aplicação bem sucedida de um volante de inércia numa rede isolada com integração de energia renovável. Este exemplo será aprofundado em seguida.

Para começar salienta-se que este artigo (presente em [8]) estuda o uso de um sistema de volante de inércia num sistema isolado, nomeadamente na ilha das Flores do Arquipélago dos Açores. A rede desta ilha incorpora produção a Diesel, hídrica e eólica. Aquele estudo demonstra que o referido sistema de armazenamento fez com que se reduzissem as variações de frequência no sistema, devidas às energias renováveis, houve um aumento na produção renovável e na eficiência dos geradores no que toca ao combustível, foram reduzidas as emissões e o tempo de vida de serviço dos geradores foi alargado. Acredita-se que este é um dos primeiros casos de sucesso de utilização de volantes de inércia na Europa para aumentar a penetração de energias renováveis, bem como para estabilizar e melhorar a resposta da rede.

A ideia de instalar um sistema de armazenamento de energia na ilha referida no parágrafo anterior, surgiu porque, inicialmente a produção era assegurada pelos geradores Diesel e centrais hídricas. Posteriormente, foram instaladas turbinas eólicas com o objectivo de reduzir a produção Diesel, e assim poupar no consumo de combustível. Contudo verificou-se que com a integração da produção eólica o sistema ficou mais instável e aquela teve que ser limitada para evitar flutuações de frequência e *blackouts*. As potências instaladas, no total por tipo de produção, tinham os seguintes valores:

- Diesel: 2.46 MW;
- Hídrica: 1.35 MW;
- Eólica: 0.63 MW;

Neste estudo foram efectuadas simulações e verificou-se que, sem a inclusão de um sistema de armazenamento, a um aumento de carga de 350 kW, a frequência na fase transitória oscilou entre 48.5 e 50.5 Hz.

Com a inclusão, nas simulações, de um volante de inércia denominado *PowerStore*, de 350 kW/5kWh (18 MWs), verificou-se que aquele intervalo de oscilação de frequência foi entre 49 e 50 Hz.

Posteriormente, no sistema real, provocou-se a referida perturbação, sem instalação de volante, e verificou-se que o valor da frequência oscilou entre 48.6 e 50.4 Hz. Com a instalação do volante, o valor mínimo da frequência, perante a referida perturbação, foi de 49.2 Hz.

O sistema eléctrico das Flores tem funcionado com este volante de inércia desde Setembro de 2005 sem qualquer tipo de problemas. A inclusão do referido volante reduziu bastante as flutuações no valor da frequência, tanto em regime estacionário como durante falhas de linhas. De notar que agora os geradores eólicos funcionam sem restrições de produção.

Com este estudo pode constatar-se que a utilização de volantes de inércia em redes isoladas com integração de energias renováveis é claramente vantajosa, porque para além de ser melhorada a estabilidade do sistema, é aumentada a produção renovável, havendo por isso uma diminuição no consumo de combustíveis fósseis.

Em [12] estão presentes outros exemplos de aplicação dos volantes de inércia. Entre estes exemplos está o da ilha Graciosa, que após o sucesso na ilha das Flores, também instalou no seu sistema um sistema de volante de inércia.

Em [13] é apresentado ainda um outro exemplo de sucesso de aplicação de volantes de inércia a um sistema eléctrico, mas não é relevante descrevê-lo aqui, visto que é sobre uma rede de grande dimensão, e não rede isolada, com integração de produção eólica.

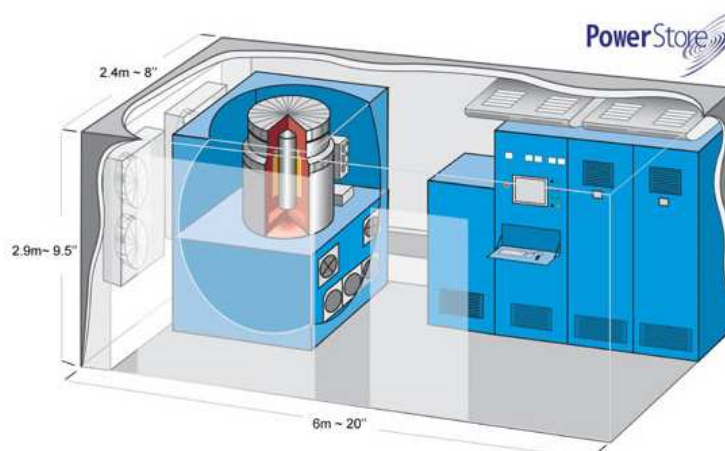


Figura 4.2 - Nesta figura, encontra-se, do lado esquerdo o volante de inércia propriamente dito [12].

4.2.4 - Fabricantes e Características dos Produtos

Visto que o objectivo do presente trabalho é dimensionar sistemas de armazenamento para melhoria da estabilidade de frequência, é pertinente mencionar alguns fabricantes daqueles sistemas. Assim sendo, nesta secção serão apresentadas algumas características de volantes de inércia que podem ser utilizados para regulação de frequência. As características necessárias para a escolha de um volante de inércia são: a potência máxima que ele consegue produzir (e absorver); a energia máxima que consegue armazenar e libertar, e durante quanto tempo consegue produzir determinada potência.

O primeiro fabricante a ser apresentado é a *PowerCorp* [12, 14]. As características dos volantes desenvolvidos por este fabricante para uma potência nominal de 500 kW e 1000 kW apresentam-se na figura 4.3.

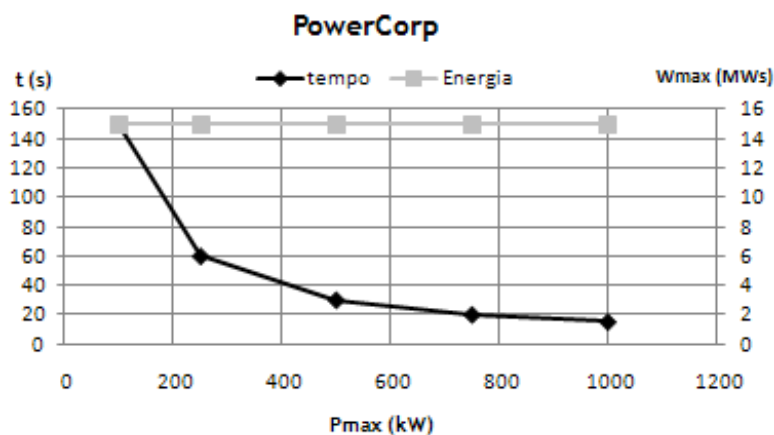


Figura 4.3 - Características dos produtos desenvolvidos pela *Powercorp*

O gráfico representado na figura 4.3 mostra, a preto, a relação entre a potência disponibilizada por cada volante e o tempo de carga/descarga do mesmo. Assim, por exemplo, observa-se facilmente que um volante de inércia de 500kW demora 30 segundos a descarregar totalmente quando roda a uma velocidade perto da máxima. Note-se que os valores para os tempos não são exactos, mas sim estimados. A cinzento está representada a energia máxima que cada volante consegue libertar. Neste caso, através da observação da figura, constata-se que, independentemente da potência, cada volante liberta, no máximo, sempre a mesma energia. Esta situação acontece pois, tal como foi mencionado em 4.2, a energia armazenada pelo volante de inércia depende da massa e da velocidade de rotação do corpo rotativo do volante de inércia. Assim sendo, no caso dos produtos da *powercorp* o volante menor potência, e portanto de menor massa, roda a uma velocidade superior em relação ao volante de maior potência, conseguindo assim armazenar/libertar a mesma energia.

A *Beacon Power*, é também um fabricante de volantes de inércia. Embora tenha projectos ambiciosos, tais como o desenvolvimento da “*Smart Energy Matrix*”, que em linhas gerais, é uma central de 20 MW, constituída por 200 volantes de inércia de 100kW/25kWh cada um, destinada à regulação de frequência, bem como à redução das emissões de dióxido de carbono, por ser retirada produção aos geradores térmicos com a integração da referida matriz no sistema. Embora o objectivo deste produtor seja a construção de matrizes com as características mencionadas, na verdade podem ser utilizados quantos volantes se quiser de maneira a perfazer a potência desejada. A figura que se segue mostra as características do produto da *Beacon Power* [15].

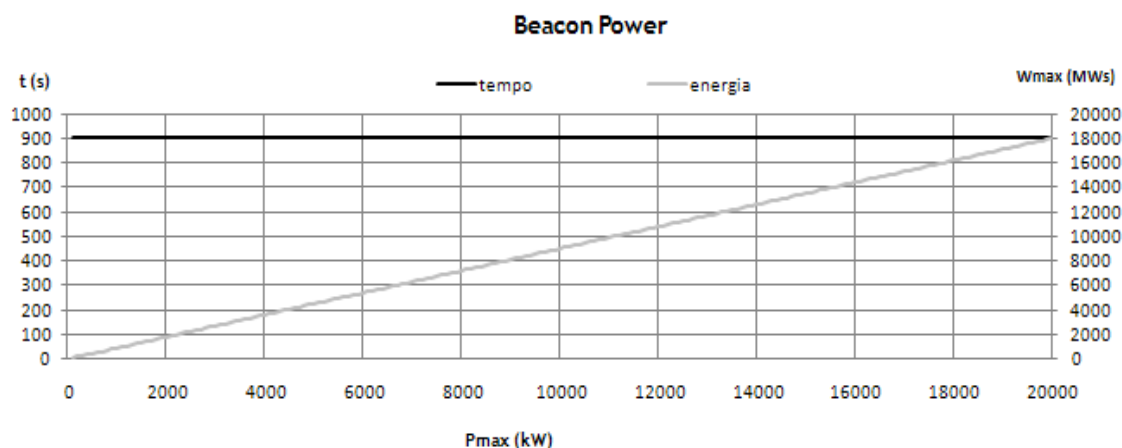


Figura 4.4 - Características dos produtos desenvolvidos pela *Beacon Power*

Como se pode verificar através da observação da figura 4.4, este produto tem características exageradas e desnecessárias ao sistema em estudo no presente trabalho, isto porque, por exemplo, um volante de 2000 kW tem autonomia de 15 minutos (900 segundos) e Energia de 2000 MWs. Mais à frente, no capítulo 5, é justificada a afirmação feita na última frase.

