

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Estudo de Redes Isoladas com Elevada Penetração de Energia Eólica utilizando Volantes de Inércia

Miguel Aires Tavares da Silva Oliveira Martins

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

Orientador: Prof. Doutor João Abel Peças Lopes

Junho 2010

Resumo

Em sistemas de redes eléctricas isoladas quando existe uma “forte” componente de produção de energia proveniente de parques eólicos existem oscilações de potência entre o sistema principal a central termoeléctrica, e os aerogeradores devido à flutuação da velocidade do vento. Variações na ordem dos 20% em alguns segundos podem prejudicar os sistemas eléctricos em que a contribuição de grupos térmicos é baixa. O deslastre de cargas ou cortes de energia eléctrica podem acontecer, sendo este, o ponto fraco dos sistemas eléctricos grupos térmicos/eólicos.

Existem diversas técnicas e sistemas de controlo das flutuações de energia para manter os níveis de qualidade, de fornecimento de energia, exigidos actualmente e diminuir ao mínimo possível a energia “*rejeitada*” sendo aqui abordado os volantes de inércia.

Nesta dissertação são avaliados as condicionantes relativas à integração e energia eólica em redes isoladas, dando-se especial atenção ao caso da Ilha Graciosa, Açores, Portugal. São descritos diversos sistemas baseados em volantes de inércia existentes no mercado. É feita uma análise das condições de operação do sistema existente na da Ilha Graciosa com sem volante de inércia envolvendo uma análise dos históricos de operação. É efectuado uma comparação do sistema real com uma simulação computacional dinâmica através do *software* MATLAB SIMULINK © bem como são apresentadas recomendações sobre estratégias de exploração.

Palavras chave:

Impacto da utilização de volantes de inércia.

Maximização da integração de produção eólica em redes eléctricas isoladas.

Armazenamento de energia através de volantes de inércia.

Abstract

Certain regions need a sustainable alternative to economically increasingly unattractive *diesel* power stations.

Combined power generation with *diesel* power plants and wind turbines has the advantage of significantly lower fuel consumption with reasonable operating costs and reliable system stability. The development process of a wind *diesel* project, however, requires investigation of specific conditions and the elaboration of a resulting system and operation strategy layout.

Usually in grid connected wind power systems all produced energy is absorbed by the electrical grid. In isolated grids powered by wind diesel generation, the load is limited. Produced energy that cannot be absorbed by the load is “rejected”. Power oscillations between the main system power station and the wind turbines due to the fluctuation of wind velocity can happen. Wind power variations in the order of 20% in a few seconds can high disturb electrical systems and take place electrical blackouts.

The market have several techniques and control systems of power fluctuations to maintain high quality levels of power supply, and reduce to the minimum “rejected” energy. In this dissertation will be discussed the flywheels.

This dissertation evaluated the constraints on integration and wind energy in isolated systems, with particular attention to the case of Graciosa Island, Azores, Portugal. The operating conditions of the existing system of Graciosa Island with and without flywheel involving an analysis of historical data will be discuss.

The actual system will be object of comparison and analysis with a dynamic computer simulation using the MATLAB SIMULINK © and recommendations are presented on exportation strategies.

Keywords:

Impact of using flywheels.

Maximizing the integration of wind power in isolated electric grid.

Energy storage by flywheels.

Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que, directamente ou indirectamente contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Ao meu orientador o Professor João Abel Peças Lopes pelo seu apoio, orientação, dedicação e conselhos prestados, que contribuíram muito significativamente e foram essenciais para o desenrolar deste trabalho.

Aos colaboradores do INESC Porto da Unidade de Sistemas de Energia, nomeadamente ao Carlos Moreira, Filipe Soares, Luís Seca e Pedro Almeida pela sua colaboração e dedicação fundamentais à elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas da Empresa Electricidade e Gaz pelo todo o seu apoio prestado.

Aos altos responsáveis da Empresa de Electricidade dos Açores e Empresa Electricidade e Gaz pela disponibilização de toda a informação necessária à realização deste trabalho.

Aos meus pais, familiares e amigos pelas palavras de incentivo e força durante a elaboração desta dissertação.

A todos o meu muito obrigado

Índice

Resumo	3
Abstract.....	5
Agradecimentos	7
Índice.....	9
Lista de figuras	11
Lista de tabelas	15
Abreviaturas e Símbolos	17
Capítulo 1	19
Introdução.....	19
1.1 - Enquadramento	20
1.2 - Objectivos.....	20
1.3 - Ilha Graciosa	21
1.4 - Estrutura da dissertação.....	21
Capítulo 2	23
Ilha Graciosa.....	23
2.1. Central Termoeléctrica da Ilha Graciosa	23
2.1.1 Operação e controlo da Central Termoeléctrica da Graciosa antes da instalação do sistema PowerStore.....	27
2.1.1.1 Grupos térmicos a <i>diesel</i>	27
2.1.1.2 Controlo da Central Termoeléctrica da Graciosa	29
2.1.1.3 Controlo de Frequência	29
2.1.1.4 Controlo de Tensão	29
2.1.1.5 Deslastre de cargas	29
2.1.1.6 Horário de Funcionamento dos grupos térmicos	29
2.1.1.7 Sistema de sincronismo horário “ <i>Master Time Clock</i> ”	29
2.1.2 Operação e controlo da Central Termoeléctrica da Graciosa após a instalação do sistema PowerStore	30
2.1.2.1 Operação com o volante de inércia <i>POWERSTORE</i>	30
2.1.2.2 Controlo de velocidade dos grupos a <i>diesel</i>	31
2.1.2.3 Divisão de cargas dos grupos a <i>diesel</i> “ <i>load sharing</i> ”	31
2.1.2.4 Controlo de arranque/paragem dos grupos térmicos	32
2.1.2.5 Controlo dos aerogeradores do parque eólico.....	33
2.1.2.6 Sistema de comando e controlo do volante de inércia	34

2.1.2.7	Sistema de sincronismo horário MTC	34
2.2.	Parque Eólico da Ilha Graciosa	34
2.2.1.	Características dos aerogeradores	36
2.2.2.	Controlo do Parque Eólico da Serra Branca	39
2.3	Caracterização da rede de distribuição MT	39
Capítulo 3		41
Volantes de Inércia.....		41
3.1	Tecnologia	41
3.2	Fabricantes de volantes de inércia.....	43
3.2.1.	<i>Beaconpower</i>	43
3.2.2.	<i>Enercon</i>	44
3.2.3.	<i>PowerCorp</i>	47
Capítulo 4		50
Análise das condições de operação		50
4.1.	Introdução	50
4.2.	Procedências de informação	50
4.3.	Condições de Operação	51
4.3.1	Sem o volante de inércia em funcionamento.....	54
4.3.2	Com o volante de inércia em funcionamento	56
4.3.3	Caso real registado.....	64
4.4.	Conclusões	66
Capítulo 5		67
Simulação Computacional.....		67
5.1.	Introdução	67
5.2.	Modelização	67
5.3.	Formalização do problema.....	72
5.3.1.	Maquina Síncrona	73
5.3.2.	Modelo de grupo <i>diesel</i>	75
5.3.3.	Modelo de volante de inércia	76
5.4.	Implementação	80
5.4.1.	Dados	82
5.4.2.	Diagrama de blocos	84
Capítulo 6		87
Casos de Análise		87
6.1.	Introdução	87
6.2.	Cenário A - <i>Hora de Vazio</i>	88
6.2.1.	Sem volante de inércia	89
6.2.2.	Com volante de inércia.....	92
6.3.	Cenário B - <i>Hora de Ponta</i>	96
6.3.1.	Sem volante de inércia	96
6.3.2.	Com volante de inércia.....	101
6.4.	Conclusões	105
Capítulo 7		107
Conclusões globais		107
7.1.	Objectivos alcançados	107
7.2.	Recomendações de exploração	108
Referências		109

Lista de figuras

Figura 1.1 - Ilha Graciosa (<i>Imagem do Google Earth</i> ©)	21
Figura 2.1 - Central Termoeléctrica da Ilha Graciosa	24
Figura 2.2 - Grupo Termoeléctrico n.º5.....	25
Figura 2.3 - Sistema de armazenagem de combustível	25
Figura 2.4 - Sinóptico do sistema de comando e controlo SCADA.....	27
Figura 2.5 - Esquema unifilar do volante de inércia <i>PowerStore</i>	30
Figura 2.6 - Aspecto exterior, volante de inércia <i>PowerStore</i>	31
Figura 2.7 - Aspecto interior, volante de inércia <i>PowerStore</i>	32
Figura 2.8 - Aerogerador n.º3 PE Serra Branca	35
Figura 2.9 - Parque Eólico da Serra Branca, Ilha Graciosa	35
Figura 2.10 - Carlinga do aerogerador <i>ENERON E-30</i>	36
Figura 2.11 - Aerogerador n.1 e aerogerador n.4 em segundo plano.....	37
Figura 2.12 - Aerogerador n.2, <i>Nordtank NTK100/25</i>	38
Figura 3.1 - Ilustração de um volante de inércia [3]	41
Figura 3.2 - Volante de inércia <i>Smart Energy 25 Flywheel</i> [5]	43
Figura 3.3 - <i>Smart Energy Matrix</i> [5].....	44
Figura 3.4 - Ilustração do sistema volante de inércia <i>ENERCON</i> [6]	45
Figura 3.5 - Sistema <i>Stand Alone System</i> [6]	46
Figura 3.6 - Volante de inércia <i>PowerStore</i> da <i>Powercorp</i> [6].....	47
Figura 3.7 - Modelos disponíveis pela <i>Powercorp</i> [6]	48
Figura 4.1 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3.....	54
Figura 4.2 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4.....	55

Figura 4.3 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3	56
Figura 4.4 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4	57
Figura 4.5 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3	58
Figura 4.6 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4	58
Figura 4.7 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3	60
Figura 4.8 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4	60
Figura 4.9 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h00 às 0h15	61
Figura 4.10 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h15 às 0h30	62
Figura 4.11 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h30 às 0h45	62
Figura 4.12 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h45 às 2h00	63
Figura 4.13 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 18h00 às 23h59	63
Figura 4.14 - Evento registado no dia 4 Outubro 2007.....	65
Figura 5.1 - Modelo equivalente ao sistema eléctrico da Ilha Graciosa com volante de inércia.	68
Figura 5.2 - Modelo equivalente ao sistema eléctrico da Ilha Graciosa sem volante de inércia.	68
Figura 5.3 - Relação entre θ e σ	74
Figura 5.4 - Função transferência da equação de movimento	75
Figura 5.5 - Função transferência do regulador de velocidade	75
Figura 5.6 - Função transferência do motor <i>diesel</i>	75
Figura 5.7 - Modelo grupo <i>diesel</i> com regulação primária e secundária.....	76
Figura 5.8 - Resumo dos componentes do volante de inércia	77
Figura 5.9 - Valor de ajuste de frequência para o controlo dinâmico	77
Figura 5.10 - Potência activa em função frequência actual do sistema	78
Figura 5.11 - Controlo dinâmico de frequência, DFS.....	78
Figura 5.12 - Função estado de carga do volante de inércia, <i>SOC</i>	79
Figura 5.13 - Função de determinação do valor de referência do PWM	80
Figura 5.14 - Elementos principais de um modelo de MATLAB SIMULINK®.....	81
Figura 5.15 - Variação de produção do Parque Eólico da Graciosa com as condições iniciais do cenário A	84
Figura 5.16 - Diagrama de blocos geral do modelo com o subsistema volante de inércia, hora do vazio	85

Figura 5.17 - Diagrama de blocos do subsistema do volante de inércia.....	86
Figura 6.1 - Cenários do sistema eléctrico da Ilha Graciosa simulados	87
Figura 6.2 - Variação do sistema sem volante inércia na hora do vazio	89
Figura 6.3 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$	90
Figura 6.4 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$	90
Figura 6.5 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$	90
Figura 6.6 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$	91
Figura 6.7 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$	91
Figura 6.8 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$	92
Figura 6.9 - Variação do sistema com volante inércia no período de vazio	92
Figura 6.10 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$	93
Figura 6.11 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$	93
Figura 6.12 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$	94
Figura 6.13 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> , volante de inércia vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$	94
Figura 6.14 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> , volante de inércia vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$	95
Figura 6.15 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> , volante de inércia vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$	95
Figura 6.16 - Variação do sistema sem volante inércia na hora de ponta	97
Figura 6.17 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$	98
Figura 6.18 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$	98
Figura 6.19 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$	99
Figura 6.20 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$	99
Figura 6.21 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$	100
Figura 6.22 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$	100
Figura 6.23 - Variação do sistema com volante inércia na hora de ponta	101
Figura 6.24 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$	102

Figura 6.25 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$	102
Figura 6.26 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$	103
Figura 6.27 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> e volante de inércia vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$	103
Figura 6.28 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> e volante de inércia vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$	104
Figura 6.29 - Comportamento dos grupos <i>diesel</i> e volante de inércia vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$	104

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Caracterização do sistema electroprodutor da CTGRA.....	26
Tabela 2.2 – Caracterização dos aerogeradores do Parque Eólico da Serra Branca.....	35
Tabela 2.3 – Características dos aerogeradores <i>Enercon</i> E-30	37
Tabela 2.4 – Características dos aerogeradores <i>Nordtank</i> NTK100/25	39
Tabela 2.5 – Caracterização das saídas e cargas de Linha CTGRA	40
Tabela 2.6 – Caracterização do diagrama de cargas no ano 2009, Ilha Graciosa.....	40
Tabela 4.1 – Valores máximos percentuais de penetração eólica.....	51
Tabela 4.2 – Produções e consumos dos anos 2005 a 2009	51
Tabela 4.3 – Consumos específicos de combustível dos anos 2005 a 2009.....	52
Tabela 4.4 – Produção total da Ilha Graciosa dos anos 2005 a 2009	53
Tabela 4.5 – Produção e consumos do volante de inércia	53
Tabela 4.6 – Mapa resumo do dia 11 Março de 2005.....	55
Tabela 4.7 – Mapa resumo do dia 10 de Março de 2006.....	57
Tabela 4.8 – Mapa resumo do dia 22 de Janeiro de 2007	59
Tabela 4.9 – Mapa resumo do dia 16 de Novembro de 2008.....	59
Tabela 4.10 – Valores alcançados pelo volante de inércia e frequência.....	64
Tabela 4.11 – Valores alcançados pelo volante de inércia e frequência.....	64
Tabela 4.12 – Energia perdida (kWh) nos dias analisados.....	66
Tabela 5.1 – Cenários base reais; Cenário A e Cenário B	69
Tabela 5.2 – Potências dos grupos <i>diesel</i> e limites técnicos	70
Tabela 5.3 – Curvas de potência dos aerogeradores <i>Enercon</i> E-30 e <i>Nordtank</i>	71

Tabela 5.4 – Dados para modelização dos grupos <i>diesel</i>	82
Tabela 5.5 – Dados equivalentes de cada cenário para modelização dos grupos <i>diesel</i>	83
Tabela 6.1 – Parametrizações de protecção de linha - subfrequência.....	88
Tabela 6.2 – Condições de operação iniciais - 0 segundos	88
Tabela 6.3 – Condições de operação iniciais - 0 segundos	96
Tabela 6.4 – Quadro resumo das subfrequências	105
Tabela 6.5 – Quadro resumo das sobrefrequências.....	105

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

<i>AGC</i>	<i>Automatic Generation Control</i> (Controlo Automático de Geração)
<i>AVR</i>	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
<i>BT</i>	Baixa tensão
<i>CTGRA</i>	Central Termoeléctrica da Ilha Graciosa
<i>CAN bus</i>	<i>Controller Area Network bus</i>
<i>DFS</i>	<i>Dynamic Frequency Support</i>
<i>DG</i>	<i>Distributed Generation</i>
<i>DVS</i>	<i>Dynamic Voltage Support</i>
<i>EDA</i>	Empresa de Electricidade dos Açores, SA
<i>EEG</i>	Empresa Electricidade e Gaz, Lda.
<i>FRR</i>	<i>Frequency Response Reserve</i>
<i>FSCTRF</i>	<i>Frequency Support Centre Frequency</i>
<i>FSDBND</i>	<i>Frequency Support Dead Band</i>
<i>FSKP</i>	<i>Frequency Support Gain</i>
<i>GCMS</i>	<i>Generator Control and Monitoring System</i>
<i>MLP</i>	Modulação por largura de impulso
<i>MT</i>	Média tensão
<i>MTC</i>	<i>Master Time Clock</i>
<i>PE</i>	Parque Eólico
<i>PI</i>	Controlador proporcional e integral
<i>PV</i>	<i>Photovoltaic</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>ONAN</i>	Sistema de arrefecimento natural
<i>SCADA</i>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Sistema de Supervisão Controlo e Aquisição de dados)
<i>SOC</i>	<i>State of charge</i>
<i>UPS</i>	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
<i>V.I.</i>	Volante de Inércia

Lista de símbolos

a	Comprimento
CE	Consumo específico
D	Coeficiente total de variação da carga com a frequência
E_c	Energia cinética armazenada
I	Momento de inércia
ω	Frequência angular
σ	Ângulo
r	Raio
m	Massa
M	Constante de inércia
P_e	Potência eléctrica
P_m	Potência máquina primária
ρ	Densidade do material
r.p.m.	Rotações por minuto
T_a	Binário aplicado sobre o rotor
T_e	Binário electromagnético
T_g	Constante de tempo de resposta do regulador
T_m	Binário mecânico de entrada

Capítulo 1

Introdução

A produção de electricidade nos Açores apresenta uma forte dependência de combustíveis fósseis importados (*fuel, diesel*). Todavia, as fontes de energia renováveis como a energia hídrica, a geotérmica e a eólica têm registado evoluções muito positivas, no ano de 2009 representaram 26% do total, sendo a energia eólica responsável por 3,8% do total produzido.

O consumo de energia eléctrica cresceu a ritmos significativos, situando-se com taxas médias anuais à volta de 7%, havendo uma diminuição dessa taxa nos últimos três anos para 3% e no ano transacto de 0,7%.

A produção de origem térmica continua a ser dominante, porém as energias renováveis representam já uma quota superior a um quinto do total.

No que respeita à utilização de electricidade, o consumo doméstico representa a componente mais significativa, mas os consumos comerciais e de serviços têm-se revelado mais dinâmicos nos últimos anos. Os consumos industriais têm-se caracterizado por uma certa estabilidade, apenas acompanhando a evolução média geral dos últimos anos.

A produção de energia eléctrica na Ilha Graciosa tem origem térmica e eólica, havendo nos últimos cinco anos um consumo de electricidade com médias de crescimento equivalentes às registadas no resto do arquipélago, exceptuando o ano passado que houve uma diminuição de 0,7% em relação ao ano anterior. A produção de energia eólica nesta ilha representa uma média anual de 14% da produção total.

1.1 - Enquadramento

O Arquipélago dos Açores através da correcta operação, exploração e maximização dos seus equipamentos produtores pretendem otimizar a conversão dos recursos naturais existentes, água, vento e energia geotérmica, em electricidade, com uma estratégia de investimentos ponderada e concertadamente planeada esta região procura estudar, programar e implementar projectos nas áreas dos recursos hídricos, eólicos e geotérmicos nas nove ilhas do arquipélago que contribuam para as presentes e futuras metas de redução de emissões de gases de efeitos de estufa que a região se propõe atingir.

Para que haja uma grande penetração de energia renovável, concretamente eólica na rede eléctrica da Ilha Graciosa é necessário que os sistemas garantam às populações o acesso a serviços de energia fiáveis e seguros, como tal torna-se necessário recorrer a sistemas de armazenamento de energia, como os aqui abordados, volantes de inércia.

Nos Açores encontram-se dois sistemas em exploração industrial do tipo volante de inércia ou em linguagem anglo-saxónica "*Flywheel*", um na Ilha das Flores e outro na Ilha Graciosa, pertencentes a Empresa de Electricidade dos Açores (EDA) mais concretamente à Empresa de Electricidade e Gás, Lda. (EEG). Assumindo esta última no actual contexto das empresas do Grupo EDA, um papel estratégico para o segmento das energias renováveis, com excepção da geotermia, responsável pelo Investimento, exploração e manutenção das centrais hídricas e eólicas dos Açores e pela gestão de todo o processo produtivo relacionado com as mesmas.

1.2 - Objectivos

A presente dissertação pretende avaliar o impacto da utilização de sistemas de armazenamento de energia do tipo volante de inércia na maximização da integração de produção eólica em redes eléctricas isoladas, mais concretamente da Ilha Graciosa, Açores por existir um equipamento deste tipo em exploração industrial.

As condicionantes relativas à integração de energia eólica da rede isolada da Ilha Graciosa são analisadas e feita uma descrição dos sistemas baseados em volantes de inércia existentes actualmente no mercado.

A operação e exploração do sistema existente na Ilha Graciosa com e sem volante de inércia envolvendo pesquisa de históricos de operação é descrita neste trabalho, incluindo-se o comportamento dinâmico da rede local recorrendo a um modelo desenvolvido sobre MATLAB SIMULINK ©, para avaliar tecnicamente o efeito da presença dos volantes de inércia no comportamento do sistema em cenários com grande produção eólica.

A partir dos estudos efectuados apresentam-se depois um conjunto de recomendações sobre estratégias de exploração a adoptar.

1.3 - Ilha Graciosa

A Ilha Graciosa é uma ilha situada no extremo noroeste do Grupo Central do arquipélago dos Açores, 37 km a nordeste da ilha de São Jorge e 60 km a noroeste da Terceira, com o seu centro aproximadamente nas coordenadas geográficas 28° 05' W e 39° 05' N. A ilha tem uma área aproximada de 62 km² e uma forma grosseiramente oval, com 12,5 km de comprimento e 8,5 km de largura máxima. É a menos montanhosa das ilhas açorianas, atingindo 402 m de altitude máxima no bordo leste da Caldeira. Esta baixa elevação confere à ilha um clima temperado oceânico, caracterizado pela menor pluviosidade do arquipélago.

Tem 4 780 habitantes (censo 2001), na maioria concentrados na sede do único concelho da ilha, a vila de Santa Cruz da Graciosa, cujo centro histórico constitui, pela riqueza e equilíbrio da sua arquitectura, uma zona classificada. A baixa pluviosidade leva à relativa secura da ilha, o que lhe dá no fim do estio uma tonalidade esbranquiçada, que associada ao casario branco das povoações lhe deu o epíteto de ilha Branca, lançado por Raul Brandão na sua obra *Ilhas Desconhecidas*. Quando a população foi muito superior à actual, a falta de água constituiu um sério problema, levando à construção de reservatórios e cisternas de várias naturezas e aos emblemáticos tanques que são hoje a marca da praça principal de Santa Cruz. [1]



Figura 1.1 - Ilha Graciosa (Imagem do Google Earth ©)

1.4 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos além deste, cujo o conteúdo de cada um descreve-se sumariamente a seguir.

O segundo capítulo descreve o sistema electroprodutor da Ilha Graciosa, fazendo uma caracterização da Central Térmica da Ilha Graciosa e sistemas associados, rede de

distribuição de média tensão, Parque Eólico da Serra Branca e volante de inércia *POWERSTORE 500*.

No terceiro capítulo faz-se uma descrição da tecnologia associada aos volantes de inércia e uma pesquisa de mercado de forma a conhecer algumas das principais ofertas disponíveis na concepção, fabrico e instalação de volantes de inércia com aplicação possível ao caso em estudo.

De seguida o quarto capítulo efectua uma análise envolvendo pesquisa de históricos de operação do sistema electroprodutor da Ilha Graciosa, fazendo-se uma análise do com e sem volante de inércia em funcionamento baseada na base de dados da Empresa de Electricidade dos Açores.

No quinto capítulo é formalizado o problema recorrendo a um modelo desenvolvido sobre MATLAB SIMULINK © sendo explanados e efectuados os modelos dos grupos a *diesel* e volante de inércia.

No sexto capítulo são apresentados após simulação dois cenários principais; Cenário A referente ao período de vazio de um diagrama de cargas típico da Ilha Graciosa, com velocidades de vento muito variáveis e um cenário B igual ao panorama anterior mas num período de hora de ponta em ambos os cenários foram efectuadas simulações com e sem volante de inércia em funcionamento.

Por último o sétimo capítulo descreve e avalia os resultados alcançados com um combinado de recomendações sobre estratégias de exploração possíveis a adoptar.

Capítulo 2

Ilha Graciosa

A Ilha Graciosa possui como sistemas electroprodutores principais e únicos a Central Térmica da Graciosa, constituída por seis grupos a *diesel* com uma potência instalada de 4,23 MW e o Parque Eólico da Serra Branca com quatro aerogeradores perfazendo uma potência instalada de 0,838 MW, ambos os centros electroprodutores, ligados a uma rede de distribuição em média tensão a 15kV única a todo o sistema com os respectivos consumidores ligados e distribuídos ao longo das quatro linhas existentes.

2.1. Central Termoeléctrica da Ilha Graciosa

A crescente evolução da procura de consumo de electricidade na Ilha da Graciosa e a necessidade de garantir disponibilidade e fiabilidade de fornecimento de energia eléctrica, bem como procurar resolver questões ambientais e de localização da antiga Central Termoeléctrica da Barra, determinaram a decisão da Empresa de Electricidade dos Açores, EDA S.A. de proceder ao aumento da capacidade de produção de energia eléctrica e construção da Central Termoeléctrica da Graciosa, com a instalação, em 2004, de 2 novos grupos geradores de 810 kW cada e a transferência dos 3 grupos geradores existentes na Central Termoeléctrica da Barra de 600kW cada. Mais recentemente em 2007 foi aumentada a capacidade da central com a instalação de um novo grupo de 810kW e construído um novo edifício com, oficina, sala de lavagem de peças e gabinetes para a manutenção.



Figura 2.1 - Central Termoeléctrica da Ilha Graciosa

Actualmente, a Central Termoeléctrica da Graciosa, principal centro produtor da Ilha da Graciosa, possui uma potência instalada de 4,23 MW, composta por seis grupos geradores consumindo *diesel*. A Central Termoeléctrica da Graciosa representa cerca de 84% da potência total instalada na ilha Graciosa.

A nova central permitiu a introdução de melhorias substanciais na qualidade do fornecimento de energia deste sistema electroprodutor, e a melhoria das condições de exploração com a introdução de um complexo sistema de automatização, permitindo que os equipamentos da central sejam geridos através de software aplicativo totalmente gráfico, através de ícones e janelas com informação dinâmica e em tempo real dos processos, com funções de informação, controlo, supervisão, regulação, parametrização de operação e análise tendencial de todas as componentes.

Descrição da Central Termoeléctrica da Graciosa

Toda a instalação esta dimensionada para um regime de funcionamento em contínuo, e para condições adversas de operação.

- Edifício principal, constituído por uma sala de máquinas para 6 grupos geradores a *diesel*, respectivamente 3 de 600 kW e 3 de 810 kW, uma zona de gabinetes, instalações sanitárias e salas de quadros eléctricos de comando e distribuição, e uma oficina mecânica de suporte à operação;
- Parque de transformadores de potência, com 8 transformadores, respectivamente 6 de elevação dos grupos, e 2 de alimentação dos auxiliares;
- Edifício da subestação de 15 kV, com as celas de chegada dos grupos, e as celas de saída de linhas de distribuição e serviços auxiliares;

- Edifício da central de incêndio, considerando 1 cisterna em betão, com a capacidade de 200 m³, 1 motor *diesel* de bombagem e uma rede de distribuição de água;
- Parque de Combustíveis, com 2 tanques de *diesel* de 75 m³, 1 tanque de óleo de lubrificação de 1+1 m³, e equipamento auxiliar de trasfega e bombagem para os grupos geradores;
- Zona de tratamento de efluentes líquidos (efluentes domésticos e efluentes oleosos);

Os motores *diesel* são refrigerados a água, em circuito fechado não originando efluentes líquidos, através de um sistema de condicionamento químico.



Figura 2.2 - Grupo Termoeléctrico n.º5



Figura 2.3 - Sistema de armazenagem de combustível

Aspectos ambientais

Relativamente à emissão de efluentes líquidos, central foi instalada com um sistema de recolha, separação e tratamento de resíduos oleosos e domésticos.

De forma a minimizar o ambiente acústico, foram incluídas diversas soluções de insonorização e minimização de ruído, com respeito pelos limites legais.

A tabela 2.1 descreve as características dos grupos *diesel* instalados nesta central

Tabela 2.1 – Caracterização do sistema electroprodutor da CTGRA.

	Grupos 1 e 2	Grupo 3	Grupos 4,5 e 6
Motor <i>diesel</i>	Caterpillar 3512 STD	Caterpillar 3508B	Caterpillar 3512B TA
Nº Cilindros	12 cilindros	8 cilindros	12 cilindros
Velocidade	1000 rpm	1000 rpm	1000 rpm
Potência mecânica	600kW	600kW	810kW
Alternador	Caterpillar SR4	Caterpillar SR4	KATO CO65-6651
Potência	750kVA	750kVA	1100kVA
Excitação	Excitatriz s/escovas	Excitatriz s/escovas	Excitatriz s/escovas
Refrigeração	ONAN	ONAN	ONAN
Transformador elevador	Siemens	EFACEC	Siemens
Potência	1 MVA	1 MVA	1,25 MVA
Arrefecimento	ONAN	ONAN	ONAN
Relação de Transformação	0,4/15 kV	0,4/15 kV	6/15 kV
Grupo ligação	Dyn5	Dyn9	Dyn5
Transformador S. Auxiliares		EFACEC	
Potência		2 X 630kVA	
Arrefecimento		ONAN	
Relação de Transformação		0,4/15 kV	
Grupo ligação		Dyn5	
Equipamento 6kV	n.a	n.a.	Siemens
Equipamento 15kV	Siemens	Siemens	Siemens
Radiadores atmosféricos	Integrados no motor <i>diesel</i>	Integrados no motor <i>diesel</i>	Integrados no motor <i>diesel</i>
Controlo e instrumentação		Siemens	

Sistema de controlo da central termoelétrica

A Central Termoelétrica da Graciosa está automatizada para divisão de cargas “load sharing” da potência activa e reactiva igualmente com arranques e colocação paralelo com a rede através de um sistema próprio.

É utilizado um sistema da SELCO para divisão de cargas entre grupos térmicos, paralelo com a rede e um sistema de comando e controlo com recurso a autómatos da SIEMENS para visualização das grandezas eléctricas e supervisão de toda a central. Os grupos térmicos, transformadores e Linhas estão protegidos através de relés de protecção da SIEMENS.

2.1.1 Operação e controlo da Central Termoelétrica da Graciosa antes da instalação do sistema PowerStore

Neste parágrafo pretende-se descrever o modo e o sistema de controlo da central termoelétrica antes da instalação do volante de inércia.

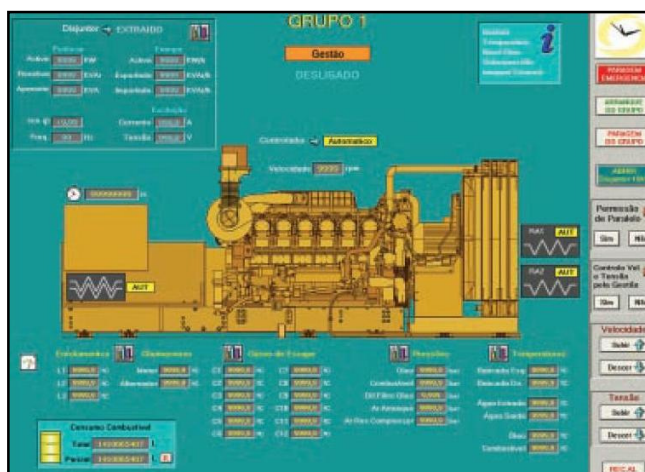


Figura 2.4 - Sinóptico do sistema de comando e controlo SCADA

2.1.1.1 Grupos térmicos a diesel

A central termoelétrica possui seis grupos térmicos elevada de velocidade (1000 rpm). Antes da instalação do volante de inércia esta possuía cinco grupos sendo dois novos (Grupo

n.º 4 e Grupo n.º 5) e três provenientes da antiga Central Termoeléctrica da Barra, Ilha Graciosa. (Grupo n.º 1, Grupo n.º 2 e Grupo n.º 3).

Todos os grupos térmicos podem ser operados num dos três modos abaixo descritos.

Controlo manual

- Arranque e paragens de grupos pelo operador
- Sincronização e paralelo com a rede de grupos pelo operador
- Ajuste pelo operador da velocidade do grupo para controlo da potência activa produzida (kW “*load sharing*”) e ajuste da tensão para controlo da potência reactiva (AVR “*load sharing*”).
- Sem sistema de correcção de sincronismo horário.

Controlo automático SELCO

- Ajuste da velocidade do grupo para controlo da potência activa produzida (kW “*load sharing*”) e ajuste da tensão para controlo da potência reactiva (AVR “*load sharing*”) automático pelo SELCO com comunicação via *CAN bus*.
- SELCO Seguimento do diagrama de cargas - Ligado
 - SELCO envia ordem de arranque e paralelo de grupo disponível se a carga dos grupos atinge 75% por um minuto ou dois.
 - SELCO envia ordem de saída de paralelo e paragem de grupo se a carga desce abaixo dos 60%.
 - Grupos prioritários definidos pelo SELCO
- SELCO Seguimento do diagrama de cargas - Desligado
 - Sem ordens automáticas de arranque/paragens de grupos.
- É efectuado o controlo e sincronismo horário.

Controlo por Sistema de Comando e Controlo (SCADA)

- Ajuste da velocidade do grupo para controlo da potência activa produzida (kW “*load sharing*”) e ajuste da tensão para controlo da potência reactiva (AVR “*load sharing*”) automático pelo SELCO com comunicação via *CAN bus*.
- Arranque de grupos efectuados pelo ecrã do SCADA, através de selecção no botão próprio pela via da acção do operador.
- Sincronização e paralelo de grupos efectuados pelo ecrã do SCADA, através de selecção no botão próprio pela via da acção do operador.
- Retirada de carga e paragens de grupos efectuados pelo ecrã do SCADA, através de selecção no botão próprio pela via da acção do operador.
- É efectuado o controlo e sincronismo horário.
- Não pode ser activado o sistema SELCO de seguimento do diagrama de cargas.