Os três produtos que são apresentados em seguida, são direccionados para funcionarem com sistemas UPS. No entanto, sabe-se que o valor da frequência é alterado em relação ao nominal quando há um desequilíbrio entre a produção e a carga. O objectivo dos sistemas UPS é fazer com que, em caso de falha de produção, a carga nunca deixe de ser alimentada,

o que acaba por impedir que o valor da frequência desça demasiado. Em seguida, em figuras, apenas serão apresentadas as características destes três produtos.

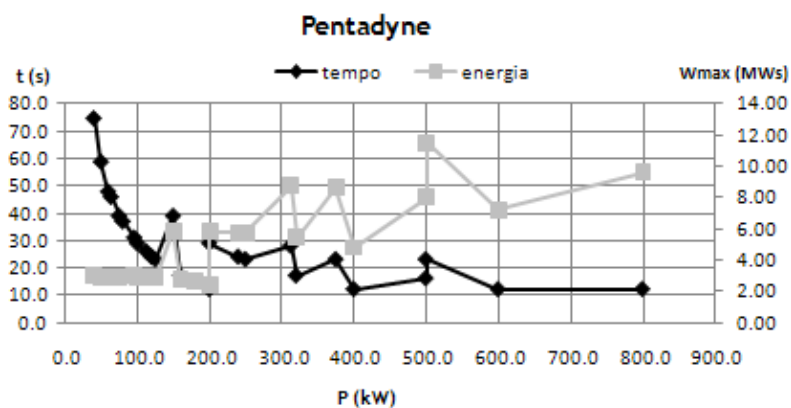


Figura 4.5 - Características dos produtos desenvolvidos pela *Pentadyne*

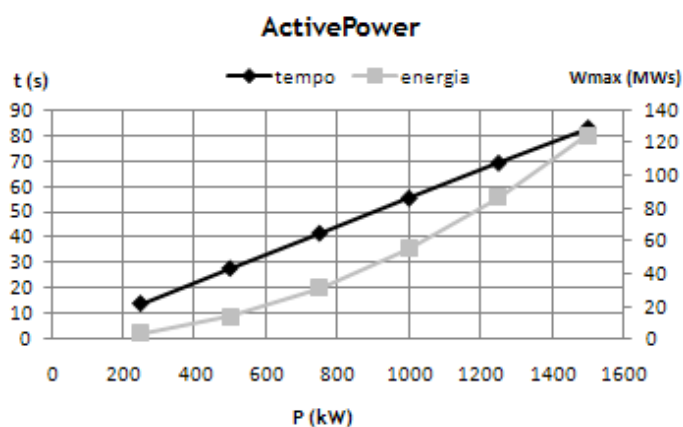


Figura 4.6 - Características dos produtos desenvolvidos pela *ActivePower*

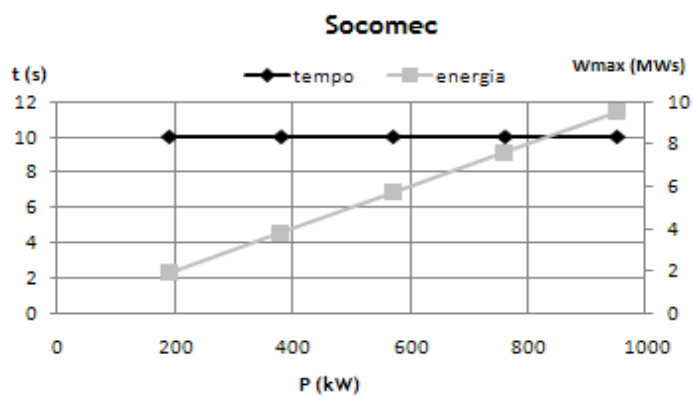


Figura 4.7 - Características dos produtos desenvolvidos pela *Socomec*

Como se pode constatar pelos gráficos atrás apresentados, as características dos volantes de inércia disponíveis no mercado diferem muito de fabricante para fabricante. Para o caso de estudo, foram apenas considerados os volantes da *PowerCorp* por serem específicos para controlar a frequência do sistema. Não foram considerados os volantes da *BeaconPower*, pelas razões já referidas de estes volantes terem características exageradas para o sistema eléctrico em estudo.

4.2.5 - Modelo Dinâmico Utilizado para o Volante de Inércia no *Simulink*[®]

Considerando o período de tempo de interesse para analisar o comportamento dinâmico da rede, os dispositivos de armazenamento podem ser modelizados como fontes de tensão DC constantes usando electrónica de potência como interface entre o dispositivo e a rede (AC/DC/AC no caso dos volantes de inércia). Estes dispositivos agem como fontes de tensão AC controláveis. Apesar disso, estes dispositivos têm limitações físicas e assim uma capacidade finita para armazenar energia.

Supondo que o volante de inércia tem energia suficiente para manter o valor da tensão DC constante durante o intervalo de tempo em que está a contribuir com a potência para a rede, não é necessário considerar o modelo dinâmico daquele sistema, bastando portanto considerar o modelo em regime estacionário [1].

O modelo utilizado para representar o volante de inércia nas simulações é o modelo de VSI (“*Voltage Source Inverter*”) considerado em [1]. Este modelo engloba regulação de tensão e frequência. Contudo, irá ser focada apenas a parte de regulação de frequência.

O VSI age como uma fonte de tensão que reage às perturbações da rede apenas baseado em informações disponíveis aos seus terminais. A expressão que descreve o modelo do VSI é a seguinte

$$\omega = \omega_0 - K_p \cdot P \quad (4-2)$$

Onde ω é o valor de saída da frequência, ω_0 (*idle frequency*) é o valor de frequência para o qual a produção de potência activa do volante de inércia é zero, $1/K_p$ é o ganho *Active Power Droop* e P é a potência fornecida pelo volante à rede.

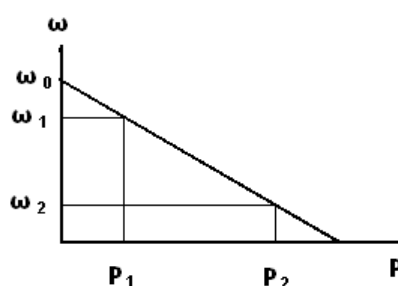


Figura 4.8 - Desvio de frequência *versus* variação de potência activa.

Tendo em conta o modelo e a figura 4.8, se o VSI estiver a operar numa rede isolada e, se ocorrer um aumento de carga de ΔP (de P_1 para P_2), aos terminais do VSI, o desvio de frequência aos seus terminais, definido pela sua característica, é:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \omega_0 - K_p \cdot (P_1 + \Delta P) - [\omega_0 - K_p \cdot P_1] \Rightarrow \Delta\omega = -K_p \cdot \Delta P \quad (4-3)$$

Num sistema isolado onde haja n VSI's, uma variação de potência de ΔP no sistema é distribuída pelos vários VSI de maneira que, em regime estacionário, é válida a seguinte expressão:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (4-4)$$

Sendo ΔP_i a Variação de potência experimentada pelo VSI i .

Como para a rede em estudo apenas se considera um VSI, a variação de potência é experimentada apenas por um VSI. Se se considerar que, no momento em que se dá aquela variação, o volante não está nem a receber nem a fornecer potência à rede, a potência que aquele passa a fornecer é dada pela expressão (4-5)

$$\Delta P_g = P_g \Rightarrow \Delta\omega = -k_p \cdot P_g \Rightarrow P_g = -\frac{1}{k_p} \cdot \Delta\omega \quad (4-5)$$

Sendo P_g a potência fornecida pelo volante de inércia.

Para além do valor de k_p é necessário incluir no modelo outros parâmetros, que são enumerados em seguida:

- **Tdp**: Constante de tempo do volante de inércia de nome *active power decoupling delay* e que tem como objectivo modelizar atrasos da electrónica de potência e de medição; não tem impacto no comportamento dinâmico do volante já que os seus valores típicos são muito pequenos (0.05 s);
- **1/Kp**: ganho de nome *active power droop*, e valor típico $1\text{Hz}/P_n$, sendo P_n a potência do volante de inércia;
- **Pmax/Pmin**: Limites máximos e mínimos de potência activa do volante de inércia.

Em seguida apresenta-se uma tabela onde são apresentados os parâmetros para três volantes de inércia de 500 kW, 1000 kW e 1500 kW.

Tabela 4.1 – Parâmetros para três volantes de inércia.

Sn (MVA)	Tdp (s)	Kp (Hz/MW)	Pmax (MW)	Pmin (MW)
0.5	0.05	2	0.5	-0.5
1	0.05	1	1	-1
1.5	0.05	0.67	1.5	-1.5

Assim o diagrama de blocos que representa o modelo do volante de inércia na plataforma de simulação *Simulink*® é o que se apresenta na figura 4.9.

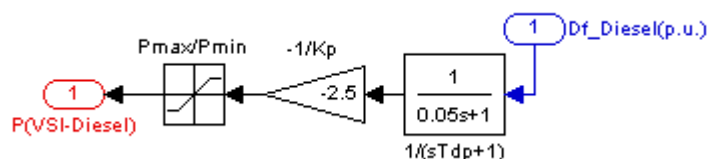


Figura 4.9 - Diagrama de blocos do volante de inércia.