O arranque, sincronização e colocação em paralelo dos grupos térmicos é efectuado muito rapidamente, sendo na ordem dos 20 a 30 segundos.

As protecções de sobrecarga dos grupos geradores estão definidas para cargas 130% da potência nominal do grupo durante 40min.

2.1.1.2 Controlo da Central Termoeléctrica da Graciosa

Não possível a central arrancar automaticamente pois não está instalado um sistema de “black start”. A central é operada por técnicos 24 horas por dia em regime de turnos, 7 dias por semana.

2.1.1.3 Controlo de Frequência

Todos os grupos térmicos operam em regime de “droop mode” com 3,6% de *droop* (50.9Hz sem carga 49.1Hz carga máxima). A frequência é mantida para os 50Hz pelo sistema de “Master Time Clock”.

2.1.1.4 Controlo de Tensão

O controlo de tensão é efectuado pelos reguladores de tensão AVR. A potência reactiva é controlada pelo SELCO em modo automático e pelo sistema SCADA.

2.1.1.5 Deslastre de cargas

As saídas de linha da central possuem relés multifunções SIEMENS com função de deslastre de cargas por subfrequência. Esta pode ser activada ou desactivada à distância através da sala de comando. Aproximadamente ocorre um disparo por mês de subfrequência.

Os parâmetros de subfrequência das linhas são os seguintes:

- Linha da Praia: 48.5 Hz com 1s de temporização
- Linha da Guadalupe: 47.5 Hz com 1.5 s de temporização
- Linha da Pronicol: 47.5 Hz com 1.5 s de temporização
- Linha da Santa Cruz: função desactivada

2.1.1.6 Horário de Funcionamento dos grupos térmicos

O sistema implementado é de repartição das horas de funcionamento por todos os grupos de modo que no final do ano tenham mais ou menos as mesmas horas de funcionamento. Este controlo é efectuado pelo operador ou poder ser efectuado programado pelo sistema da SELCO.

2.1.1.7 Sistema de sincronismo horário “Master Time Clock”

A central possui um sistema de sincronismo horário. A frequência é acertada para os 50Hz com uma banda de não actuação de +/- 0.2 Hz.

2.1.2 Operação e controlo da Central Termoeléctrica da Graciosa após a instalação do sistema *PowerStore*

Em 2006 foi instalado o volante de inércia POWERSTORE do fabricante Australiano POWERCORP de 500kVA

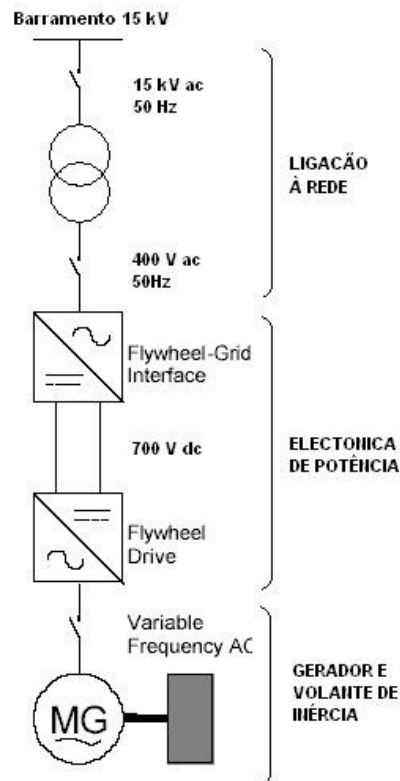


Figura 2.5 - Esquema unifilar do volante de inércia *PowerStore*

2.1.2.1 Operação com o volante de inércia *POWERSTORE*

Controlo de frequência

O controlo de frequência é executado para minimizar o impacto desta medida eléctrica na rede eléctrica quando esta sofre alterações rápidas e significativas.

O controlo de frequência é independente do modo de operação dos grupos térmicos o volante de inércia somente supervisiona e actua em caso de necessidade na frequência rede. O sistema de controlo segue a frequência média da rede para determinação de um ponto de referência, esta pode mudar instantaneamente devido a um ajuste do sistema de sincronismo horário numa rede de geração eléctrica isócrona ou devido a ajustes de carga num sistema constituído por geradores em modo de funcionamento em “droop”.



Figura 2.6 - Aspecto exterior, volante de inércia *PowerStore*

Através da frequência média é calculado um valor máximo superior e mínimo inferior de não actuação, “*dead band*”. Quando os valores de frequência encontram-se fora dessa banda de não actuação o volante de inércia actua carregando ou descarregando de e para a rede eléctrica.

Nível de carga

O nível de carga do volante de inércia é controlado através de um algoritmo paralelo ao do controlo de frequência. O nível de carga é pré definido a um determinado ponto para que o volante de inércia tenha capacidade de responder às solicitações da rede eléctrica onde está inserido. Após carga ou descarga elevada, devido algum evento ao nível da frequência da rede eléctrica, o restabelecimento do nível de carga predefinido é efectuado gradualmente dentro de um limite de uma rampa de potência.

2.1.2.2 Controlo de velocidade dos grupos a *diesel*

Todos os grupos térmicos matem-se em operação em regime de “*droop mode*” sem alteração dos parâmetros pré definidos.

2.1.2.3 Divisão de cargas dos grupos a *diesel* “*load sharing*”

Modo manual

No caso de ser seleccionado pelo operador o modo manual a divisão de cargas automática entre grupos será desactivada.

O volante de inércia ira operar conforme referido anteriormente 2.1.2.1 a frequência será controlada através deste.

O ajuste da frequência (correção do tempo) para os 50Hz será efectuado pelo operador manualmente no caso da carga da central aumentar ou diminuir, incluindo as mudanças de débito de potência originadas pelo parque eólico.

Modo automático

Em modo automático a frequência é corrigida pelo sistema de sincronismo horário (MTC).

O volante de inércia seguirá a frequência média imposta pelo sistema de sincronismo horário sem necessidade de haver ligação com este sistema.

Modo de sistema de comando e controlo, SCADA

O modo SCADA funciona como modo automático somente com a diferença no arranque e paragem dos grupos térmicos. No modo SCADA o arranque e paragem dos grupos são efectuados através do computador instalado na sala de comando e no modo automático é efectuado através do sistema SELCO.



Figura 2.7 - Aspecto interior, volante de inércia *PowerStore*

2.1.2.4 Controlo de arranque/paragem dos grupos térmicos

Se a central estiver a funcionar em modo automático o volante de inércia POWERSTORE envia ordens de paragem e arranque aos grupos térmicos conforme a avaliação deste sobre a reserva girante existente na rede eléctrica incluindo o volante de inércia. Existe na sala de comando um selector de modo que o operador possa seleccionar o modo de operação desejado (SELCO AUTOMÁTICO / POWERSTORE AUTOMÁTICO).

O arranque dos grupos térmicos procede-se da seguinte forma:

1. Envio de ordem digital de arranque na entrada do sistema SELCO.
2. Grupo térmico arranca.
3. Grupo térmico sincroniza.
4. Grupo térmico entra em paralelo com a rede através do fecho do disjuntor.
5. Grupo térmico assegura quota-parte da carga existente nas outras máquinas.

A paragem dos grupos térmicos procede-se da seguinte forma:

1. Envio de ordem digital de liberação de carga na entrada do sistema SELCO.
2. Grupo térmico inicia o abaixamento de carga.
3. Grupo térmico atinge 5% da sua potência nominal.

4. Envio de ordem digital de paragem na entrada do sistema SELCO.
5. Abertura do disjuntor de paralelo do grupo térmico.
6. Grupo térmico inicia o arrefecimento por 5 minutos
7. Grupo térmico desliga-se.

Durante o abaixamento de carga e arrefecimento do grupo térmico este fica indisponível para entrar em paralelo.

Em caso de abaixamento de produção do parque eólico devido a uma falha deste, diminuição da velocidade do vento ou falha na linha MT torna-se necessário que os grupos térmicos tenham capacidade de arranque e colocação em paralelo rápida com a rede. Neste caso o volante de inércia através do seu sistema de controlo e monitorização dos grupos térmicos, “*Generator Control and Monitoring System*” (GCMS) instalado em cada um dos quadros dos grupos detectam uma descida da reserva girante disponível através da descida de nível de carga do volante de inércia e do incremento da potência debitada pelos grupos em paralelo. O GCMS verifica qual é o próximo grupo disponível consoante as prioridades predefinidas e o colocará em paralelo para aumentar a reserva girante e consequentemente a capacidade do sistema lidar com a nova situação.

O sistema foi concebido para que o volante de inércia em conjunto com um grupo térmico de promover a estabilidade à rede em caso de falha total do parque eólico.

A potência nominal do volante de inércia instalado é de 350kW para aproximadamente 40 segundos. Por exemplo um grupo térmico de 810kW a funcionar com cargas de 40% da sua potência nominal. O sistema terá uma reserva girante de 480kW do grupo térmico somando 350kW do volante de inércia com um total de 830kW. A potência instalada no parque eólico é de 800kW.

Uma perda total da produção do parque eólico pode ser assumida se houver somente um grupo térmico em paralelo em conjunto com o volante de inércia enquanto não entrar outro grupo térmico via ordem SELCO (aproximadamente 20s). O sistema pode operar com um grupo em paralelo com uma carga de aproximadamente 1150kW.

2.1.2.5 Controlo dos aerogeradores do parque eólico

A potência gerada pelos aerogeradores é monitorizada e controlada pelo volante de inércia em simultâneo com a carga dos grupos térmicos. O débito dos aerogeradores *ENERCON* E-30 é controlado de forma que os grupos térmicos não atinjam um valor de carga mínima pré definida.

Os aerogeradores *Nordtank* NTK100 só são controlados ao nível de potência gerada e não é efectuado qualquer comando limitação de potência ou de arranque/paragem/*reset*. Sendo

estes três últimos comandos efectuados pelo operador na sala de comando da central termoelétrica através do *Nordtank* SCADA.

2.1.2.6 Sistema de comando e controlo do volante de inércia

O Sistema de comando e controlo encontra-se instalado na sala de comando da Central Termoelétrica da Graciosa para que o operador de serviço possa efectuar ordens sobre o sistema e consultar algumas medidas eléctricas.

As funções disponíveis são as seguintes:

1. Arranque e paragem do volante de inércia
2. Aceitação de alarmes do sistema
3. Arranque e paragem dos aerogeradores *ENERCON*
4. Recolha de informação eléctrica

2.1.2.7 Sistema de sincronismo horário MTC

O Sistema de sincronismo horário MTC manteve-se inalterado efectuando a sua função como mencionado no ponto 2.1.1.8

Não foram efectuadas ligações eléctricas e ou de comunicação entre este sistema e o volante de inércia *PowerStore*.

2.2. Parque Eólico da Ilha Graciosa

O Parque Eólico da Serra Branca na Ilha Graciosa foi construído no ano de 1992, tendo sido na altura instalados dois aerogeradores de 100kW da marca *Nordtank*. Essa fase inicial de exploração permitiu obter participações na estrutura de produção da ilha muito interessantes com valores superiores a 10% anuais, mas que foram sendo depreciados com o crescimento dos consumos anuais.

Em 2002, com a introdução de dois novos aerogeradores de 300kW, *Enercon* E-30 integrados na 1ª fase do plano de desenvolvimento de energia eólica dos Açores, procurou-se incrementar novamente a contribuição de energia eólica para o sistema, aproveitando um recurso existente em abundância e qualidade bem como uma localização privilegiada como é a Serra Branca.



A instalação dos aerogeradores foi precedida de obras de construção civil e da instalação de equipamentos eléctricos de ligação e transformação na Subestação de interligação à rede eléctrica. Com este último investimento passou-se a obter contribuições anuais com valores superiores as 17% de produção de energia eléctrica na Ilha Graciosa, sendo este um dos valores mais elevados de contribuição eólica no arquipélago dos Açores.

Figura 2.8 - Aerogerador n.º3 PE Serra Branca

A tabela 2.2 descreve as características dos aerogeradores do parque eólico

Tabela 2.2 – Caracterização dos aerogeradores do Parque Eólico da Serra Branca

Aerogerador n.º	Tipo	Fabricante	Modelo	Potência	
1	Velocidade fixa - Gerador assíncrono	<i>NORDTANK</i>	NTK 100	100 kW	
2	Velocidade fixa - Gerador assíncrono	<i>NORDTANK</i>	NTK 100	100 kW	
3	Velocidade variável c/inversor	<i>ENERCON</i>	E-30	300 kW	
4	Velocidade variável c/inversor	<i>ENERCON</i>	E-30	300 kW	



Figura 2.9 - Parque Eólico da Serra Branca, Ilha Graciosa

2.2.1. Características dos aerogeradores

ENERCON E-30 / 3.30 / E2

Os aerogeradores *ENERCON E-30 / 3.30 / E2* são máquinas constituídas por um rotor de três pás, controlo de passo activo e funcionamento com velocidade variável, tendo uma produção nominal de energia de até 300 kW. Tem um rotor com um diâmetro de 30 m, uma torre cuja altura é de 44 m.

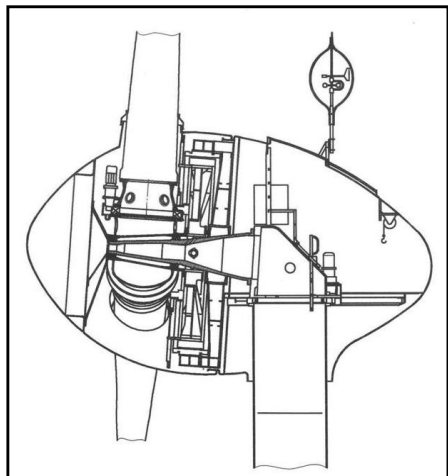


Figura 2.10 - Carlinga do aerogerador *ENERON E-30*

O componente rotativo do gerador de anel e o rotor constituem uma peça única. O componente rotativo do gerador está flangeado directamente ao cubo do rotor, rodando, assim, à mesma baixa velocidade que este. Como não existem engrenagens, nem peças que rodem a alta velocidade, as perdas de energia entre o rotor e o gerador, o nível de ruído produzido, o consumo de óleos lubrificantes e o desgaste mecânico são consideravelmente reduzidos.

A energia produzida pelo aerogerador é transportada, por meio do sistema de circuitos de ligação até à rede de distribuição pública. O sistema de circuitos de ligação à rede integra uma unidade rectificadora/inversora. Isto permite que o rotor do E-30 funcione com velocidades variáveis. O rotor roda devagar quando a velocidade do vento é baixa e a velocidade mais alta quando a velocidade do vento é mais elevada. Isto permite ao ar fluir com maior eficiência aerodinâmica em torno das pás do rotor. A velocidade variável permite ainda a redução das cargas dinâmicas impostas por rajadas de vento.

O sistema de ligação à rede pode adaptar-se aos principais parâmetros característicos da corrente da rede, como a tensão e a frequência.

Cada uma das três pás do rotor está equipada com um sistema eléctrico individual de controlo do ângulo de ataque (passo variável). O sistema de controlo do passo permite controlar a velocidade de rotação do rotor e a energia extraída do vento. Isto permite que a

energia debitada pelo E-30 seja limitada com precisão ao seu valor nominal, mesmo durante curtos períodos de tempo. Quando as pás são rodadas para a posição "em bandeira" o rotor pode ser imobilizado através da posterior aplicação de um freio mecânico, sem que isso implique a transferência de esforços mecânicos ao sistema de transmissão. O sistema de passo variável permite ainda o aumento da energia produzida, dentro da gama de cargas parciais.

A tabela 2.3 descreve as características dos aerogeradores *Enercon* do Parque Eólico da Serra Branca.

Tabela 2.3 – Características dos aerogeradores *Enercon* E-30

Aerogeradores *ENERCON* E-30

Características Gerais

Entrada em serviço - 2002
Potência total instalada (MW) - 0,6

Aerogeradores

Número de aerogeradores - 2
Potência unitária (kW) - 300
Diâmetro do rotor da turbina (m) - 30
Altura ao centro do rotor (m) - 44,22
Velocidade mínima do vento de exploração (m/s) - 2
Velocidade mínima do vento para potência nominal (m/s) - 12,3
Velocidade máxima do vento de exploração (m/s) - 28-34
Velocidade de rotação nominal da turbina (r.p.m.) - 18 a 46
Gerador Síncrono



Figura 2.11 - Aerogerador n.1 e aerogerador n.4 em segundo plano

NORDTANK NTK100/25

Os aerogeradores *Nordtank* NTK100/25 têm uma potência nominal de 100kW e um diâmetro de rotor 24,6 metros. A torre possui 25 metros de altura sendo constituída por chapas de aço soldadas em forma de um cubo cónico.

O rotor é constituído por um cubo em ferro fundido com três pás. As pás têm um afastamento fixo, na montagem cada ângulo é ajustado de acordo as características do parque eólico.

A regulação de potência é efectuada pela regulação “*stall*” sendo um fenómeno aerodinâmico que ocorre gradualmente nas pás quando a velocidade ao vento excede 13-14 m/s. Não havendo controlo predefinido de potência a debitar pelo aerogerador este segue a sua curva de potência conforme a velocidade do vento.



As pás são feitas em fibra de vidro. Os 1,4 m finais são constituídos por um pá giratória sendo um freio aerodinâmico para ser actuado em caso de necessidade de paragem do aerogerador.

Figura 2.12 - Aerogerador n.2, *Nordtank* NTK100/25

O interior da carlinga é constituído essencialmente pelo alternador assíncrono, caixa de velocidades, sistema de lubrificação, sistema de freio a disco e sistema de orientação.

O controlador dos aerogeradores está colocado na base interior da torre em armário próprio ao lado do armário de electrónica de potência e sistemas de protecção da máquina.

A tabela 2.4 descreve as características dos aerogeradores *Nordtank* do Parque Eólico da Serra Branca.

Tabela 2.4 – Características dos aerogeradores *Nordtank* NTK100/25**Aerogeradores *NORDTANK* NTK100****Características Gerais**

Entrada em serviço - 1992

Potência total instalada (MW) - 0,2

Aerogeradores

Número de aerogeradores - 2

Potência unitária (kW) - 100

Diâmetro do rotor da turbina (m) - 24,6

Altura ao centro do rotor (m) - 25

Velocidade mínima do vento de exploração (m/s) - 4

Velocidade mínima do vento para potência nominal (m/s) - 14

Velocidade máxima do vento de exploração (m/s) - 24

Velocidade de rotação nominal da turbina (r.p.m.) - 38

Gerador - Assíncrono 400V

Velocidade de rotação nominal do gerador (r.p.m.) - 1500

2.2.2. Controlo do Parque Eólico da Serra Branca

O parque eólico é constituído conforme referido anteriormente por dois aerogeradores Enercon E-30 e dois aerogeradores Nordtank NTK100. Os aerogeradores E-30 são controlados e limitados em potência via SCADA Enercon e ou pelo autómato do volante de inércia. Os aerogeradores NTK100 só permitem o arranque/paragem e “resets “ via SCADA Nordtank. Ambos os sistemas de comando e controlo estão instalados na sala de comando da central termoelétrica.

2.3 Caracterização da rede de distribuição MT

A rede de distribuição MT da Ilha Graciosa, com origem na Central Termoelétrica da Graciosa é explorada com o nível de tensão de 15kV e tem uma extensão aproximada de 57km abastecendo 53 Postos de Transformação com uma potência instalada de cerca de 7 MVA.

A tabela 2.5 descreve e caracteriza as saídas da subestação da Central Térmica da Graciosa

Tabela 2.5 – Caracterização das saídas e cargas de Linha CTGRA

Saída n.º	Nome	Tipo	Carga Típica
1	Linha da Praia	15kV Média Tensão c/relé protecção	300-750 kW ¹
2	Linha de Guadalupe ²	15kV Média Tensão c/relé protecção	450 kW
3	Linha de Santa Cruz	15kV Média Tensão c/relé protecção	500 kW
4	Linha de Pronicol ³	15kV Média Tensão c/relé protecção	200 kW

¹ A Linha da Praia alimenta em conjunto com outros consumidores e uma instalação industrial tipo pedreira, a carga nesta linha pode variar entre 300kW e os 750kW durante as horas do expediente incluindo sábados. Não existem picos de carga após arranque e funcionamento da instalação.

² O Parque Eólico está ligado à Linha de Guadalupe igualmente com outros consumidores. Na maioria das vezes a carga dos consumidores é superior à produção dos aerogeradores, podendo ocorrer dias em que isso não se verifica.

³ A Linha da Pronicol alimenta somente uma instalação industrial de fabrico de lacticínios, a carga nesta linha é mais elevada durante o dia e menor à noite.

A tabela 2.6 refere-se a um diagrama de cargas típico da Ilha Graciosa.

Tabela 2.6 – Caracterização do diagrama de cargas no ano 2009, Ilha Graciosa

Descrição	Valor
Ponta	2,337 KW
Vazio	1024 KW
Carga típica diária da central termoeléctrica	1200kW - 1900 kW
Potência máxima de produção do parque eólico	840 kW
Percentagem anual de produção parque eólico	18%

Capítulo 3

Volantes de Inércia

3.1 Tecnologia

Os volantes de inércia também designados por *flywheel* na literatura anglo-saxónica, são constituídos na generalidade por um cilindro de elevada massa que armazena energia, através da sua energia cinética, acoplado a um motor/gerador e com o auxílio de electrónica de potência possam acumular e ou fornecer energia eléctrica aproveitando a conversão, em, ou, de rotação.

O volante de Inércia é colocado dentro de um sistema de vácuo e suspenso por chumaceiras electromagnéticas de forma a operar com perdas reduzidas por fricção, aumentando a duração do equipamento e reduzindo as manutenções sendo estes uns dos pontos críticos destes tipo de equipamentos. A Figura 3.1 ilustra um esquema desta tecnologia.

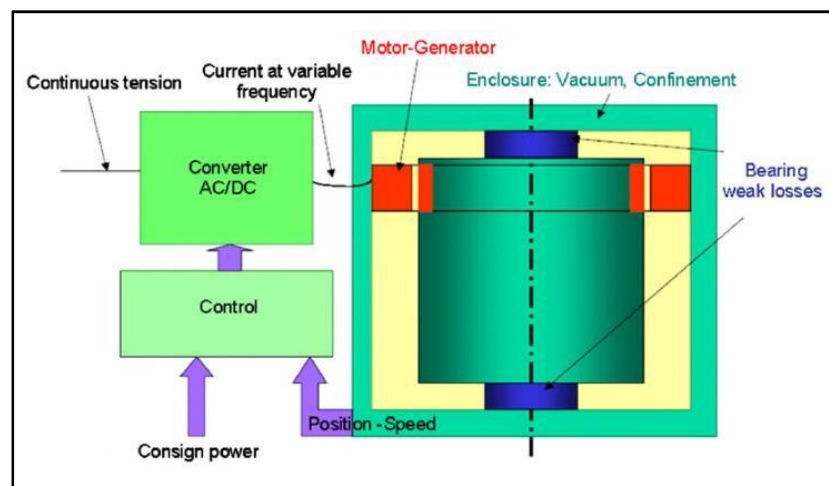


Figura 3.1 - Ilustração de um volante de inércia [3]

As principais características dos volantes de inércia são as seguintes [4]:

- Elevada densidade de potência;
- Elevada densidade de energia;
- O estado da carga pode facilmente ser medido, desde que se saiba a velocidade de rotação;
- Manutenção reduzida;
- Recarrega em pouco tempo;
- Utilização de materiais com baixo impacto ambiental;
- Duração do tempo de vida do equipamento independente dos ciclos de descarga e carga;

A quantidade de energia cinética armazenada pela massa em rotação do equipamento vai depender da inércia e da velocidade da massa em rotação. Esta energia é transferida do volante de inércia para a rede eléctrica ou é absorvida através do aumento da rotação e ganho de energia cinética da massa através de uma máquina eléctrica que funciona como motor ou gerador, recorrendo ao auxílio de sistemas de electrónica de potência rectificadores/inversores e controladores.

Como a energia armazenada é proporcional ao quadrado da sua velocidade de rotação e linearmente proporcional à massa como é mostrado na expressão (3.1), fazendo que estes sistemas rodem a elevadas velocidades.

$$E_c = (1/2).I.\omega^2 \quad (3.1)$$

Onde:

E_c - A energia cinética armazenada

I - O momento de inércia

ω - A velocidade angular

O momento de inércia de qualquer objecto é dependente da sua forma e massa. Para o volante de inércia, a forma dominante é um cilindro sólido, sendo o momento de inércia dado pela expressão (3.2).

$$I = (1/2).r^2.m = (1/2).r^4.\pi.a.\rho \quad (3.2)$$

Onde:

r - O Raio do cilindro

a - O comprimento do cilindro

m - A massa do cilindro

ρ - Densidade do material do cilindro

3.2 Fabricantes de volantes de inércia

Efectuou-se uma pesquisa de mercado de forma a conhecer algumas das principais ofertas de volantes de inércia com aplicação possível a redes isoladas, com grande volume de produção variável. As soluções encontradas estão a seguir descritas, estando ordenadas por ordem alfabética.

3.2.1. *Beaconpower*

[5] *Beacon Power Corporation* foi fundada em 1997, para desenvolver tecnologias avançadas de armazenamento baseadas em volantes de energia. Tendo numa primeira fase instalado na América do Norte volantes de inércia de primeira e de segunda geração para aplicações de telecomunicações e energia.

O fabricante apresenta o seu produto com a denominação de **Smart Energy 25 Flywheel** já é uma volante de inércia de quarta geração, desenhado para estar de acordo com os padrões de exigência actuais. Têm como características principais, período de vida longo, baixa manutenção, elevada rotação (carga e descarga). Varias unidades, deste tipo, podem ser colocadas em paralelo, **Smart Energy Matrix**, até perfazer uma potência de alguns MW de forma a mater a fiabilidade e estabilidade de uma rede eléctrica.

O rotor de alta performance montado numa câmara de vácuo roda entre as 8.000 e as 16.000 r.p.m. Às 16.000 r.p.m. o equipamento consegue armazenar e fornecer 25kWh de energia útil.

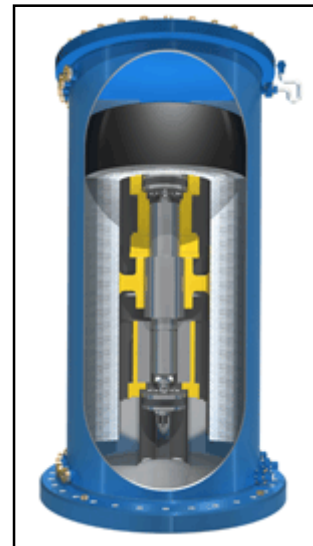


Figura 3.2 - Volante de inércia *Smart Energy 25 Flywheel* [5]

O volante de inércia **Smart Energy 25** possui, segundo o fabricante:

- **Elevada capacidade de rotação e durabilidade:** Este produto está desenhado efectuar milhares de cargas e descargas ao longo de 20 anos de período de vida útil, sendo um equipamento muito útil para controlo de frequência.
- **Compatibilidade com redes inteligentes:** O *Smart Energy 25* ou *Smart Energy Matrix* (central eléctrica) podem ser monitorizados e operados á distância e fazer parte de um projecto de redes inteligentes, *Smart grids*.
- **Período de vida útil de 20 anos:** Os volantes de inércia *Smart Energy 25* são concebidos para um período de vida útil de 20 anos e sem manutenção

- **Ambientalmente sustentável:** O equipamento não é fabricado com materiais perigosos, não emite quaisquer emissões de CO₂ e não consome quaisquer combustíveis, não havendo quaisquer riscos de contaminação dos solos.

Este equipamento pode ser aplicado para a regulação de frequência bem como nas mais diversas aplicações:

- *Cloud Mitigation for Solar PV*
- *Ramp Mitigation for Wind*
- *Wind/Diesel/Flywheel Hybrid*
- *Stabilization of Distributed Generation (DG) Systems*
- *Peak Power Support*
- *Frequency Response Reserve (FRR)*
- *Voltage Support for Rail Systems*
- *Uninterruptible Power Supply (UPS)*
- *Angular Instability Control*
- *Reactive Power Support (VAR support)*

A central ou *Smart Energy Matrix* reutiliza o excesso de energia da rede armazenando-a e fornecendo quando a carga aumenta ou a produção principal diminui. Baseada na associação em paralelo de diversos volantes de inércia até perfazer uma potência de 20MW.

Especificações:

- Potência de saída: 20MW durante 15 minutos
- Intervalo de operação: 40MW (injecta/consume 20MW)
- Energia nominal: 5MWh @ 20MW
- Tempo de resposta: <4 segundos
- Tensão de serviço: 480VAC, 3~, 50/60Hz
- Tempo de vida útil: 20 Anos
- Área de implantação: 3,5 hectares



Figura 3.3 - *Smart Energy Matrix* [5]

3.2.2. Enercon

[6] Foi no ano de 1984, com a fundação da empresa, que o Engenheiro Aloys Wobben deu início à história da empresa *ENERCON*. O desenvolvimento e o fabrico do primeiro aerogerador sem caixa de velocidades em todo o mundo, no ano de 1991, foram determinantes para o

sucesso desta empresa. Aproveitando este conhecimento a empresa desenvolveu paralelamente aos aerogeradores outros produtos, tais como os volantes de inércia entre outros.

No ano 2000 a *ENERCON* decidiu-se pelo desenvolvimento dos volantes de inércia para aplicar na compensação de oscilações da energia eólica.

Segundo o fabricante este equipamento possui as seguintes características:

- Custos baixos
- Reduzida manutenção
- Design robusto
- Longa duração
- Utilização de peças de construção e materiais tipo padrão.
- Possibilidade flexibilidade de aplicação (construção por módulos em contentor)
- Capacidade nominal de 200 kW
- Capacidade do acumulador de energia de 5 kWh
- Elevado grau de actuação/baixos prejuízos
- Resposta rápida
- Comportamento óptimo na rede

O fabricante igualmente salienta que o volante de inércia *ENERCON*, consegue efectuar 10.000 horas de serviço sem manutenção. Igualmente é garantido um serviço de abastecimento de acessórios, por um longo período. As peças com desgaste podem ser substituídas rapidamente e sem dificuldades.

A *ENERCON* afirma que com aplicação da tecnologia do inversor electrónico padrão do fabricante neste equipamento é garantida a utilização de peças de reserva dos aerogeradores da mesma marca.

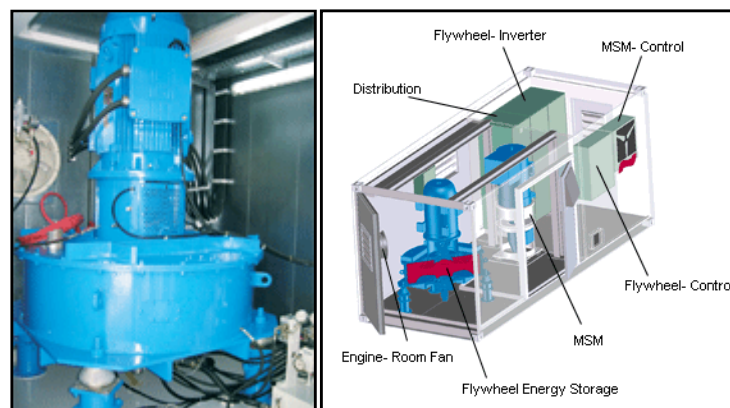


Figura 3.4 - Ilustração do sistema volante de inércia *ENERCON* [6]

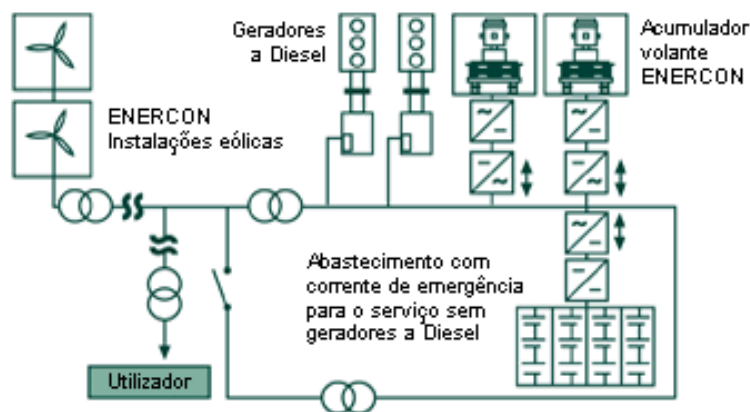


Figura 3.5 - Sistema *Stand Alone System* [6]

A *ENERCON* possui uma solução para redes isoladas, *Stand Alone System*, em que consiste numa solução toda integrada entre aerogeradores, volante de inércia e grupos *diesel*. Esta solução está instalada na Utsira/Noruega.

Componentes principais [6]:

- **Parque eólico:** Fonte principal de produção de energia eléctrica
- **Volante de inércia:** Acumulador por um período de alguns segundos para a compensação de oscilações na energia eólica. Regulação da frequência da rede isolada.
- **Banco de baterias:** Abastecimento de energia de emergência para (serviço sem geradores *diesel*) para o abastecimento de energia por minutos. Regulação da frequência em casos de emergência
- **Máquina síncrona principal:** Utilizada quando os geradores a *diesel* não estão em funcionamento para regulação da tensão. Abastecimento de potência reactiva. Abastecimento de corrente curto-circuito. Filtro de *Flicker*.
- **Distribuição:** Gestão da energia na rede. Tratamento dos dados e visualização do processo
- **Geradores *diesel*:** Arranque do sistema. Abastecimento da energia quando há pouco vento.