4.3 - Baterias de Iões de Lítio

Embora se use frequentemente o termo “bateria”, a designação correcta de uma unidade básica electroquímica é “célula”. Uma bateria consiste em uma ou mais destas células ligadas em série ou paralelo, ou ambos, dependendo da capacidade de saída desejada em termos de tensão e corrente.

As baterias disponíveis actualmente são baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio, iões de lítio e sódio- enxofre [1].

Hoje em dia a maioria das subestações está equipada com baterias. Estas baterias são usadas tipicamente para fornecer energia para o funcionamento dos disjuntores e controlo da subestação e equipamento de monitorização em caso de perda de produção. Devido ao rápido desenvolvimento das subestações, é necessário que haja maior capacidade em caso de emergência. Contudo, o espaço disponível para a construção de subestações é cada vez menor. As baterias de chumbo-ácido perderam a preferência para outras tecnologias devido ao seu volume, peso, manutenção e impacte ambiental. No meio destas novas tecnologias encontram-se as baterias de iões de lítio [16].

A tecnologia das baterias de iões de lítio tem conseguido um progresso significativo, e com o aumento do preço do chumbo e o facto de se ter que reduzir as dimensões das subestações, faz com que aquelas baterias sejam mais atractivas.

4.3.1 - Aspectos Construtivos e Princípio de Funcionamento

Nesta subsecção irão ser apresentados, em linhas gerais, os constituintes e o princípio de funcionamento de uma bateria.

Uma bateria é um dispositivo que converte a energia química contida nos materiais directamente em energia eléctrica por meio de uma reacção de oxidação-redução electroquímica. Este tipo de reacção envolve a transferência de electrões de um material para outro através de um circuito eléctrico.

Os elementos básicos, que constituem uma célula de uma bateria, necessários para que se dêem as reacções químicas, são três e consistem em:

- Ânodo;
- Cátodo;
- Electrólito.

O Ânodo, ou eléctrodo negativo, liberta electrões para o circuito externo e é oxidado durante a reacção electroquímica. O Cátodo, ou eléctrodo positivo, recebe electrões do circuito externo e é reduzido durante a reacção electroquímica. O Electrólito proporciona o meio para transferência dos electrões e iões dentro da célula entre o ânodo e o cátodo.

Quando a célula está, ligada a uma carga externa, a descarregar, os electrões movem-se do ânodo para o cátodo, onde os electrões são aceites, através da carga externa, ficando o material do cátodo reduzido. O circuito eléctrico é completado no electrólito com o fluxo de aniões, que são iões negativos, e catiões, que são os iões positivos, para o ânodo e para o cátodo, respectivamente. Durante a recarga de uma bateria recarregável o fluxo é invertido e a oxidação dá-se no eléctrodo positivo e a redução dá-se no eléctrodo negativo [1].

4.3.2 - Vantagens e Desvantagens

Para se poder evidenciar as vantagens/desvantagens das baterias de iões de lítio é necessário recorrer à sua comparação com as baterias de chumbo-ácido, que eram as preferidas até aparecerem estas novas tecnologias.

As baterias de iões de lítio têm recebido mais atenção porque, como foi referido em 4.3, ocupam menos espaço, não necessitam de ventilação nem de manutenção, os módulos podem ser ligados em longas séries e paralelos controlados apenas por um sistema de controlo, é mais amigável do ambiente, tem tempo de vida mais longo e maiores densidades de potência e energia. A desvantagem é necessitarem de um maior investimento [16].

4.3.3 - Aplicações Práticas e Fabricantes

Não há um só tipo de baterias de iões de lítio. A estas estão associadas diferentes tecnologias. Contudo, em geral, aqueles sistemas podem ser utilizados em regulação de frequência, reserva girante, sistemas UPS, gestão de produção renovável e em automóveis híbridos [17].

As baterias de iões de lítio com a tecnologia Nanophosphate™ patenteada pela A123 Systems, têm diversas aplicações, tais como nos transportes, na estabilização da rede, e em áreas relacionadas com agências governamentais. Em [17] é feita a referência ao *Híbrid Ancillary Power Unit (Híbrid-APU™)*, que é um sistema de baterias que são instaladas numa central para reserva e regular o valor da frequência. A utilização deste sistema numa central faz com que haja um melhor aproveitamento da capacidade de geração, já que em caso de emergência são as baterias que entram em funcionamento devido à sua capacidade de responder em milissegundos, enquanto que os geradores podem demorar minutos a aumentar a sua produção. Desta forma as centrais operam melhor, já que podem ter a sua produção estabilizada em vez de estarem a alterar o valor da sua produção de cada vez que a carga varia, o que faz com que seja consumido menos combustível e desgaste menos as máquinas.

A utilização daquele sistema, pelas centrais, traz mais benefícios, tais como: menos manutenção e custos capitais, maior tempo de vida e maior eficiência. Estudos independentes demonstraram que a utilização de sistemas de armazenamento eficientes, tais

como o *Híbrid-APU™*, pode reduzir as emissões de CO₂, SO₂ e NO_x em 80% em comparação com os serviços auxiliares das centrais convencionais.

O sistema *Híbrid-APU™* da *A123 Systems* é configurável, e apresenta uma vasta gama de aplicações com potências desde 2MW a 100MW.

Um outro exemplo de sistema com resultados positivos na regulação de frequência, descrito em [18], é o sistema desenvolvido pela *Altairnano* em conjunto com a *AES Energy Storage LLC*, que é uma filial da *AES Corporation*. Este sistema é composto por duas configurações de baterias de 1MW/250kWh (900MWs). Estas são baterias de titanato de lítio, que é uma tecnologia mais avançada em relação às baterias de iões de lítio convencionais. Aquelas baterias têm capacidades de potência três vezes superiores às baterias de iões de lítio convencionais e podem ser descritas como a combinação de uma bateria com um supercondensador. Isto significa que podem fornecer e absorver energia à mesma taxa, fazendo com que esta tecnologia seja indicada para aplicações de “*Smart Grid*”.

O teste piloto efectuado na *Indiana Power and Light*, ao sistema referido no parágrafo anterior, é considerado um sucesso na aplicação de sistemas avançados de armazenamento de energia para regulação de frequência.

A nova tecnologia de baterias de titanato de lítio da *Altairnano* está a ajudar a *AES Corporation* a vingar no mercado com a apresentação de soluções eficientes que proporcionam a estabilidade da rede e ajudam a integração de energias renováveis, tais como eólica e solar.

4.4 - Conclusões

Os sistemas de armazenamento de energia são importantes para a melhoria da estabilidade dos sistemas eléctricos, nomeadamente ao nível da melhoria da estabilidade de frequência, sejam eles de grande dimensão ou isolados. Os volantes de inércia e as baterias de iões de lítio são dois tipos de sistemas de armazenamento de energia e têm várias vantagens, sendo algumas delas a diminuição de emissões de gases poluentes, resposta rápida face a variações de carga e necessitam de pouca manutenção.

De acordo com o que foi apresentado nas secções 4.2 e 4.3 pode concluir-se que o sistema de armazenamento mais indicado para ser instalado na rede em estudo é um volante de inércia. Isto porque as características deste sistema são adequadas às necessidades da rede isolada em estudo e também porque há, pelo menos, dois casos de sucesso, apresentados como exemplos, do uso desta tecnologia em sistemas semelhantes à rede em estudo. Além disso, como esta rede possui um grande valor de reserva girante, apenas é necessário que o sistema de armazenamento forneça energia durante alguns segundos. As características das baterias disponibilizadas pelos fabricantes apresentados são exageradas, tendo em conta as características da rede, daí que esta tenha sido mais uma razão para escolher um volante de inércia, em vez de uma bateria, para ser instalado no sistema eléctrico de energia em estudo.

Capítulo 5

Resultados Obtidos para o Caso de Estudo

5.1 - Introdução

Este capítulo tem como objectivo principal mostrar a resposta do SEE em estudo face a perturbações, de maneira a ser verificado ou não o interesse em instalar um sistema de armazenamento de energia de maneira a ser mais fácil a estabilização do valor da frequência. Para avaliar a resposta do sistema face a perturbações utilizou-se a plataforma de simulação *Simulink*[®] que o *MATLAB*[®] disponibiliza. Para isso construiu-se o modelo simplificado do SEE, de barramento único, que envolve os sistemas de regulação de frequência. É possível usar o modelo simplificado, de barramento único, sem prejudicar os resultados devido à pequena dimensão da rede. O modelo da rede apresenta-se na figura 5.1.

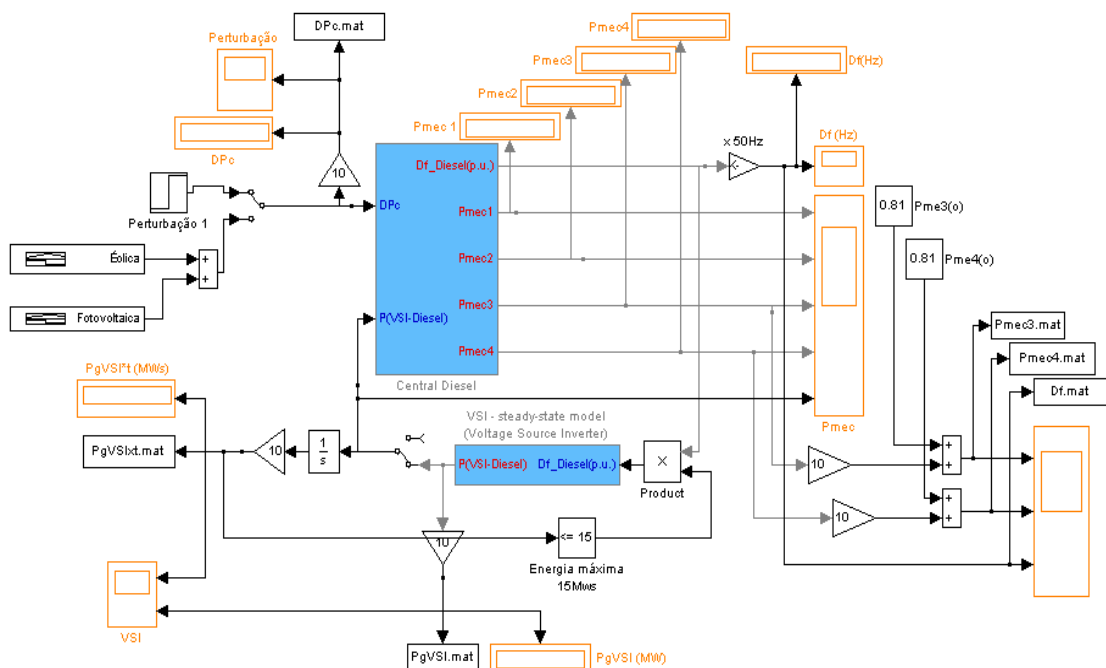


Figura 5.1 - Modelo utilizado no *Simulink*[®] para representação da rede.

Na figura 5.1, o bloco que está representado a sombreado do lado esquerdo em cima representa a variação da produção dos geradores térmicos (Pmec1, Pmec2, Pmec3, Pmec4) e o desvio de frequência da rede (Df_Diesel(p.u.)) face às perturbações, que neste caso são representadas por um aumento no consumo (DPc), e à potência produzida pelo volante de inércia (P(VSI-Diesel)). Na figura 5.2 que se apresenta em seguida, está representado o modelo utilizado nas simulações que representa o que foi descrito atrás.

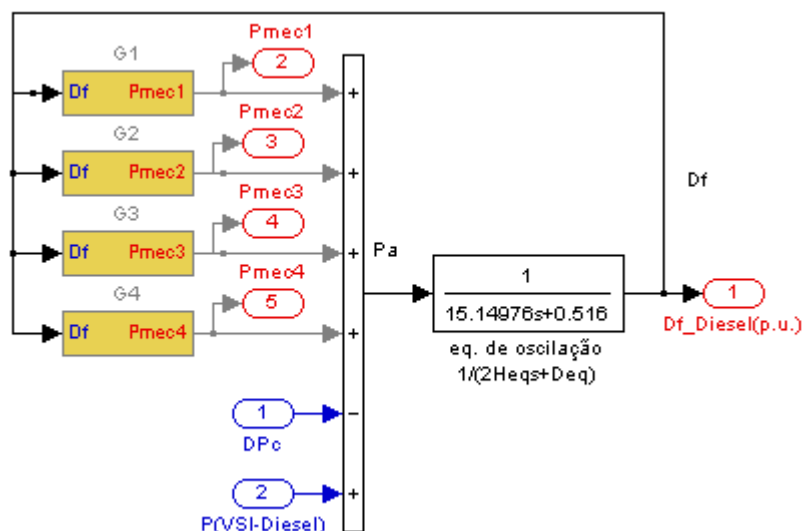


Figura 5.2 - Modelo contido no bloco correspondente às variações na produção dos geradores diesel e desvio de frequência, tendo como entradas as variações de produção renovável e a potência produzida pelo volante de inércia.

5.2 - Critérios de Avaliação

Antes de serem apresentadas as perturbações e resposta da rede face às mesmas, é importante definir os critérios que serão utilizados na avaliação dos resultados. O objectivo do presente trabalho é dimensionar um sistema de armazenamento de energia para regulação de frequência de maneira a manter a qualidade de serviço. No entanto quando se está perante uma situação em que sai intempestivamente de serviço grande parte da produção, a preocupação deixa de estar centrada na manutenção da qualidade de serviço passando a estar na manutenção da segurança do sistema. Assim sendo, em seguida apresentam-se os critérios de avaliação.

Como o SEE em estudo se trata de uma rede isolada, os limites para o desvio de frequência são alargados em relação a uma rede interligada. Isto porque quanto menor é a inércia do sistema, maior é desvio de frequência quando há um desequilíbrio entre a produção e o consumo. Desta forma é mais difícil manter o valor da frequência no valor nominal. Assim sendo, considerou-se que o valor máximo permitido para o desvio de frequência em regime transitório (após perturbação) é de 1.5 Hz. Supôs-se assim que, a partir deste valor de queda de frequência, ocorre deslastre automático de carga, situação esta que se pretende evitar.

O que foi referido no parágrafo anterior aplica-se quando se está perante uma perturbação muito severa, como por exemplo sair toda a produção renovável

intempestivamente de serviço, que no caso da rede em estudo, corresponde a sair de serviço aproximadamente 65% da produção (considerando os parques eólicos e fotovoltaicos à sua produção máxima). Quando se tratam de perturbações menos severas, por exemplo, pequenas variações na produção eólica e/ou fotovoltaica, que se podem prolongar por alguns minutos, consideram-se limites mais rígidos para o desvio da frequência em relação ao valor nominal. Assim considera-se que, após o desvio máximo inicial a seguir ao início da perturbação, o desvio de frequência não pode sair fora da gama ± 500 mHz de maneira a poder ser mantida a qualidade de serviço.

Na análise feita, aos resultados obtidos por simulação, subtraiu-se 200mHz aos valores indicados como máximos permitidos para o desvio de frequência nos últimos dois parágrafos, ou seja, em vez de se considerar 1.5 Hz e 500 mHz, passam a considerar-se 1.3 Hz e 300 mHz respectivamente. Subtraem-se os referidos 200 mHz para poder existir uma margem de segurança devido aos seguintes aspectos [19]:

- Falhas de precisão de medida (10 mHz);
- Insensibilidade dos reguladores (10 mHz);
- Desvio máximo de frequência antes da perturbação (50 mHz);
- Erros do modelo de simulação dinâmica (130 mHz).

5.3 - Perturbações

A produção de energia eléctrica através da utilização de energias renováveis, embora com a vantagem de ser uma forma não poluente de produzir energia, está sujeita a variações devido à intermitência das fontes, nomeadamente, eólica e fotovoltaica. Esta intermitência deve-se sobretudo, no caso da eólica, a variações na velocidade do vento e, no caso da fotovoltaica, à movimentação das nuvens que impedem/permitem que a radiação solar seja recebida pelos painéis fotovoltaicos. Portanto, face a estas situações, é necessário estudar a resposta do sistema.

As perturbações consideradas nas simulações são, como já referido no capítulo 3, as variações na produção nos parques eólicos e fotovoltaicos. Os valores considerados para estas variações são baseados nos valores obtidos na análise estatística de dados descrita no capítulo 3. Relativamente às variações de produção eólica, optou-se por arredondar os valores de variação máxima encontrados (que se apresentam nas tabelas 3.1 e 3.2) para cima. Optou-se por arredondar os valores encontrados, visto que estamos perante um problema de dimensionamento, e nestas situações analisa-se o pior cenário, no sentido de tornar a análise mais segura. Estes valores arredondados são apresentados na tabela 3.3.

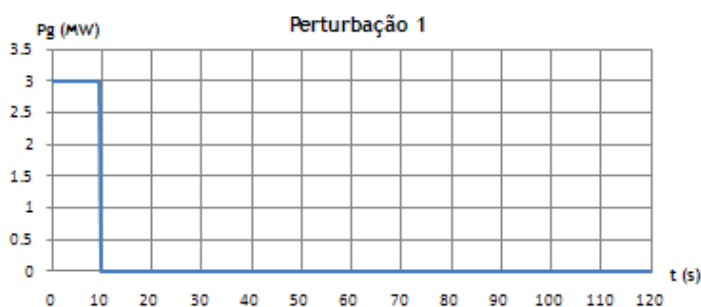
Inicialmente, relativamente à produção fotovoltaica, os únicos dados disponíveis para análise eram os correspondentes ao Parque Fotovoltaico 1 (3.2.2.1). O facto de haver dados insuficientes levou a que fossem considerados valores superiores para as variações daquele tipo de produção, porque se sabe da experiência de operação de parques fotovoltaicos que as variações podem ser muito superiores às obtidas. É importante salientar que estas variações dependerão do tipo de tecnologia utilizada na exploração do recurso solar, nomeadamente do tipo de painel, e do facto de se tratar de módulos fixos ou móveis. Destas considerações, resultam as perturbações que se descrevem na tabela 5.1, as quais foram consideradas para a realização das simulações.

Tabela 5.1 – Descrição das perturbações consideradas nas simulações do comportamento dinâmico da rede isolada em estudo.