O fornecedor indica como principais vantagens [6]:

- Aerogerador é a fonte principal de energia, é possível o abastecimento de energia eólica até 100% (serviço sem geradores a *diesel*, sem emissões CO₂). Não são necessárias “*dump loads*”.
- Abastecimento de energia garantido e contínuo. Todos os casos de emergência são fornecidos pelas baterias.
- Elevada qualidade de fornecimento de energia através dos inversores *ENERCON*.
- Elevada precisão, longa duração, manutenção simples e rápida disponibilidade de acessórios pela aplicação de peças tipo padrão robustas e testadas
- Combinação ideal de acumuladores mecânicos e químicos. A aplicação de diversos tipos de baterias é efectuada de acordo com o respectivo objectivo de utilização. Isto garante uma longa duração.
- Sistema de comando e controlo completamente automático.
- Transporte simples e aumento do sistema sem problemas sendo somente necessária a colocação em paralelo de mais módulos.
- Instalação rápida no local. Devido aos ensaios prévios em fábrica dos componentes antes do fornecimento.
- Todos os componentes do mesmo fornecedor (aerogerador, volante de inércia, comando etc.)

3.2.3. PowerCorp

[7] A *Powercorp* foi fundada em 1988 em Darwin, Austrália para automatizar centrais a *diesel* no Norte da Austrália. Este programa abrangeu diversas comunidades de trabalho tendo-se estendido a Austrália e internacionalmente.

A empresa desenvolveu diversas tecnologias baseadas em electrónica de potência, nomeadamente inversores e volantes de inércia de forma a solucionar e melhorar as penetrações de energia renovável na rede.

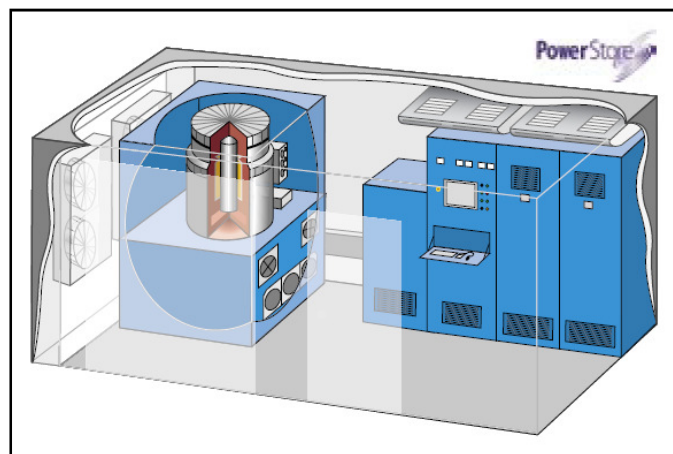


Figura 3.6 - Volante de inércia *PowerStore* da *Powercorp* [6]

As principais características apresentadas pelo fabricante são as seguintes:

- Controlo de Frequência pela absorção e injeção de potência activa.
- Controlo de Tensão pela absorção e injeção de potência reactiva.
- Controlo de cargas transitórias.
- Dinâmica elevada -> resposta em milissegundos.
- Configuração modular (sem limite de equipamentos ligados em paralelo).
- Energia produzida com nível muito baixo de harmónicos.
- Sistema com muita facilidade de mudança de localização.

O fabricante possui diversos modelos de volantes de inércia que vão desde 500kVA a 1000kVA como se pode observar na figura 3.6

PowerStore Model	Power Rating (kVA)	Total Energy Storage (MJ)
PowerStore 500	500	16.5
PowerStore 750	750	16.5
PowerStore 1000	1000	16.5

ELECTRICAL FEATURES

Charge and Discharge Duration Available (estim.):

150 kW.....	100 s
250 kW.....	60 s
500 kW.....	30 s
750kW.....	19 s
1000 kW.....	15 s

Response time from 0kW to full power rating (charge/discharge): 5msec

Figura 3.7 - Modelos disponíveis pela *Powercorp* [6]

O volante de inércia estabiliza a rede com impulsos muito rápidos de absorção ou injeção de potência, alternativamente, conforme as variações de potência originadas pela flutuação do vento.

O volante de inércia pode estar ligado aos sistemas de controlo dos Parques Eólicos e das centrais térmicas monitorizando a tensão e a frequência da rede eléctrica para compreender como tem que actuar, sendo possível auxiliar os operadores na gestão do sistema eléctrico;

- Arranque/paragem de grupos térmicos.
- Controlo da potência gerada pelos aerogeradores.
- Indicação da reversa girante.

A unidade POWERSTORE 500 gira com uma velocidade de 3.600 RPM num ambiente pressurizado de hélio para reduzir o atrito por fricção.

A unidade tem uma chumaceira electromagnética que suporta o peso do volante de 3.000 kg durante a operação, assegurando assim que o equipamento seja mais durável. Originando assim poucas perdas por atrito e uma baixa manutenção.

O software controla todo sistema de conversão de potência baseado em módulos IGBT. Sendo o “*Flywheel drive*” e o “*Flywheel Grid interface*” constituídos por estes e outros equipamentos de electrónica de potência.

O Volante de inércia foi concebido para operar sem necessidade de supervisão.

O Sistema de comando e controlo (SCADA) monitoriza e controla o volante de inércia efectuando o controlo da rede eléctrica.

O SCADA providencia o acesso remoto ao equipamento bem como todos os dados são armazenados na base de dados.

Os dados são gravados em dois níveis; alta resolução (100 milissegundos) e baixa resolução (10 minutos). Armazenando na base de dados diversos tipos de informação tais como; Potência do volante de inércia; Nível de energia; Voltagem e corrente da rede eléctrica; Temperaturas dos equipamentos; Alarmes e estados de operação; Indicação da próxima manutenção.

O equipamento tem manutenção reduzida sendo somente necessária uma inspecção de serviço preventiva anual. A unidade tem um lubrificador automático instalado que só necessita de ser atestado a cada 5 anos. O hélio é substituído tipicamente após três anos. Não havendo mais nenhum item que exija a manutenção regular.

Estes tipos de equipamentos estão instalados com muitos bons resultados em diversas redes isoladas em todo o mundo. Nos Açores existem dois equipamentos do tipo POWERSTORE 500 em exploração, na Ilha Graciosa e Ilha das Flores.

No caso da ilha das Flores é expectável um incremento de 300.000 kWh/ano produzidos por via eólica pelo que poderemos quantificar os seguintes benefícios anuais:

- Consumo evitado de 17.200 litros de *diesel* e de 234 litros de óleos lubrificantes;
- Redução de cerca de 46 toneladas/ano de emissões de CO₂ para a atmosfera.

Capítulo 4

Análise das condições de operação

4.1. Introdução

Neste capítulo é efectuada uma análise do histórico da exploração do Parque Eólico da Serra Branca e da Central Térmica da Graciosa com e sem volante de inércia em funcionamento. Para tal foram seleccionados alguns dias das bases de dados da Empresa de Electricidade dos Açores em que se verificou uma grande variação de velocidade de vento e penetração de energia eólica em situações em que o volante de inércia esteve em funcionamento e em outros tal não ocorreu. O volante de inércia foi comissionado e colocado em funcionamento em 2006, efectuando somente paragens para uma manutenção periódica anual e em caso de alguma eventual avaria.

Conforme já referido no segundo capítulo só os aerogeradores *ENERON E-30* têm capacidade de receber “setpoints” de controlo de potência activa e reactiva, logo os operadores de despacho em caso de necessidade de diminuir a penetração de energia eólica, para efeitos de estabilização do sistema, podem parametrizar valores de potências máximas atingir pelo conjunto dos dois aerogeradores ou individualmente e ou esta parametrização poderá ser feita automaticamente tendo em conta os limites mínimos técnicos dos grupos em paralelo e estabilização do sistema via autómato de controlo do volante de inércia, como referido anteriormente. Em alternativa de último recurso, na eventualidade de uma situação extrema e não habitual na exploração normal do sistema eléctrico os operadores de despacho podem efectuar a paragem de um ou mais aerogeradores *Nordtank NTK100/25* mas dando sempre preferência à limitação em potência dos aerogeradores com capacidade para tal. Esta é uma melhor opção, pois a produção eólica estará distribuída por mais aerogeradores em funcionamento, havendo uma melhor garantia de menor perturbação em caso de paragem por avaria de algum equipamento.

4.2. Procedências de informação

Toda informação utilizada neste capítulo que serviu de base para elaboração das respectivas tabelas, e consequentemente análise, foi retirada das diversas bases de dados disponíveis da Empresa de Electricidade dos Açores e da empresa do grupo, Empresa de Electricidade e Gaz, Lda.

Os históricos diários armazenados destas empresas são registados com um grau de amostragem suficiente para utilização estatística e para alguns tipos de estudo mas um pouco reduzido para uma análise dinâmica e detalhada do sistema. No entanto para a análise que se pretende neste capítulo são suficientes para efectuar o trabalho com consistência.

A informação disponível nas diversas bases de dados com os respectivos tempos de amostragem, são as seguintes:

- Velocidades de vento e potências dos aerogeradores *ENERON E-30* -> Intervalos de **10 minutos**.
- Frequência do sistema eléctrico -> Intervalos de **≈ 1 segundo e de ≈ 3 minutos**.
- Potência absorvida e injectada pelo volante de inércia -> Intervalos de **≈ 1 segundo e de ≈ 3 minutos**.
- Produções e consumos de combustível. -> Contadores específicos para o efeito

4.3. Condições de Operação

Na tabela 4.1 observa-se os dias de maior penetração de energia eólica registados na rede eléctrica da Ilha Graciosa do ano 2004 a 2009. Os valores referem-se à produção de energia eólica relativamente à produção de energia da central térmica. A verde encontra-se o dia de maior percentagem e a vermelho a menor penetração dos referidos anos.

Tabela 4.1 – Valores máximos percentuais de penetração eólica

Data	Penetração de energia eólica
06-04-2004	53,30%
11-03-2005	46,30%
10-04-2006	47,30%
22-01-2007	49,30%
16-11-2008	39,10%
21-11-2009	35,80%

A tabela 4.2 elabora um resumo das produções e consumos dos anos 2005 a 2009 da Central Térmica da Graciosa, Parque Eólico da Serra Branca e volante de inércia, onde CE é o consumo específico (litros/kWh).

Tabela 4.2 – Produções e consumos dos anos 2005 a 2009

Ano	Central Térmica da Graciosa			Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
	Produção (MWh)	Consumo <i>diesel</i> Litros	CE(L/KWh)	Produção (MWh)	Auxiliares (MWh)	Produção (MWh)	Consumo (MWh)	Auxiliares (MWh)
2005	9.911,67	2.580.956,00	0,26040	1.675,68	6,29	0,00	0,00	0,00
2006	10.468,44	2.776.536,00	0,26523	1.886,79	4,53	1,84	90,12	40,15
2007	11.238,00	2.941.999,00	0,26179	1.851,72	3,50	1,32	95,97	47,67
2008	12.434,16	3.148.230,00	0,25319	1.422,24	3,96	0,93	99,28	49,51
2009	12.205,56	3.168.391,10	0,25959	1.560,33	2,68	1,17	98,45	47,42

Pode-se constatar que no ano de maior produção eólica 2006 o volante de inércia foi mais solicitado havendo uma maior contribuição de energia activa deste. Pelo contrário no ano 2008 de menor produção de origem eólica existe uma menor contribuição do volante de inércia.

Igualmente pode-se verificar que nesses mesmos anos o consumo específico dos grupos *diesel* é o maior no ano de 2006 e o menor no ano 2008, podendo-se complementar que uma maior penetração de origem eólica mesmo com o auxílio do volante de inércia irá originar um ligeiro incremento de consumo específico de combustível.

Neste caso houve um incremento de 4,75% relativamente aos anos em questão. A partir de 2007 já se encontrava instalado o novo Grupo VI com valores de consumos específicos inferiores à média dos grupos não influenciando os valores negativamente conforme se observa na tabela 4.3, pois os grupos trabalham em regime de rotatividade semanal.

De notar que com regimes de velocidades de vento muito variáveis os consumos específicos de combustível dos grupos *diesel* são maiores devido à mudança de constante de regime de funcionamento das máquinas.

A tabela 4.3 descreve os consumos específicos de combustível dos grupos *diesel* da Central Térmica da Graciosa nos anos 2005 a 2009

Tabela 4.3 – Consumos específicos de combustível dos anos 2005 a 2009

	Consumo específico da CTGRA (litros/kWh)				
	2005	2006	2007	2008	2009
Grupo I	0,26499	0,28233	0,28270	0,28227	0,28410
Grupo II	0,27762	0,27712	0,27626	0,27894	0,28138
Grupo III	0,26287	0,25643	0,26287	0,24872	0,26218
Grupo IV	0,25659	0,26709	0,25549	0,24668	0,24573
Grupo V	0,25350	0,25131	0,25159	0,22976	0,24808
Grupo VI	-	-	-	0,25863	0,25979
Média	0,26311	0,26686	0,26578	0,25750	0,26354

Na tabela 4.4 pode observar-se a produção total de electricidade na Ilha Graciosa, contemplando todos os centros produtores. Existe um crescimento anual até 2008 entre 5% e 6 % havendo um decrescimento ligeiro de 0,66% em 2009 relação ao ano anterior.

Tabela 4.4 – Produção total da Ilha Graciosa dos anos 2005 a 2009

Ano	Produção total Ilha (MWh)	Evolução
2005	11.587,35	
2006	12.357,07	6,23%
2007	13.091,04	5,61%
2008	13.857,33	5,53%
2009	13.767,06	-0,66%

Observando as tabelas 4.2 e 4.4 denota-se uma ligeira perda de eficiência da central pois comparando os anos 2008 e 2009, houve uma menor produção no ano 2009, cerca de -0,66%, e um maior consumo de combustível, cerca de 20.000 litros. No entanto a produção eólica subiu aproximadamente 8,85%. Observa-se também que com esta maior produção no ano 2009 houve uma maior solicitação do volante de inércia, havendo uma maior produção anual deste equipamento. Pode-se afirmar que redes isoladas com elevada penetração de eólica, quanto maior for o factor eólico menor é a eficiência das máquinas *diesel*, no entanto sistemas como volante de inércia poderão melhorar a performance das máquinas *diesel*.

A tabela 4.5 reflecte as produções e consumos do volante de inércia *POWERSTORE 500* nos anos de 2006 a 2009.

Tabela 4.5 – Produção e consumos do volante de inércia

Ano	Volante de Inércia					
	Produção (MWh)	Consumo (MWh)	Auxiliares (MWh)	Consumo (kW)	Auxiliares (kW)	Total (kW)
2006	1,84	90,12	40,15	10,29	4,58	14,87
2007	1,32	95,97	47,67	10,96	5,44	16,40
2008	0,93	99,28	49,51	11,33	5,65	16,99
2009	1,17	98,45	47,42	11,24	5,41	16,65

Efectuando-se o cálculo do consumo (kW) do volante de inércia, verifica-se que este tem um consumo inferior ao especificado pelo fabricante. O fabricante indica como valor mínimo de 12kW e máximo de 15kW. Se contabilizarmos os sistemas auxiliares (iluminação, ar condicionados etc.) em conjunto com o consumo do volante de inércia dos últimos cinco anos iremos obter um valor médio de consumo total de 16,23kW.

Dos dias seleccionados não existe informação de potências e velocidades de vento referente aos aerogeradores *Nordtank* NTK100/25, paralelamente não há indicação de paragens efectuadas, pelos operadores, estando os equipamentos em pleno funcionamento.

Não sendo possível parametrizar pelo centro de despacho o limite máximo de produção instantânea dos aerogeradores *Nordtank*, a análise poder-se-á reflectir somente nos aerogeradores *ENERON E-30* onde é possível parametrizar e limitar potências. Igualmente existe informação intervalar de 10 minutos de velocidades de vento e produções instantânea. De referir que os dois aerogeradores *ENERON E-30* (AG n.º3 e AG n.º4) representam 75% da capacidade instalada no Parque Eólico da Graciosa.

4.3.1 Sem o volante de inércia em funcionamento

No ano de 2005 o volante de inércia ainda não estava instalado. Seleccionou-se então um dia em que se verificou ter havido uma grande penetração de energia eólica. Procedeu-se depois à análise da performance do sistema, considerando o volume de energia primária disponível. Segundo a tabela 4.1 o dia de maior penetração eólica do ano 2005 foi a 11 de Março, com um valor de 46,30%.

Pela amostragem da base de dados (intervalos 10 minutos) elaboram-se os gráficos das figuras 4.1 e 4.2 com as produções efectivas e as expectáveis, considerando as velocidades de vento verificadas e a curva de potências os aerogeradores da tabela 5.3. Verifica-se através da curva de produção efectiva das figuras que os operadores de despacho reduziram a produção do parque eólico, pois esta possui valores inferiores à curva de produção disponível.