Perturbação	Duração (s)	Variações na produção (Descrição)		Variações na produção (MW)	
		Eólica	Fotovoltaica	Eólica	Fotovoltaica
1	120	Saída intempestiva	Saída intempestiva	1	2
2	120	± 10% de 1 em 1 segundos	± 50% de 5 em 5 segundos	0.1	1
3	120	± 20% de 5 em 5 segundos	± 50% de 5 em 5 segundos	0.2	1
4	120	± 25% de 10 em 10 segundos	± 50% de 5 em 5 segundos	0.25	1
5	120	± 10% de 1 em 1 segundos	± 80% de 5 em 5 segundos	0.1	1.6
6	120	± 20% de 5 em 5 segundos	± 80% de 5 em 5 segundos	0.2	1.6
7	120	± 25% de 10 em 10 segundos	± 80% de 5 em 5 segundos	0.25	1.6

5.3.1 - Saída Intempestiva de Toda a Produção Renovável

De acordo com o despacho considerado e apresentado na secção 2.4, é a Produção Renovável que mais contribui para alimentar a carga. Por esta razão é que é importante analisar a resposta do sistema no caso de toda a produção renovável sair intempestivamente de serviço, por exemplo, na sequência de um curto-circuito à saída da subestação a que estão ligados os parques eólicos e fotovoltaicos. Note-se que, como foi já referido no capítulo 3, estes parques só estão ligados à mesma subestação em caso de reconfiguração da rede. No caso de ocorrer este tipo de perturbação, a preocupação é respeitar os critérios de segurança que pretendem evitar deslastre automático de carga, sendo por isso permitido comprometer por instantes a qualidade de serviço. Em seguida apresenta-se a figura 5.3 onde está representada a perturbação descrita, que no presente documento é denominada por Perturbação 1.

**Figura 5.3** - Perturbação 1: Saída intempestiva de toda a produção renovável

Esta perturbação, representada na figura 5.3, corresponde a sair intempestivamente toda a produção renovável. Contudo, na plataforma de simulação utilizada não há maneira de simular perda de produção. Por esta razão é que ao invés de considerar perda de produção, foi considerado um aumento de carga.

5.3.2 - Variações Intermitentes de Produção Renovável

De acordo com a descrição feita na tabela 5.1, em seguida apresentam-se figuras onde estão representadas graficamente as Perturbações 2 a 7.

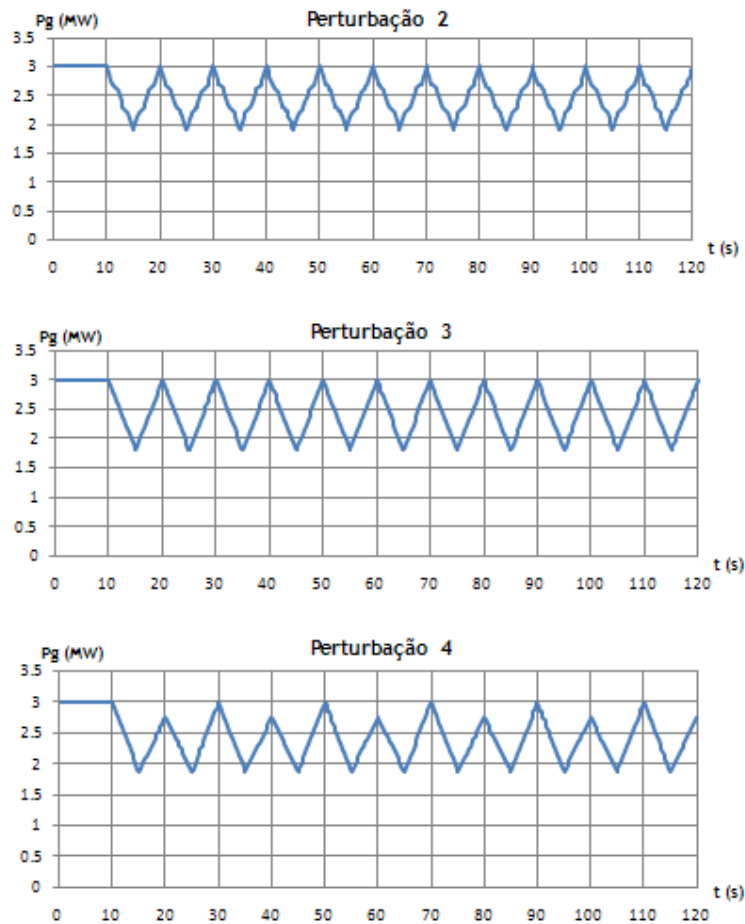


Figura 5.4 - Perturbação 2: Variação de 50% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 10% de produção eólica de segundo a segundo; Perturbação 3: Variação de 50% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 20% de produção eólica de 5 em 5 segundos; Perturbação 4: Variação de 50% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 25% de produção eólica de 10 em 10 segundos

De notar que as variações intermitentes de produção renovável consideradas são mais severas do que aconteceria na realidade, já que se está a considerar que, em cada intervalo de tempo, a produção varia sempre com a amplitude máxima.

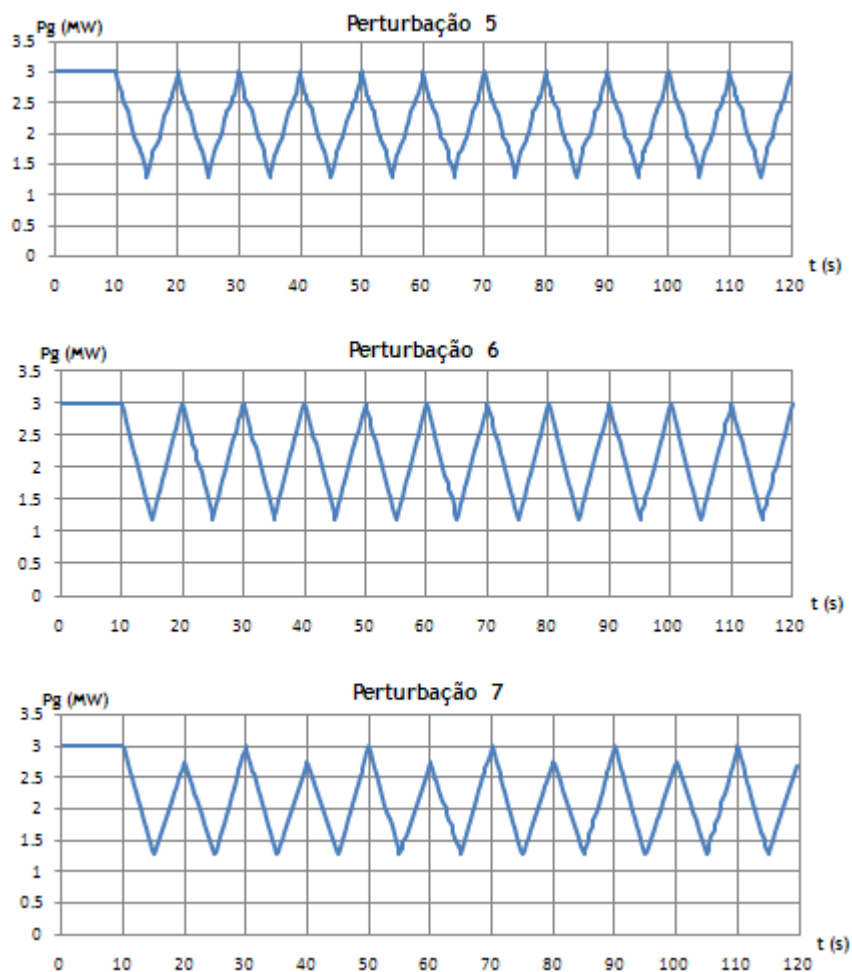


Figura 5.5 - Perturbação 5: Variação de 80% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 10% de produção eólica de segundo a segundo; Perturbação 6: Variação de 80% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 20% de produção eólica de 5 em 5 segundos; Perturbação 7: Variação de 80% de produção fotovoltaica de 5 em 5 segundos em conjunto com 25% de produção eólica de 10 em 10 segundos

5.4 - Resultados das Simulações

Na secção anterior foram apresentadas as perturbações que foram consideradas nas simulações. Assim sendo, o passo que se seguiu foi acrescentar, ao modelo da rede já existente no MATLAB®, os dois blocos: um referente à variação da produção eólica e outro referente à variação da produção fotovoltaica. Nas subsecções que se seguem será apresentada a resposta do sistema face às perturbações. O objectivo é avaliar a necessidade/interesse em instalar ou não um dos sistemas de armazenamento de energia apresentados no capítulo 4.

5.4.1 - Sem Inclusão de Sistema de Armazenamento de Energia

Tal como indica o título da presente subsecção, primeiro foram feitas as simulações sem considerar em serviço qualquer sistema de armazenamento de energia. Como se trata de

avaliar a resposta dinâmica do sistema, considerou-se uma janela temporal de 120 segundos. Cada simulação tem como resultados a evolução do desvio de frequência e a produção dos dois geradores térmicos em serviço durante os referidos 120 segundos. Como o sistema tem mais de 7 MW de Reserva Girante (3.5 MW em cada um dos geradores em serviço), e a perturbação mais severa considerada tem amplitude máxima de 3 MW, não é relevante analisar a variação na produção dos geradores térmicos, visto que estes não atingirão o seu limite máximo de produção. O problema centra-se apenas no valor que irá tomar o desvio de frequência.

São apresentados, na tabela 5.2, que se segue, os valores máximos e mínimos que o desvio de frequência da rede sofreu em consequência de cada perturbação, bem como a variação máxima que a produção renovável experimentou durante os mencionados 120 segundos.

Tabela 5.2 – Valores máximos dos desvios de frequência e valor máximo da variação da produção renovável (sem instalação de volante de inércia)

Perturbação	$\Delta f_{\max}$ (Hz)	$\Delta f_{\min}$ (Hz)	$\Delta P_{g\max}$ (MW)
1	0.000	-1.494	-2.990
2	0.246	-0.431	± 1.100
3	0.291	-0.490	± 1.200
4	0.296	-0.462	± 1.125
5	0.391	-0.674	± 1.700
6	0.435	-0.735	± 1.800
7	0.443	-0.708	± 1.725

Através da observação da tabela 5.2, constata-se, como era já esperado, que é a perturbação 1 que provoca maior amplitude no desvio de frequência da rede. As restantes perturbações provocam desvios muito menores, e pode verificar-se que, no conjunto de perturbações 2, 3 e 4, é 3 que leva aos piores resultados. Isto porque esta perturbação, como já foi apresentado na tabela 5.1, corresponde a variações de 5 em 5 segundos de 50% de produção fotovoltaica em conjunto com 20 % de produção eólica. As perturbações 2 e 4 não são tão severas porque o espaço de tempo de variação de produção eólica é diferente do espaço de tempo de variação de produção fotovoltaica, e assim as variações de eólica e fotovoltaica acabam por compensar-se uma à outra. Pela mesma razão, no grupo de perturbações 5, 6 e 7, é a perturbação 6 que é a mais severa para a rede no que respeita ao desvio de frequência. Portanto, a partir deste ponto, no presente documento, no que diz respeito a resultados das simulações, serão apresentadas figuras e tabelas apenas referentes às perturbações 1, 3 e 6, já que representam as perturbações mais severas, não sendo por isto relevante apresentar os resultados das simulações considerando as outras perturbações.

Seguem-se então figuras onde está representada em gráficos a evolução do desvio de frequência perante as referidas perturbações.

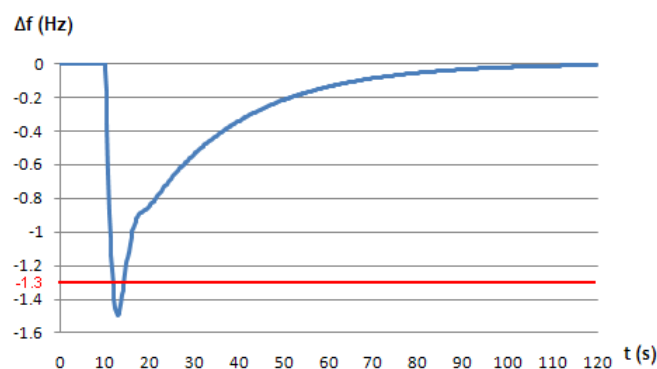


Figura 5.6 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia

Perante a figura 5.6 é fácil observar que o desvio de frequência ultrapassa o limite de 1.3 Hz estipulado na secção 5.2. Portanto, desde já, se pode concluir que é necessária a instalação de algum tipo de sistema de armazenamento de energia. Veja-se em seguida como reage a rede, em termos de desvio de frequência, às perturbações 3 e 6.

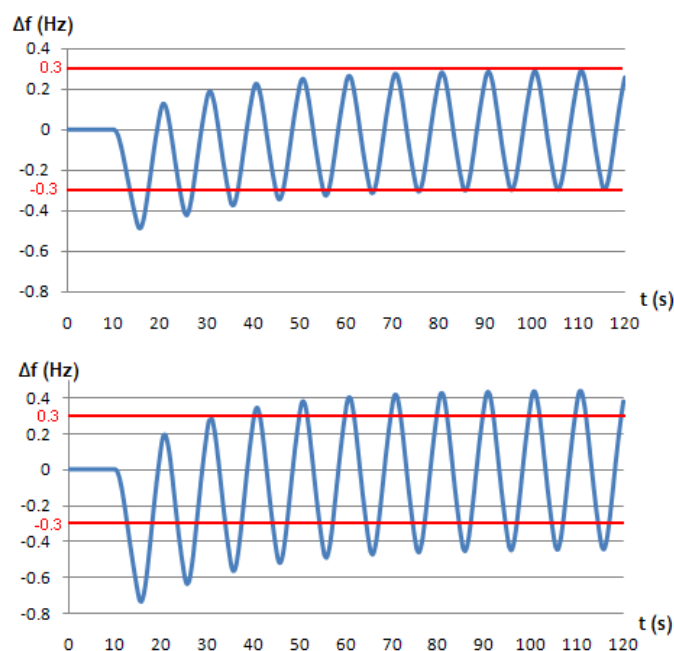


Figura 5.7 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo) sem instalação de um sistema de armazenamento

Facilmente se pode constatar que, tendo em conta o limite referido na secção 5.2, no caso de ocorrer a perturbação 6, e enquanto esta permanecer, não é assegurada a qualidade de serviço no que diz respeito ao desvio de frequência. Portanto é conclusivo que é necessária a instalação de um sistema de armazenamento de energia para melhoria da estabilidade de frequência nesta rede isolada em estudo.

Na subsecção seguinte são apresentados os resultados considerando a instalação de um dispositivo de armazenamento.

5.4.2 - Com Inclusão de Sistema de Armazenamento de Energia

Os resultados que serão apresentados na presente subsecção consideram a instalação de um volante de inércia, nomeadamente o *PowerStore*, do fabricante *Powercorp*. Foi escolhido este produto pois é um volante de inércia que foi desenhado especificamente para fornecer reserva girante e superar as variações transitórias e cíclicas da carga, quer em redes de grande dimensão quer em redes isoladas [12]. Outra razão que levou à escolha deste produto foi o exemplo de sucesso, apresentado na secção 4.2.3, da aplicação do mesmo numa rede isolada, além de que através das folhas de características verificou-se que este era o produto mais indicado.

Como se pode consultar em [14], este fabricante oferece uma gama de volantes de inércia com potências de 500 KW, 1000 KW e 1500 kW, todos com energia máxima de 15 MWs. Foi com estes valores que foram efectuadas as simulações.

Seguem-se então os resultados, em tabela e figuras, das simulações efectuadas considerando, à vez, volantes de inércia de 500 KW, 1000 kW e 1500 kW. Note-se que na plataforma de simulação se teve em consideração os limites técnicos do volante, nomeadamente na limitação da sua energia libertada (15MWs).

São apresentados, na tabela 5.3, que se segue, os valores máximos e mínimos que o desvio de frequência da rede sofreu em consequência de cada perturbação, bem como a variação máxima que a produção renovável experimentou durante os mencionados 120 segundos, quando considerado um volante de inércia em serviço.

Tabela 5.3 – Valores máximos para os desvios de frequência e valor máximo da variação da produção renovável (considerando a instalação de um volante de inércia)

Perturbação	Potência do volante de inércia (kW)	$\Delta f_{\max}$ (Hz)	$\Delta f_{\min}$ (Hz)	$\Delta P_{g\max}$ (MW)
1	500	0.000	-1.263	2.990
1	1000	0.000	-1.054	2.990
1	1500	0.000	-0.910	2.990
3	500	0.230	-0.407	1.200
3	1000	0.185	-0.347	1.200
3	1500	0.156	-0.302	1.200
6	500	0.344	-0.610	1.800
6	1000	0.281	-0.521	1.800
6	1500	0.250	-0.454	1.800

Na figura 5.8 estão representados os desvios de frequência da rede em estudo face à perturbação 1, utilizando volantes de inércia de diferentes potências.

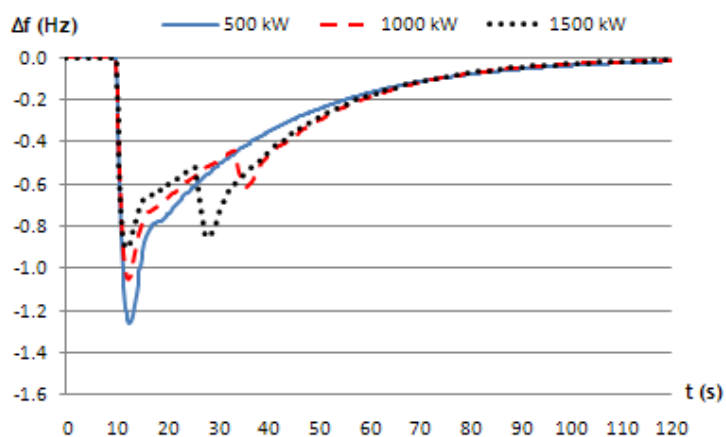


Figura 5.8 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação de um sistema de armazenamento de energia

Pela observação da figura 5.8 pode constatar-se que basta instalar um volante de inércia de 500 kW para que o desvio se mantenha dentro dos limites impostos na secção 5.2. Com a instalação de volantes de inércia de potências superiores, 1000 kW e 1500 kW, o desvio máximo diminui, mas estabiliza mais lentamente, além de que tem um novo “pico” de desvio. Esta situação acontece porque o volante atinge a sua energia máxima, o que é equivalente à ocorrência de uma nova perturbação no sistema, visto que quando esta situação acontece a sua potência produzida anula-se. Esta situação pode ser confirmada através da observação das figuras 5.7 e 5.8 que se apresentam em seguida.

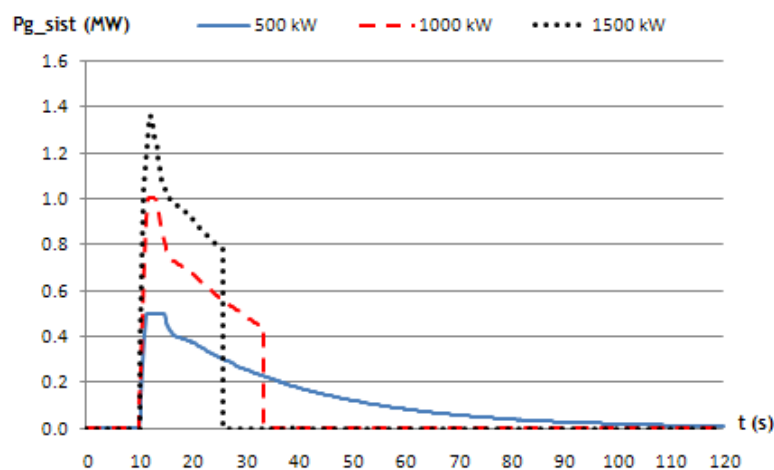


Figura 5.9 - Potência produzida pelo volante de inércia após a ocorrência da perturbação 1

Como se pode observar na figura 5.9 e 5.10, o volante de 500kW não atinge a energia máxima, ao contrário dos restantes volantes.