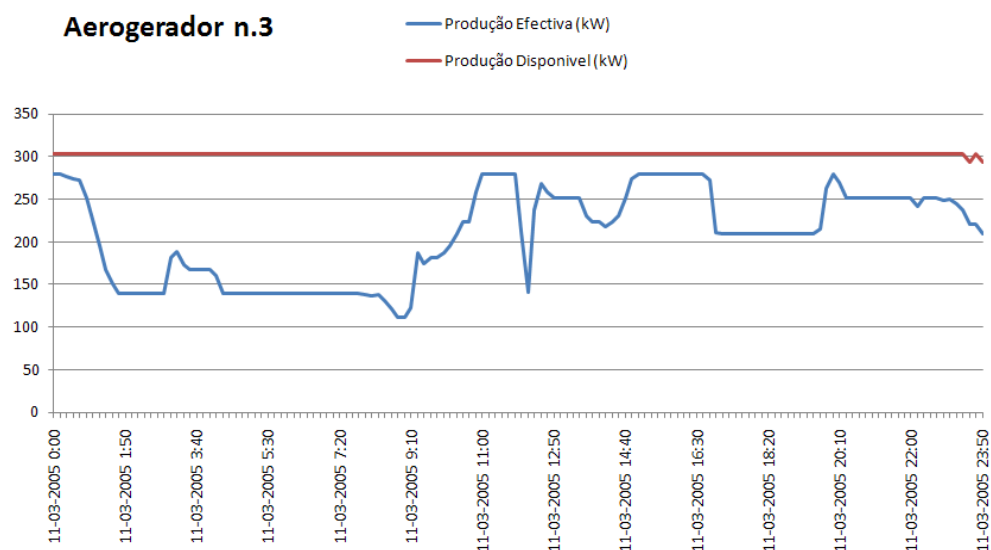


Figura 4.1 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3

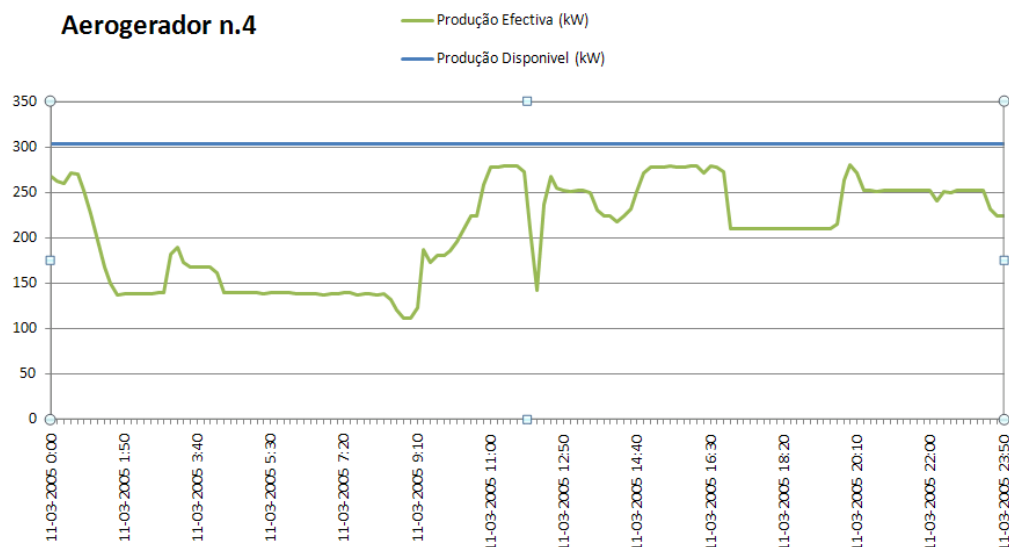


Figura 4.2 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4

Pode-se observar nas figuras 4.1 e 4.2 que os aerogeradores encontram-se extremamente limitados provavelmente devido a contingências e dificuldades da exploração do sistema eléctrico, o período de maior limitação ocorreu nas horas de vazio daquele dia nomeadamente entre a 1h50 e as 8h00 como é de expectável devido às incertezas, dos operadores, acerca da previsão das velocidades do vento e dos limites mínimos técnicos dos grupos *diesel*. Segundo as figuras referidas o vento manteve-se praticamente constante para a potência nominal, necessariamente existe um erro associado visto ser uma base de dados com intervalos de 10 minutos e baseada em velocidades médias mas que oferece alguma segurança tendo em conta os valores médios obtidos em todas as figuras ilustradas deste capítulo.

Na tabela 4.6 observa-se o cálculo da energia efectiva registada e a expectável considerando as condições meteorológicas.

Tabela 4.6 – Mapa resumo do dia 11 Março de 2005

Aerogeradores <i>ENERCON E-30</i> (AG3 e AG4)		
	kWh	Quantificação
Produção total (kWh)	9.994,00	68,73%
Produção expectável (kWh)	14.540,67	100,00%
Produção Eólica Total Perdida (kWh)	4.546,67	31,27%

Verifica-se que a limitação imposta pelos operadores de despacho aos aerogeradores, devido aos problemas causados pela elevada penetração de energia eólica, nomeadamente frequência da rede e limites técnicos mínimos dos motores *diesel* que somente 68,73% da energia eólica disponível foi aproveitada.

4.3.2 Com o volante de inércia em funcionamento

A partir do ano de 2006 o volante de inércia já se encontrava em funcionamento, como tal, e devido existir mais informação disponível na EDA, SA e EEG, LDA, seleccionaram-se três dias em que se verificou uma grande penetração de energia eólica de forma que fosse igualmente possível a análise da performance do sistema comparativamente com as velocidades de vento verificadas. Segundo a tabela 4.1 os dias de maior penetração eólica seleccionados a partir de 2006 foram:

- 10 de Março de 2006, com um valor de 47,30%.
- 22 de Janeiro de 2007, com um valor de 49,30%.
- 16 de Novembro de 2008, com um valor de 39,10%.

Analizando as bases de dados do dia 10 de Março de 2006 referentes aos aerogeradores *ENERCON E-30* efectuou-se os gráficos ilustrados nas figuras 4.3 e 4.4.

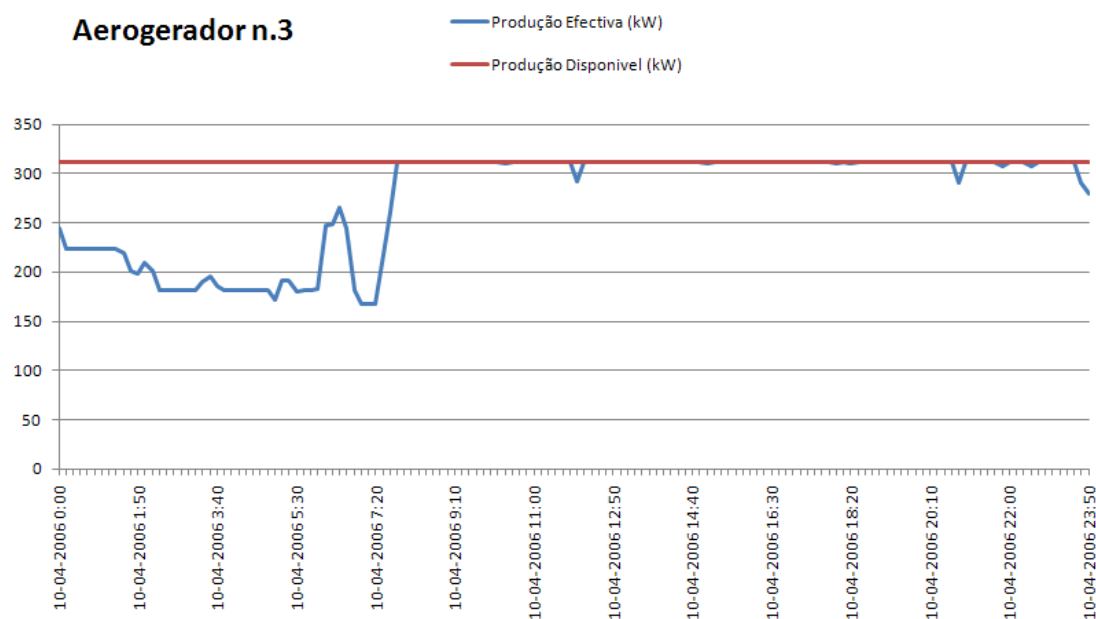


Figura 4.3 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3

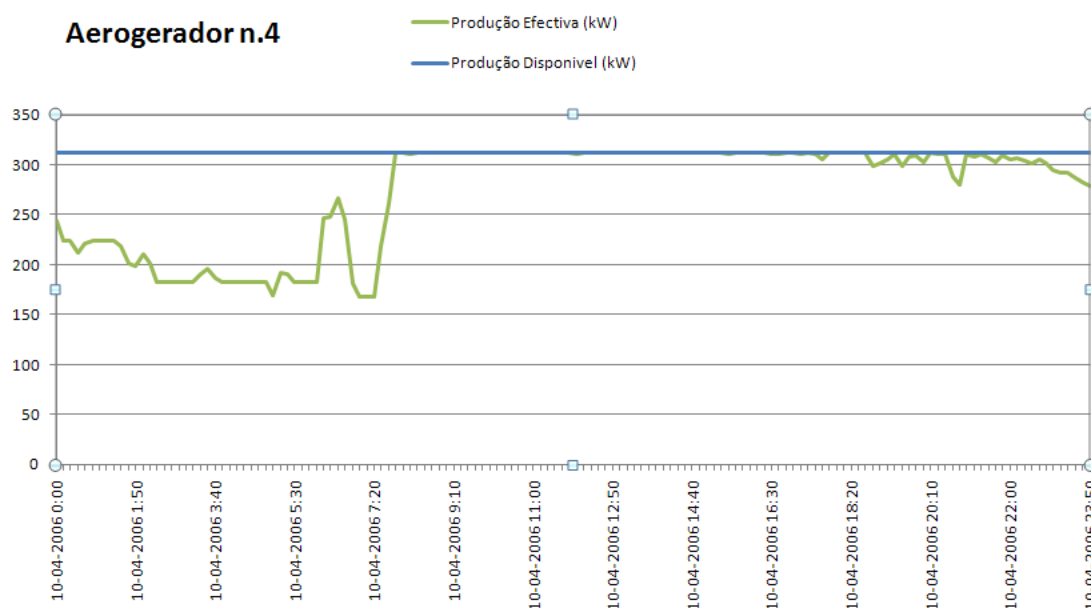


Figura 4.4 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4

Pode-se observar nas figuras 4.5 e 4.6 que os aerogeradores encontram-se praticamente limitados na hora de vazio e pontualmente em alguns momentos, o período de maior limitação foi entre as 00h00 e as 7h30. Este facto deve-se provavelmente às contingências e dificuldades da exploração do sistema eléctrico no controlo da frequência da rede e limites técnicos mínimos dos motores *diesel*. Segundo as figuras referidas o vento manteve-se praticamente constante para a potência nominal.

Na tabela 4.7 observa-se o cálculo da energia efectiva registada e a expectável considerando as condições meteorológicas.

Tabela 4.7 – Mapa resumo do dia 10 de Março de 2006

Aerogeradores ENERCON (AG3 e AG4)		
	kWh	Quantificação
Produção total (kWh)	15649,67	89,08%
Produção expectável (kWh)	17567,86	100,00%
Produção Eólica Total Perdida (kWh)	1918,19	10,92%

Verifica-se que a limitação imposta pelo automático do volante de inércia e ou pelos operadores de despacho aos aerogeradores, devido aos problemas causados pela elevada penetração de energia eólica que 89,08% da energia eólica disponível foi aproveitada, sendo já um valor muito apreciável.

Analisando as bases de dados do dia 22 de Janeiro de 2007 referentes aos aerogeradores efectuou-se os gráficos ilustrados nas figuras 4.5 e 4.6

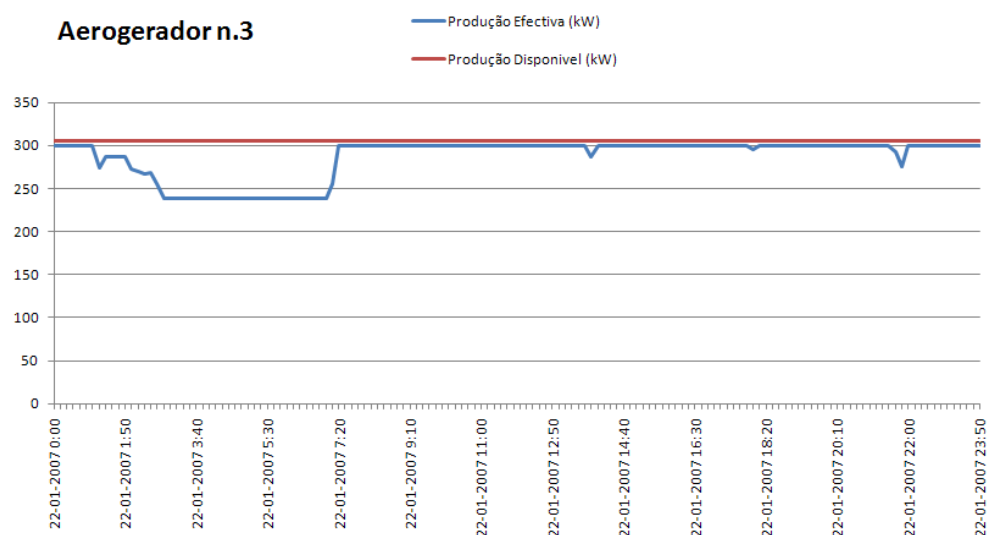


Figura 4.5 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3

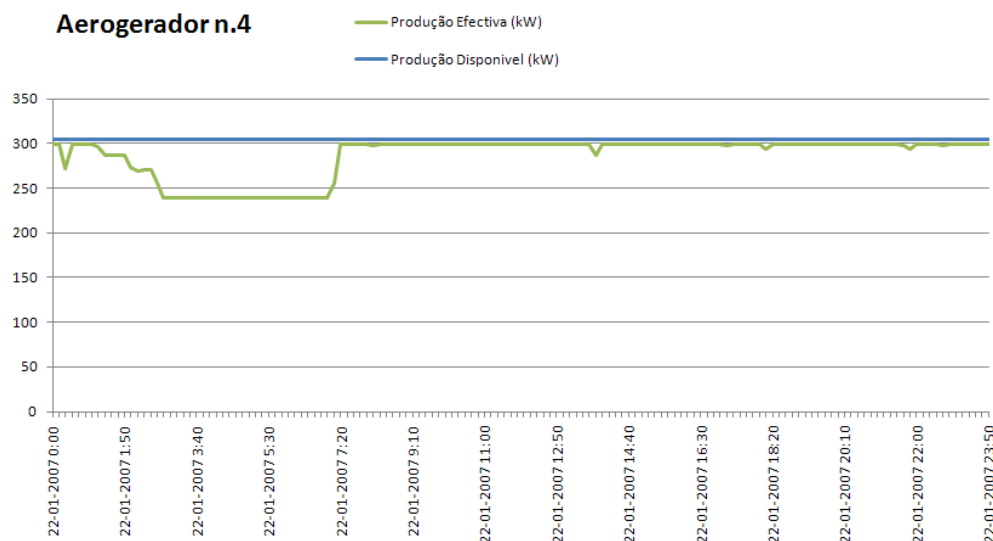


Figura 4.6 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4

Pode-se observar nas figuras 4.3 e 4.4 que os aerogeradores encontram-se igualmente limitados na hora de vazio e pontualmente em alguns outros momentos, sendo o período de maior limitação entre as 3h00 e as 7h30. Este facto deve-se provavelmente às contingências e

dificuldades da exploração do sistema eléctrico. Segundo as figuras referidas o vento manteve-se praticamente constante para a potência nominal.

Na tabela 4.8 observa-se o cálculo da energia efectiva registada e a expectável considerando as condições meteorológicas.

Tabela 4.8 – Mapa resumo do dia 22 de Janeiro de 2007

Aerogeradores ENERCON (AG3 e AG4)		
	kWh	Quantificação
Produção total (kWh)	13728,17	93,77%
Produção expectável (kWh)	14640,00	100,00%
Produção Eólica Total Perdida (kWh)	911,83	6,23%

Verifica-se que a limitação imposta pelo autómato do volante de inércia e ou pelos operadores de despacho aos aerogeradores, devido aos limites técnicos mínimos dos motores *diesel* e controlo de frequência que 93,77% da energia eólica disponível foi aproveitada, sendo o melhor valor encontrado nos dias seleccionados.

Por ultimo, através das bases de dados do dia 11 de Novembro de 2008 referentes aos aerogeradores efectuou-se os gráficos ilustrados nas figuras 4.7 e 4.8

Na tabela 4.9 observa-se o cálculo da produção efectiva registada e a expectável, neste dia, considerando as condições meteorológicas.

Tabela 4.9 – Mapa resumo do dia 16 de Novembro de 2008

Aerogeradores ENERCON (AG3 e AG4)		
	kWh	Quantificação
Produção total (kWh)	13105,83	88,44%
Produção expectável (kWh)	14819,33	100,00%
Produção Eólica Total Perdida (kWh)	1713,50	11,56%

Verifica-se que a limitação imposta pelo autómato do volante de inércia e ou pelos operadores de despacho aos aerogeradores, devido aos limites técnicos dos equipamentos instalados na central que 88,44% da energia eólica disponível foi aproveitada, sendo igualmente um valor muito notável.