Daqui se conclui que é de evitar sobredimensionar o volante em termos de potência, pois tal pode fazer com que a energia armazenada no volante se esgote mais rapidamente sem necessidade, acabando assim também mais depressa a sua acção de controlo.

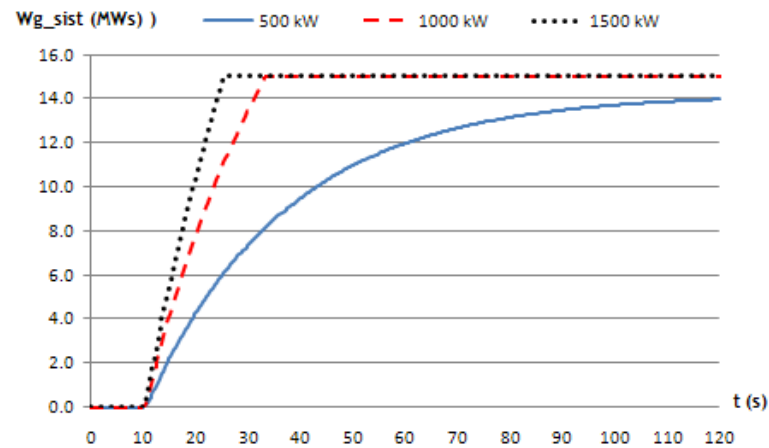


Figura 5.10 - Energia libertada pelo volante de inércia após a ocorrência da perturbação 1

A seguir apresentam-se os resultados obtidos com as simulações da resposta do sistema face às perturbações 3 e 6 utilizando volantes de inércia com as mesmas características.

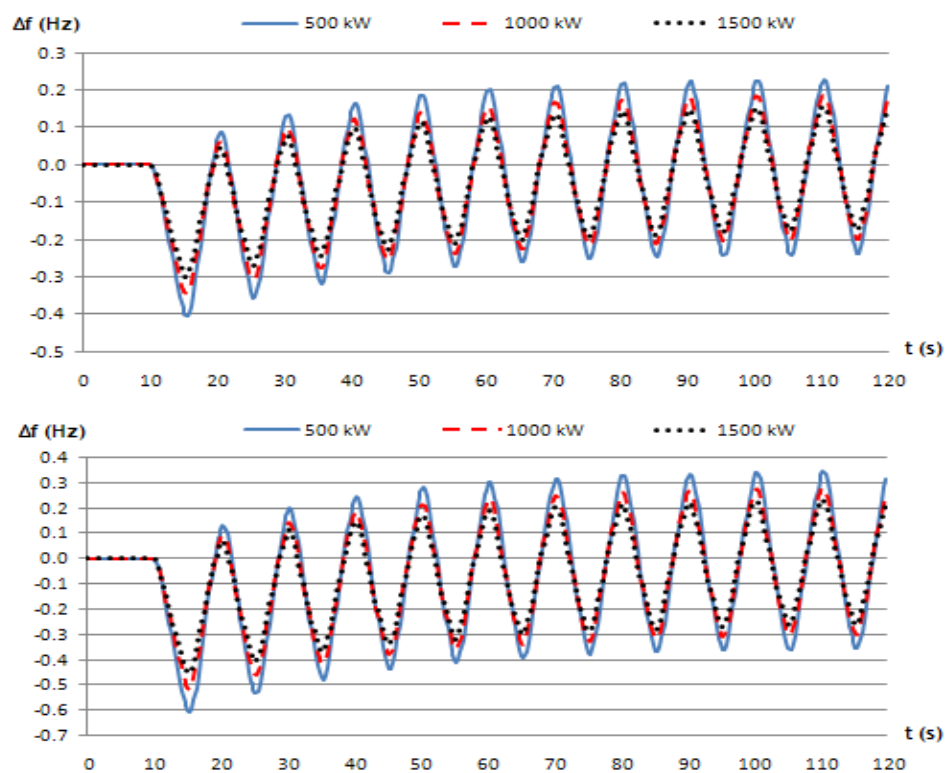


Figura 5.11 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo) com instalação de um sistema de armazenamento de energia

Através da observação da figura 5.11 chega-se à conclusão de que perante a perturbação 3 apenas seria necessário um volante de 500 kW para que fossem cumpridos os requisitos de qualidade de serviço. Contudo, perante a perturbação 6 é necessário um volante de inércia de 1000 kW para que o desvio de frequência, após o período transitório, se mantenha dentro do intervalo $[-0.3; 0.3]$ Hz.

De seguida são apresentadas as figuras 5.12 e 5.13 onde estão representados, respectivamente, os gráficos correspondentes à potência produzida pelos volantes de inércia e à energia libertada pelos mesmos.

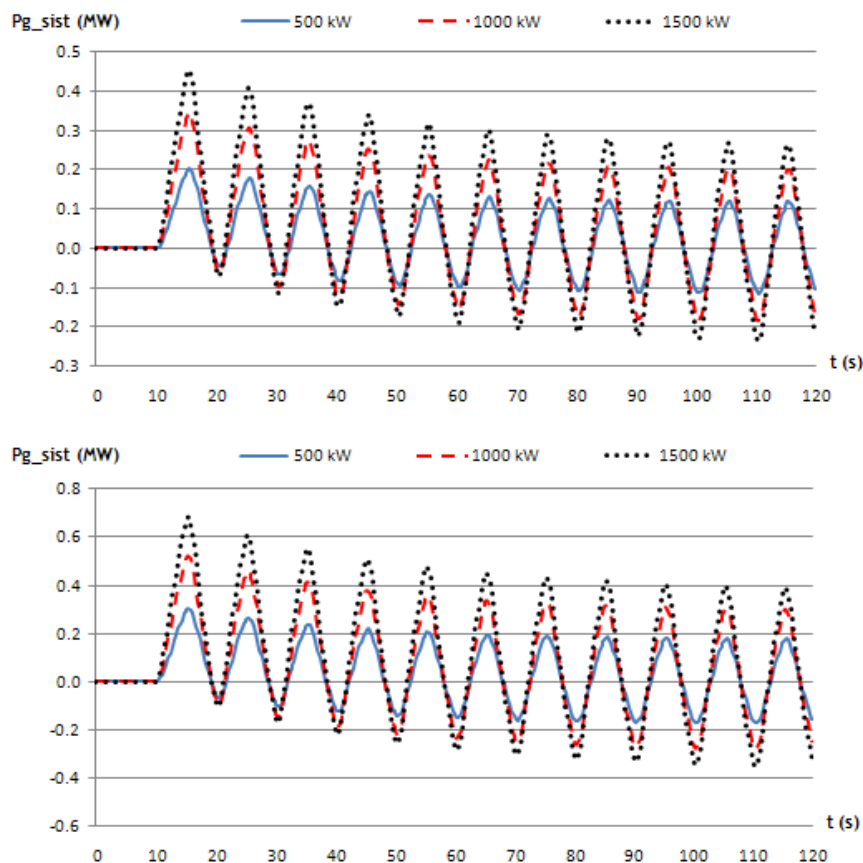


Figura 5.12 - Potência produzida pelo volante de inércia perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo)

É possível verificar, através da observação das figuras 5.10 e 5.11, que nenhum dos volantes de inércia atinge o seu limite técnico máximo perante a ocorrência das perturbações 3 e 6.

Pode ser também verificado que estes acompanham as variações do desvio de frequência, ou seja, quando o desvio varia no sentido de se tornar positivo, significa que o valor da produção está a aumentar em relação ao valor da carga e portanto, o volante de inércia “absorve” energia. Esta situação pode ser verificada entre os 35 e 40 segundos, por exemplo. No caso de o desvio de frequência se tornar negativo, acontece o oposto, ou seja o volante liberta a energia armazenada para compensar a diminuição da produção face ao consumo.

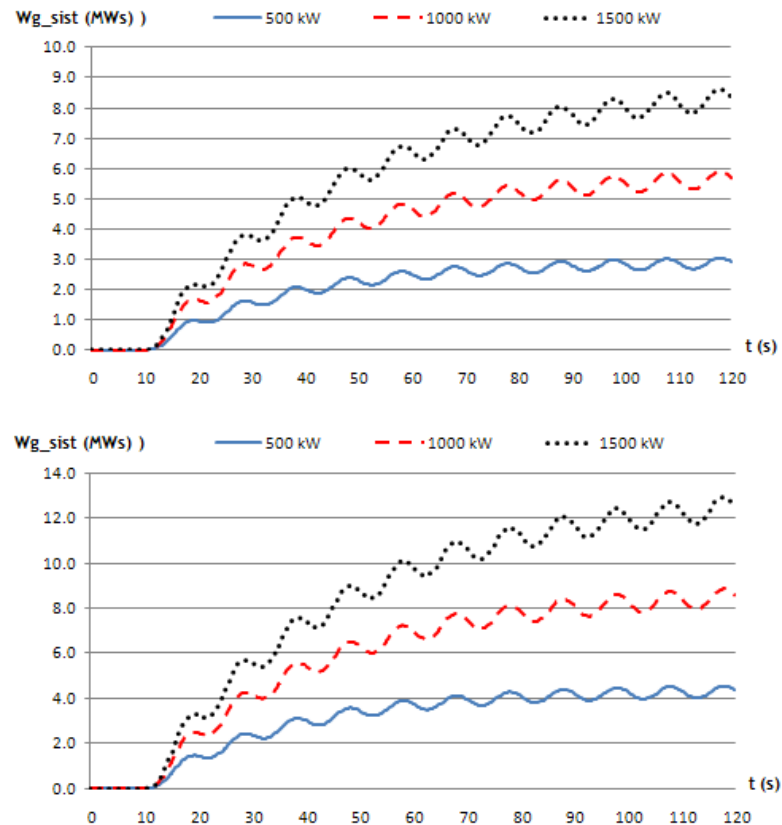


Figura 5.13 - Energia libertada pelo volante de inércia perante a ocorrência das perturbações 3 (em cima) e 6 (em baixo)

5.5 - Conclusões

De maneira a atingir os objectivos do trabalho, que era avaliar a necessidade/interesse em instalar um sistema de armazenamento de energia numa rede isolada com elevada integração de energias renováveis para melhoria da estabilidade de frequência, foram efectuadas simulações onde as perturbações corresponderam a variações na produção de produção renovável. Dois tipos de perturbações foram considerados: saída de serviço intempestiva de toda a produção renovável e variações intermitentes da mesma. No primeiro tipo de perturbação o critério a considerar é a segurança do sistema, de modo a ser evitado o deslastre automático de carga. No segundo tipo de perturbação o critério é a manutenção da qualidade de serviço. Numa primeira fase, não se considerou acção de nenhum sistema de armazenamento de energia, sendo esta considerada posteriormente.