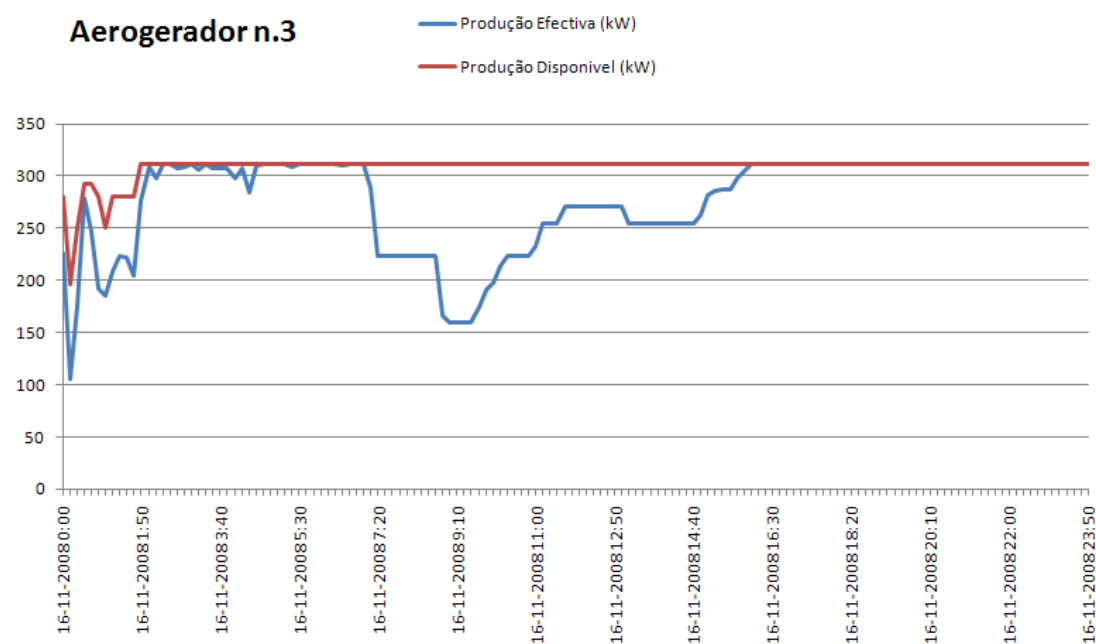


Figura 4.7 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º3

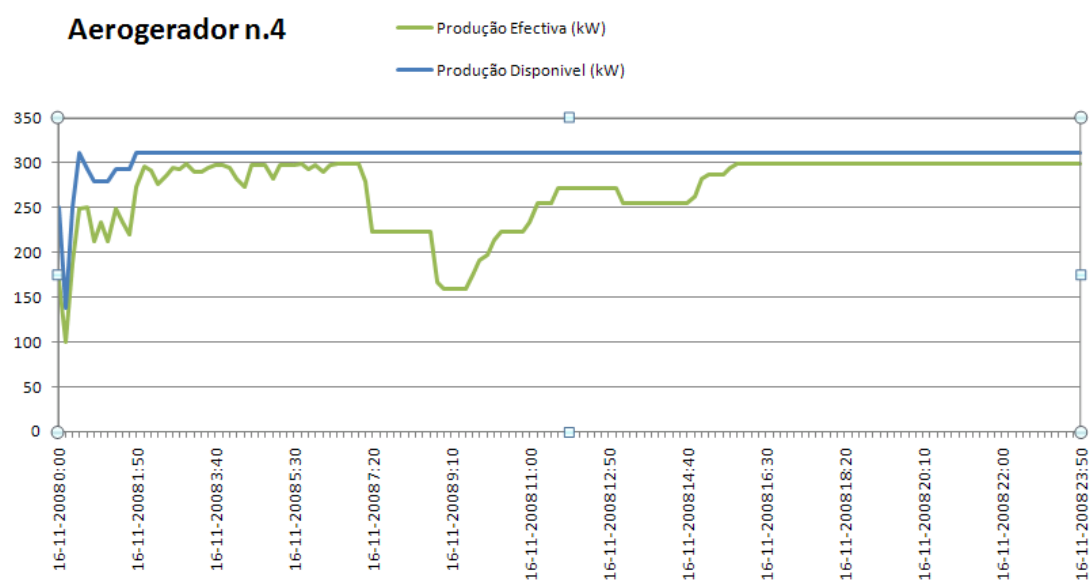


Figura 4.8 - Produção efectiva/expectável do aerogerador n.º4

Pode-se observar nas figuras 4.7 e 4.8 que os aerogeradores tiveram alguma limitação. Dia 16 Novembro foi um domingo este dia da semana normalmente, a Ilha Graciosa, possui diversos períodos de vazio durante as 24 horas. O período de maior limitação foi das 7h20 às 12h00. Nesse intervalo e nos seguintes até às 16h30 como os aerogeradores estão a ter um comportamento muito linear e abaixo do valor nominal, indica que estes foram limitados pelos operadores de despacho, pois os aerogeradores não estão a ter um comportamento dinâmico adequado à situação do momento ao contrário como se observa no período das 0h00 às 7h20 em que a variação não é tão estática indicando que estão a ser controlados pelo automático do volante de inércia.

O período de maior oscilação da velocidade do vento como se pode observar nas figuras é o das 0h00 às 2h00, a partir daí o vento manteve-se praticamente constante para a potência nominal

Como tal devido à existência de informação mais pormenorizada desse dia, intervalos de 1 segundo a 3 minutos, e de forma que se possa verificar a relação da frequência do sistema eléctrico com a potência absorvida e injectada do volante de inércia. Elaborou-se as figuras 4.9 a 4.13 para os períodos mais significativos, realçando o intervalo das 0h00 às 2h00.

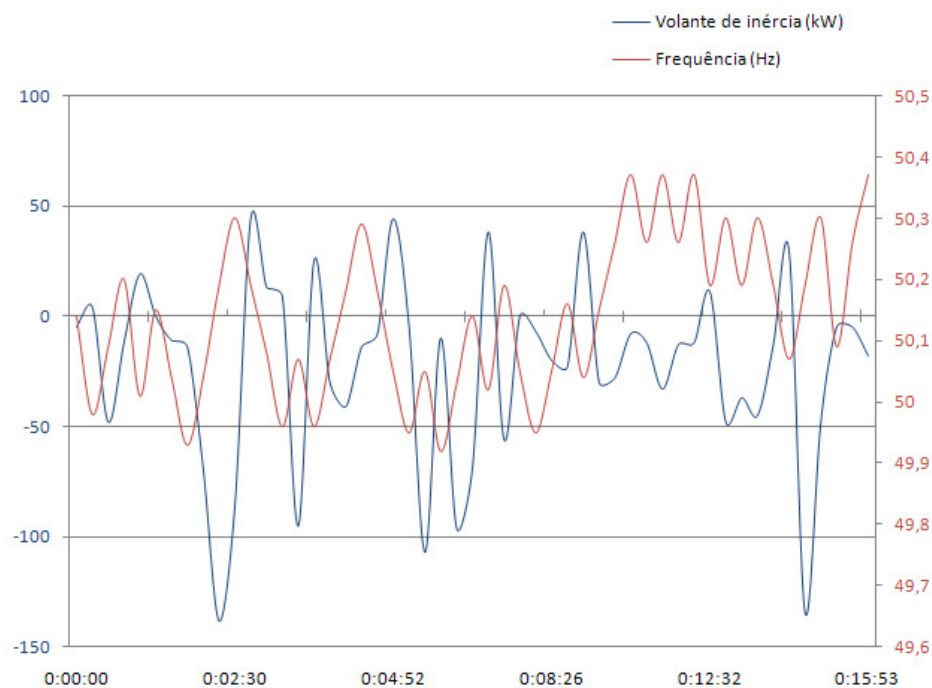


Figura 4.9 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h00 às 0h15

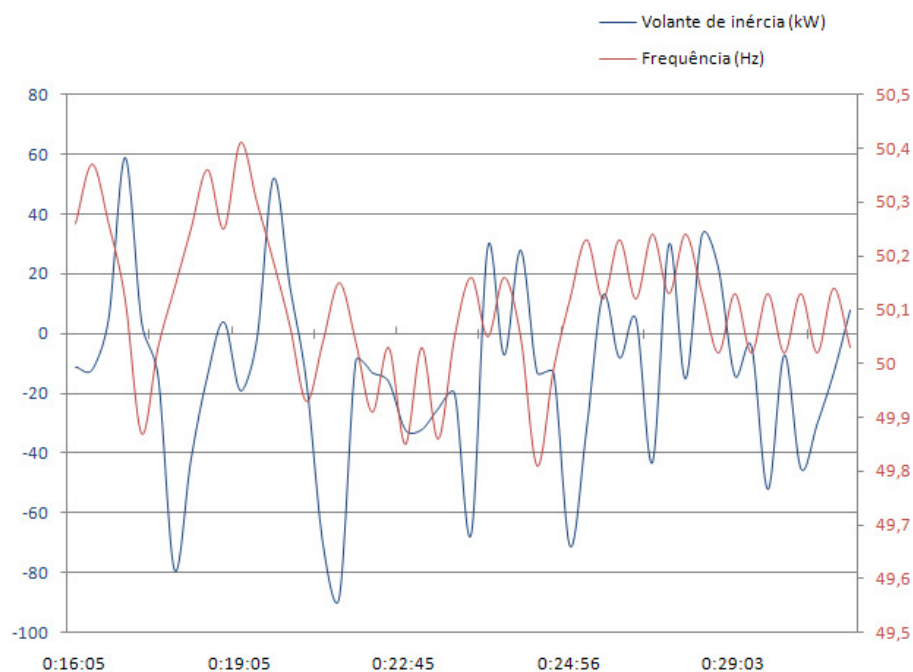


Figura 4.10 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h15 às 0h30

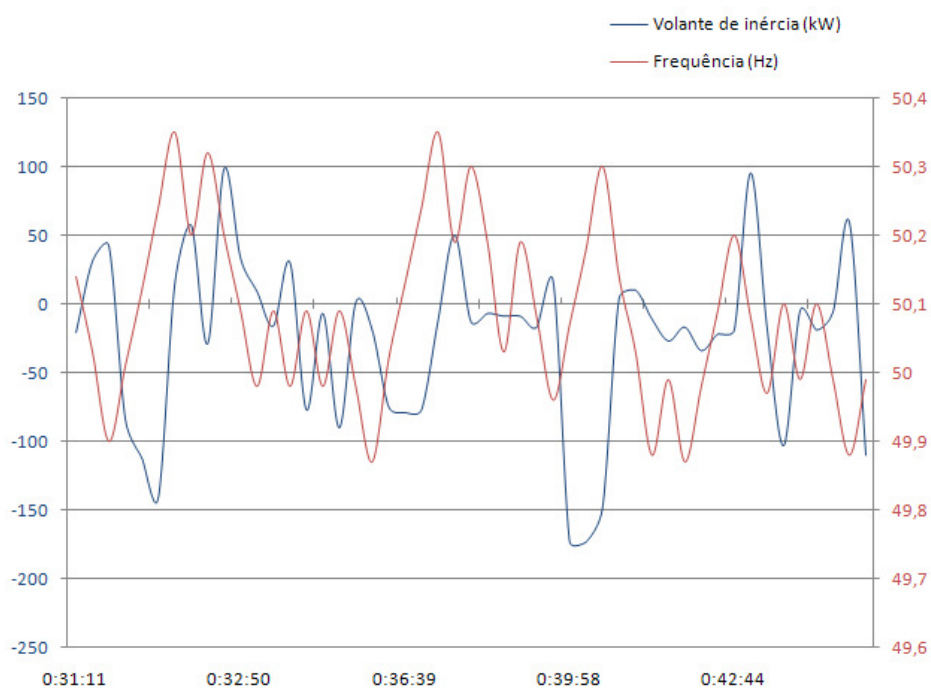


Figura 4.11 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h30 às 0h45

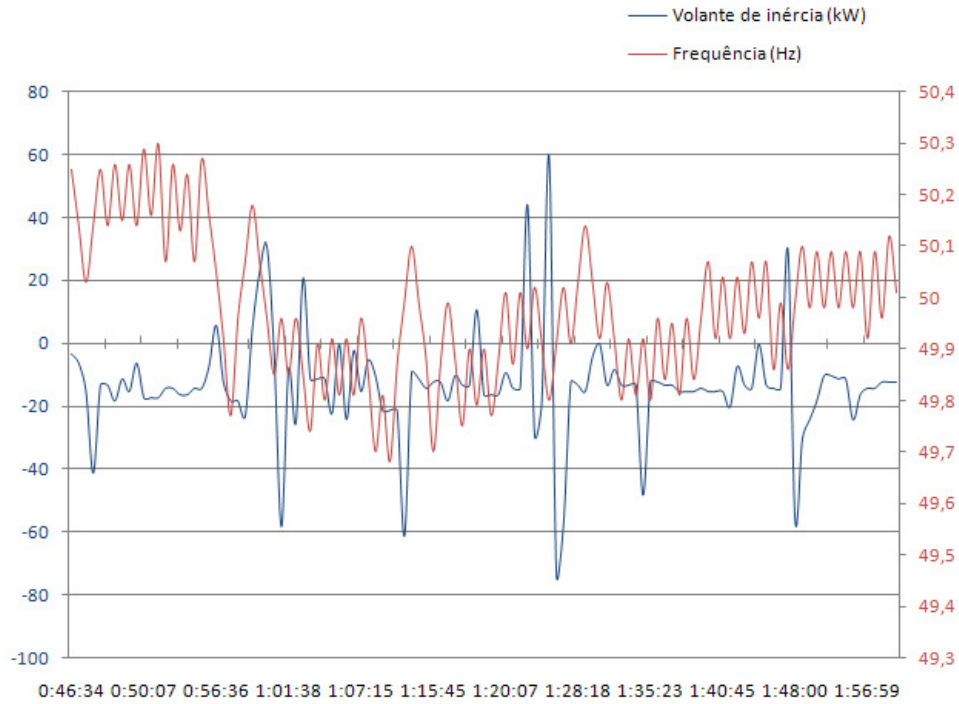


Figura 4.12 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 0h45 às 2h00

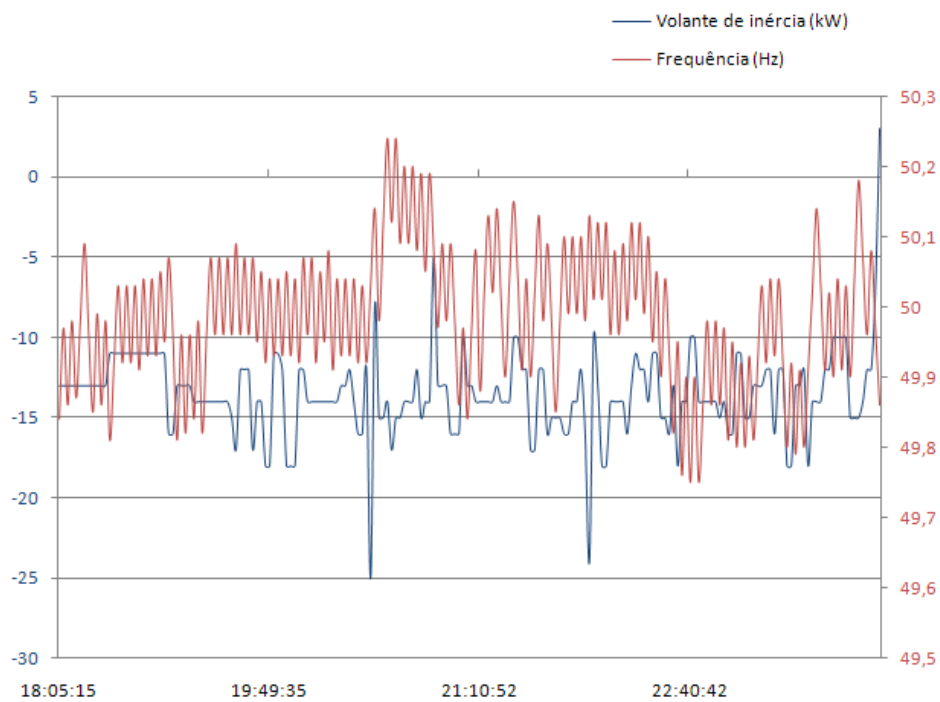


Figura 4.13 - Potencia do volante de inércia e frequência rede das 18h00 às 23h59

Nas tabelas 4.10 e 4.11 encontra-se um resumo dos valores máximos absorvidos e injectados pelo volante de inércia bem como os valores máximos e mínimos alcançados pela frequência da rede eléctrica. Os valores das tabelas foram obtidos com uma base de dados de maior resolução do que a construção das figuras 4.9 a 4.13. daí que aparecem valores de pico não registados nas ilustrações.

Tabela 4.10 – Valores alcançados pelo volante de inércia e frequência

	0h00 às 0h15		0h15 às 0h30	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Volante de Inércia (kW)	94	-144	102	-102
Frequência (Hz)	50,37	49,92	50,41	49,81

Tabela 4.11 – Valores alcançados pelo volante de inércia e frequência

	0h30 às 0h45		0h45 às 2h00		18h00 às 23h59	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Volante de Inércia (kW)	104	-178	104	-113	25	-48
Frequência (Hz)	50,35	49,87	50,3	49,68	50,24	49,75

Observando as figuras 4.9 a 4.12 que referem-se ao intervalo das 0h00 às 2h00 nota-se claramente o volante de inércia a executar a sua função de estabilização da frequência devido à oscilação da velocidade do vento.