O sistema de armazenamento de energia considerado nas simulações foi um volante de inércia. Dadas as características e necessidades da rede, aquele sistema pode corresponder a um volante de inércia com as características do *PowerStore* da *Powercorp*.

Através da análise da resposta do sistema face às perturbações conclui-se que para manter a segurança da rede bastaria instalar um volante de inércia de 500 kW, mas para que seja mantida a qualidade de serviço em regime permanente, os resultados mostraram que é necessária a instalação de um volante de inércia de 1000 kW. Através da análise dos resultados, outra conclusão a ser tirada é que pode não ser favorável ao sistema sobredimensionar o volante em termos de potência, já que, desta forma, quando este tem

que entrar em serviço no caso de uma perturbação severa, a sua energia esgota-se mais rapidamente, fazendo com que a sua acção de controlo acabe prematuramente.

Tendo em conta os resultados obtidos, para que sejam cumpridos os requisitos de segurança e de qualidade de serviço, o sistema de armazenamento de energia escolhido para ser instalado no sistema eléctrico em análise no presente documento é o *PowerStore 1000*, cujas características se encontram em [14].

Capítulo 6

Conclusões

6.1 - Principais Contribuições

A principal contribuição deste trabalho foi a confirmação de que em sistemas isolados de pequena dimensão em que a maior parte da produção é assegurada por produção renovável, nomeadamente eólica e fotovoltaica, e com valor de reserva girante igual ou superior à potência total instalada nos parques eólicos e fotovoltaicos, podem ser utilizados com sucesso volantes de inércia para a regulação do valor de frequência, proporcionando qualidade de serviço e impedimento de deslastre de carga no caso de falha de toda a produção renovável.

6.2 - Perspectivas de Desenvolvimento

Uma perspectiva de desenvolvimento seria considerar, nas simulações, a acção de uma bateria de iões de lítio com características de produtos disponíveis no mercado, para a analisar as vantagens que poderiam fornecer em termos de comportamento transitório da frequência em comparação com os volantes de inércia. Outra perspectiva, seria fazer uma análise estatística mais completa sobre as variações de produção que podem ser introduzidas nos parques fotovoltaicos, nomeadamente analisar mais séries temporais e perceber qual a influência, por exemplo, da maior/menor dispersão geográfica dos painéis e do tipo de tecnologia utilizada na exploração deste recurso (convencional ou de concentração).

Referências

- [1] Carlos Moreira, “Identification and Development of MicroGrids Emergency Control Procedures”, chapters 2-4, July de 2008.
- [2] Anexo Técnico, “Programa Nacional para as alterações climáticas”, Abril 2008.
- [3] António Joyce, ‘O solar fotovoltaico de concentração’, *renováveis magazine*, 1º trimestre de 2010, pp. 24-29.
- [4] Prabha Kundur, “Power System Stability and Control”, USA, McGraw-Hill, 1994, Chapters 9, 11.
- [5] Maria Helena Vasconcelos, “Modelização do Sistema de Regulação de Reserva Primária”, Apontamentos das aulas teóricas da unidade curricular de DESI, FEUP, 2008/2009.
- [6] República Portuguesa, “Plano de Acção Nacional para as Energias Renováveis ao Abrigo da directiva 2009/28/CE”, Versão para consulta pública 2-Jun-2010.
- [7] Chet Lions, “A Smart Grid Approach To Regulation And Ramping”, 2009.
- [8] N.Hamsic, A. Schmelter, A. Mohd, E. Ortjohann, E. Schultze, A. Tuckey, J. Zimmermann, “Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System”, *International Conferense of Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Portugal, April 2007.
- [9] J. A. Peças Lopes, “Gestão de Serviços de Sistema”, Apontamentos de apoio à disciplina de “Produção e Transporte de Energia 2”, FEUP, 2002/2003.
- [10] “Flywheel Energy Storage”, disponível em www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/fta_flywheel.pdf, Acesso em 17/Junho/2010.
- [11] N.Hamsic, A. Schmelter, A. Mohd, E. Ortjohann, E. Schultze, A. Tuckey, J. Zimmermann, “Stabilising the Grid Voltage and Frequency in Isolated Power Systems Using a Flywheel Energy Storage System”, The Great Wall World Renewable Energy Forum, *Beijing*, China, 23-27th October 2006.
- [12] “PowerStore Flywheels”, disponível em www.pcorp.com.au/index.php?option=com_content&task=view&id=83&Itemid=132, Acesso em 17/Junho/2010.
- [13] Preben Nyeng, Bo Yang, Jian Ma, Yuri Makarov, John H. Pease, David Hawkins, Clyde Loutan, “Coordinated Multi-objective Control of Regulating Resources in Multi-Area Power Systems with Large Penetration of Wind Power Generation”, 7th *International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*.

- [14] “Product Description and Data Sheet”, disponível em <http://www.pcorp.com.au/images/pcorp-pdfs/powerstore-prodspec-08112007.pdf>, Acesso em 17/Junho/2010.
- [15] “Smart Energy Matrix[™] 20 MW Frequency Regulation Plant”, disponível em http://www.beaconpower.com/files/SEM_20MW_2010.pdf, Acesso em 17/Junho/2010
- [16] David Robinson, Shenghong Sun, Ram Parashar, Liangzhong Yao, “The utilization of Lithium-Ion Batteries in Substations”, 2009.
- [17] www.a123systems.com/a123/applications/grid-stabilization, Acesso em 17/Junho/2010
- [18] “Advanced Energy Storage Systems for Frequency Regulation”, disponível em www.b2i.cc/Document/546/104403.pdf, Acesso em 17/Junho/2010.
- [19] Maria Helena Vasconcelos, “Controlo de frequência-potência”, Apontamentos das aulas teóricas da unidade curricular de DESI, FEUP, 2008/2009.

Anexo A

Características do Volante de Inércia

Neste anexo apresenta-se a folha de características do volante de inércia escolhido para ser instalado, na rede isolada em estudo no presente trabalho, com a finalidade de melhorar a estabilidade de frequência da mesma. Estas características são apresentadas na página seguinte.



PowerStore 1000

Specifications

- Design Life 20 years
- Nominal Supply Voltage 3 ph, 380 Vac - 440 Vac
- Supply Frequency 50/60Hz
- Max. Mains Voltage 480V
- Aux AC Supply.....3 ph + N, 380 Vac – 440 Vac, 50/60Hz, 50A

- Response time zero to nominal power 5msec
- Minimum operating phase-phase voltage 100V
- Fault ride through minimum phase-phase voltage 0V
- Max rate of frequency change +/- 0.1Hz/ms
- Output short circuit protection Yes
- Fault current available.....Yes³
- Paralleling of units Yes

Technical Data

- Nominal kVA rating (@ 440V) +/- 1,000kVA
 - Nominal kW rating (@ 440V) +/- 1,000kW
 - Nominal kvar rating* (@ 440V) +/- 1,000kvar
 - Nominal Current rating 1,300 A
- * (Power Factor from 0 leading to 0 lagging is possible)

- Flywheel Energy Stored (@ 3600rpm) 18MWsec
- Estimated Discharge/Charge Time @ 100kW 150s
- Estimated Discharge/Charge Time @ 500kW 30s
- Estimated Discharge/Charge Time @ 1000kW 15s

- Flywheel Operating speed range. 1800 rpm – 3600 rpm

- Power losses @ min operating speed 12kW
- Power losses @ max operating speed 15kW
- Power Conversion efficiency charge or discharge >90%⁴
- Minimum Charging Power spin-up 35 kW
- Nominal DC-link voltage..... 700 Vdc

Dimensions and Weights

As per Standard Hi-Cube 40' Shipping Container

- Dimensions (D x W x H)..... 12000 x 2480 x 3330 mm
- Weight.....app. 18,000 kg
- Cooling..... Refrigerative

Environmental

- Operating Temperature -5degC to +46degC
- Humidity 95% non condensing
- Wind Loading Category IV (3sec gust >65m/s)
- Sound Power Level less than 75dB(A)

Optional the container can be prepared for a severe marine environment close to seaside installations.

Communication

- Supported Protocols:
 - MODBus/TCP Slave
 - Pool Protocol (Powercorp Specific Protocol)
 - Others available on request
- Interfaces:
 - Ethernet..... Wired or Wireless
 - Telephone..... PSTN/PABX
 - Cellular Telephone..... GSM/GPRS, CDMA/1x

³ up to the fault current limit

⁴ excluding 12-15kW spinning and inverter losses

Figura A.1 - Características do volante de inércia escolhido para ser instalado na rede isolada em estudo [14].