Nas figuras 4.7 e 4.8 verifica-se nos primeiros minutos uma queda de produção eólica no aerogerador n.º3 de 125kW e 110 kW no aerogerador n.º4, nos momentos seguintes surge um aumento de produção eólica de 175kW no aerogerador n.º3 e de 172 kW no aerogerador n.º4 perfazendo no total uma saída de 235kW e uma entrada de 347kW. Na figura 4.9 e com apoio das tabelas 4.10 e 4.11 consegue-se verificar o volante de inércia fora da banda morta $50 \pm 0,1$ Hz a executar bem a sua função injectando potência quando a frequência começa a descer e ou absorvendo potência quando a frequência sobe, os valores máximos atingidos foram de 94 kW e de -144kW de forma a controlar a frequência da rede eléctrica nesse intervalo.

4.3.3 Caso real registado

No dia quatro de Outubro de 2007 pelas 17h ocorreu um incidente no Parque Eólico da Serra Branca, dois aerogeradores saíram de paralelo provocando uma entrada de carga na central equivalente à sua produção do momento. Houve uma entrada em “degrau” de

aproximadamente 400kW nos grupos *diesel* que estavam na rede. O volante de inércia devido às suas características apontadas nos capítulos anteriores injectou potência activa suficiente para que não houvesse deslastre de linhas, essa potência foi suavemente passada para os grupos *diesel* mantendo a frequência dentro dos limites expectáveis para o equipamento, conforme se pode observar na figura 4.14.

Esta contingência provocou uma subfrequência de somente $\approx 0,8$ Hz com a entrada em degrau de ≈ 400 kW, havendo registos da EDA eventos do mesmo género com quedas de frequência de 2 Hz.

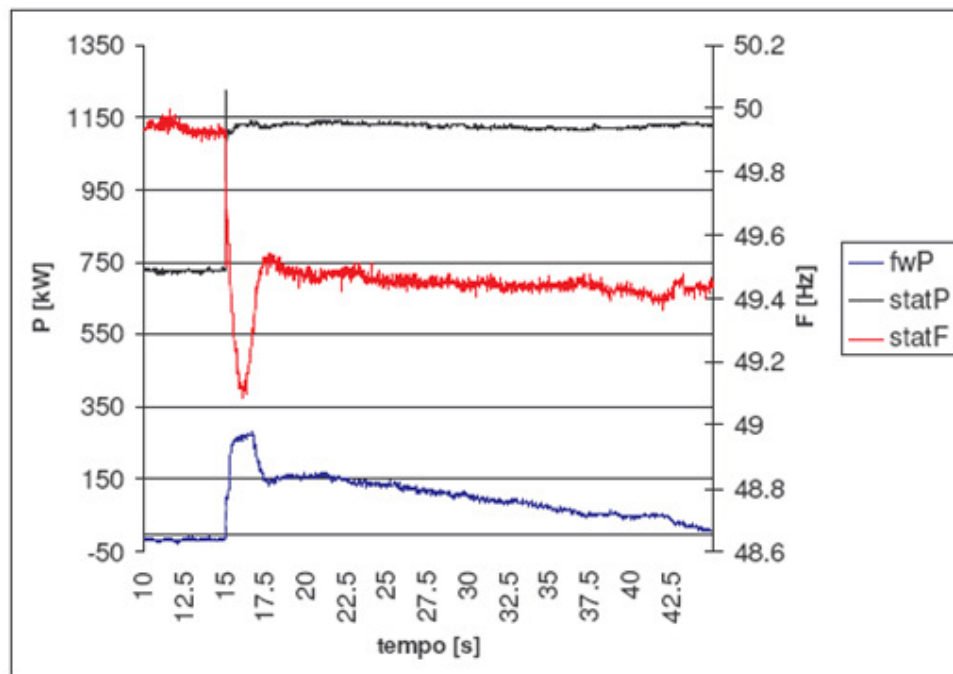


Figura 4.14 - Evento registado no dia 4 Outubro 2007

Onde:

- Linha a azul (fwP) refere-se à potência do volante de inércia.
- Linha a preto (statP) refere-se à potência debitada pelos grupos *diesel*
- Linha a vermelho (statF) refere-se à frequência da rede.

4.4. Conclusões

Constatou-se que com o volante de inércia em funcionamento obtém-se melhorias significativas na performance do sistema, ou seja uma diminuição muito grande da quantidade de energia não aproveitada estando descritos e resumidos os valores na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Energia perdida (kWh) nos dias analisados

Data	ENERGIA PERDIDA		
	Volante de inércia	kWh	Quantificação
11-Mar-05	Não	4.546,67	31,27%
10-Mar-06	Sim	1918,19	10,92%
22-Jan-07	Sim	911,83	6,23%
16-Nov-08	Sim	1713,50	11,56%

Verificou-se que a exploração dos grupos *diesel* é muito mais eficiente com volante de inércia em operação, em certos casos cinco vezes superior. De assinalar que após a instalação do volante de inércia os aerogeradores estiveram limitados manualmente por ordem manual dos operadores de despacho, razão a qual que poderá ser por falha do sistema de controlo do volante de inércia ou por falha de comunicações entre a central e o parque eólico ou por alguma reserva por parte dos operadores de serviço na fiabilidade do controlo do autómato devido à sua recente instalação e pelas experiencias de dificuldade no controlo da estabilidade do sistema anterior à instalação do volante de inércia. Havendo necessidade de existir limites técnicos mínimos nos grupos *diesel* e pela sua quase homogeneização em termos de potência individual será sem dúvida mais benéfico e mais eficaz que houvesse um maior diferencial entre grupos de forma pudessem colmatar e preencher a carga em certos períodos do dia nomeadamente no vazio e pontas

Igualmente apurou-se que com o aumento do peso da energia eléctrica de origem eólica na rede, haverá um ligeiro incremento do consumo específico dos grupos *diesel*

Através dos casos práticos analisados demonstra-se que o volante de inércia executa bem a sua função de equilibrar rapidamente a oferta e procura no sistema de forma que a carga nas máquinas *diesel* não seja, após reduções de produção eólica muito elevada. Paralelamente ao controlo da potência variável do parque eólico, este equipamento demonstra a sua utilidade em caso de entradas em “degrau” de cargas elevadas com origem nas contingências dos equipamentos assegurando que a frequência da rede não desça demasiado provocando a actuação de relés de protecção de linhas ou protecções de subfrequência.

Capítulo 5

Simulação Computacional

5.1. Introdução

No capítulo anterior apresentou-se uma análise das condições de operação do sistema eléctrico existente na da Ilha Graciosa com sem volante de inércia envolvendo uma análise dos históricos de operação, de forma que possa ser efectuado uma comparação do sistema real com uma simulação computacional dinâmica recorrendo ao *software* MATLAB SIMULINK®.

Neste capítulo descreve-se a modelização adoptada para tratar o problema recorrendo a modelos dinâmicos equivalentes dos sistemas instalados.

5.2. Modelização

Na modelização foram considerados quatro cenários referentes a um dia típico da Ilha Graciosa; **Período de vazio** e **Período de ponta** em duas situações diferentes **com e sem volante de inércia** ligado à rede.

Para os cenários estudados foram definidos os seguintes modelos de simulação:

- Produção de energia térmica *diesel* corresponde a um modelo equivalente (Produção equivalente) que referente às máquinas que estavam em paralelo na Central Térmica da Graciosa
- Produção de energia eólica correspondente à uma produção variável (Parque Eólico equivalente) que foi a variável de entrada do sistema com uma produção oscilante no tempo de forma a simular variações de vento reais registadas no Parque Eólico da Serra Branca, Ilha Graciosa e consequentemente variações de potência.
- Carga equivalente sendo um consumo fixo no período analisado.
- Volante de inércia equivalente, sendo o modelo equivalente do equipamento instalado na Ilha Graciosa.

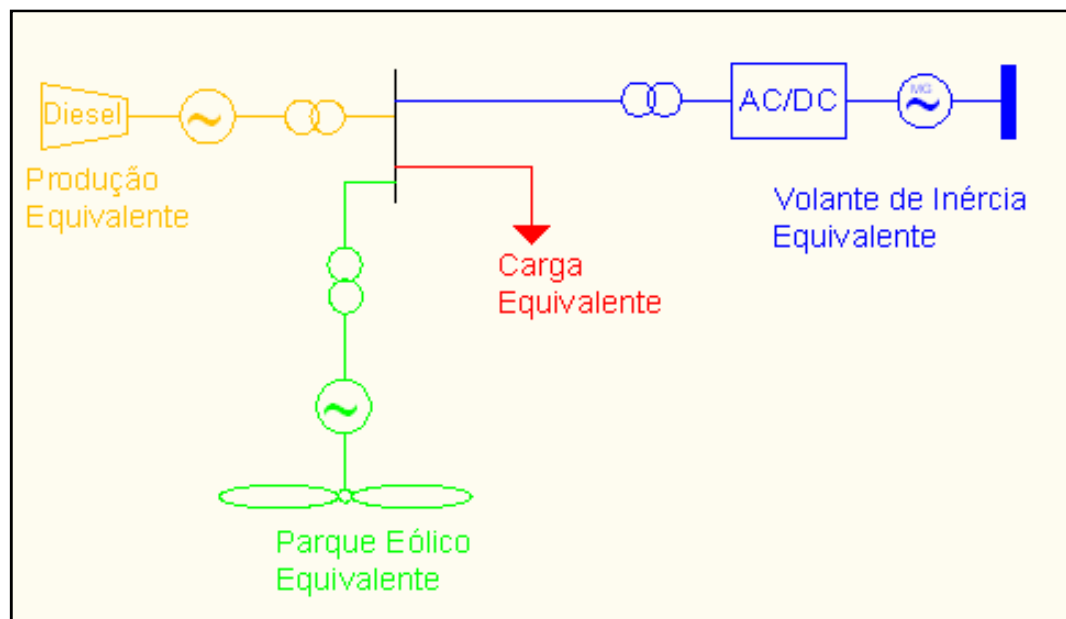


Figura 5.1 - Modelo equivalente ao sistema eléctrico da Ilha Graciosa com volante de inércia.

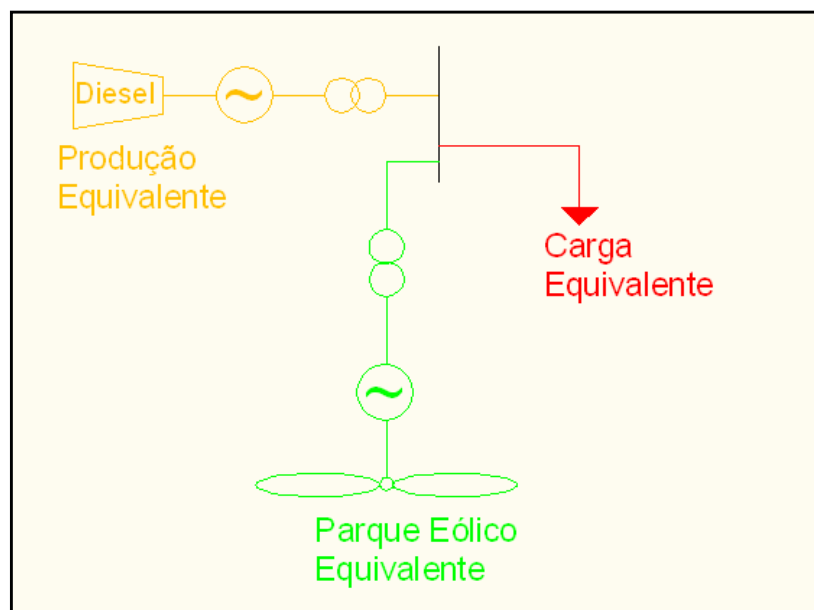


Figura 5.2 - Modelo equivalente ao sistema eléctrico da Ilha Graciosa sem volante de inércia.

De forma que as simulações dos modelos equivalentes fossem as mais reais possíveis foi seleccionado, através da base de dados da EDA, o dia 22.01.2007 em que a contribuição eólica foi bastante representativa sendo a produção ao final desse dia de 50,7% proveniente da Central Térmica da Graciosa e 49,3% com origem no Parque Eólico da Serra Branca tendo sido registados valores de velocidade de vento máximo de 30,1 m/s e de velocidade mínima de 9 m/s.

O período mais desfavorável foi o vazio estando somente dois grupos *diesel* de menor potência da central em paralelo (Grupo n.º1 e Grupo n.º3) sendo o caso mas favorável o período de ponta com igualmente com dois grupos na rede de maior potencia (Grupo n.º4 e Grupo n.º5), e com uma carga mais elevada na rede eléctrica da ilha.

Tabela 5.1 – Cenários base reais; Cenário A e Cenário B

Cenário A		Cenário B	
Data:	22-01-2007	Data:	22-01-2007
Hora:	5:30	Hora:	19:00
Vazio	1168 kW	Ponta	2029 kW
Grupo 1	307 kW	Grupo 1	0 kW
Grupo 2	0 kW	Grupo 2	0 kW
Grupo 3	282 kW	Grupo 3	0 kW
Grupo 4	0 kW	Grupo 4	614 kW
Grupo 5	0 kW	Grupo 5	609 kW
Grupo 6	0 kW	Grupo 6	0 kW
Subtotal	589 kW	Subtotal	1223 kW
% Diesel	50,43%	% Diesel	60,28%
AG 1	0 kW	AG 1	99 kW
AG 2	96 kW	AG 2	108 kW
AG 3	237 kW	AG 3	299 kW
AG 4	246 kW	AG 4	300 kW
Subtotal	579 kW	Subtotal	806 kW
% Eolica	49,57%	% Eolica	39,72%

Todos os grupos térmicos operam em regime de “*droop mode*” com 3,6% de *droop* (50.9Hz sem carga 49.1Hz carga máxima). A frequência é mantida nos 50Hz pelo sistema de controlo integral da regulação de frequência dos grupos *diesel*.

O arranque, sincronização e colocação em paralelo dos grupos térmicos é efectuado muito rapidamente, sendo na ordem dos 20 a 30 segundos.

As protecções de sobrecarga dos grupos geradores estão definidas para cargas 130% da potência nominal do grupo durante 40min, igualmente, por questões de ordem técnica, são evitadas explorações dos grupos com cargas abaixo do limite técnico inferior de 40% da sua potência nominal.

As simulações dos modelos equivalentes tiveram uma duração máxima de 10 segundos portanto os seguintes pressupostos foram considerados pelas razões técnicas acima referidas:

- Quando do abaixamento de produção do parque eólico não há arranques e colocação em paralelo de grupos *diesel* devido a ser necessário 20 a 30 segundos para todo o processo. (tempo superior ao período de simulação de 10 segundos).
- Limite técnico superior de operação dos grupos *diesel* 130% da sua potência nominal.
- Limite técnico inferior de operação dos grupos *diesel* 40% da sua potência nominal.

Tabela 5.2 – Potências dos grupos *diesel* e limites técnicos

Central Térmica da Graciosa				
	Potência		Limites Técnicos kW	
	kVA	kW	Inferior 40%	Superior 130%
Grupo 1,2 e 3	750	600	240	780
Grupo 4,5 e 6	1100	880	352	1144

Na tabela 5.3 podem-se observar Curvas de potência dos aerogeradores *Enercon* E-30 e *Nordtank*. O primeiro fabricante garante através de uma tecnologia inovadora, sistema de controlo de tempestade, produções com ventos entre 26m/s e 33 m/s sendo esta função muito útil para o caso de redes isoladas com elevada penetração de energia eólica pois as máquinas não saem de paralelo abruptamente mas sim de uma forma suave ao contrário dos aerogeradores *Nordtank* em que com velocidades de vento superiores a 25m/s saem de paralelo provando uma passagem da sua carga nominal quase instantaneamente para central térmica.

Como tal as simulações foram efectuadas e baseadas em valores reais de variações de vento e consequentemente variações de carga assentes nas curvas de potência dos fabricantes dos aerogeradores.

Tabela 5.3 – Curvas de potência dos aerogeradores *Enercon E-30* e *Nordtank*

Curva de Potência E-30		Curva de Potência NTK 100	
Vento	Potência	Vento	Potência
m/s	kW	m/s	kW
0	0	0	0
1	0	1	0,00
2	0	2	0,00
3	5	3	0,00
4	13	4	1,68
5	30	5	9,31
6	55	6	21,28
7	92	7	34,51
8	138	8	49,63
9	196	9	65,31
10	250	10	81,41
11	280	11	95,69
12	293	12	107,73
13	312	13	107,73
14	312	14	107,73
15	312	15	107,73
16	312	16	107,73
17	312	17	107,73
18	312	18	107,73
19	312	19	107,73
20	312	20	107,73
21	312	21	107,73
22	312	22	107,73
23	312	23	107,73
24	312	24	107,73
25	312	25	107,73
26	250 *	26	0
27	196 *	27	0
28	138 *	28	0
29	92 *	29	0
30	55 *	30	0
31	30 *	31	0
32	13 *	32	0
33	5 *	33	0
34	0 *	34	0

* Storm Control activo

5.3. Formalização do problema

Diz-se que um sistema de potência se encontra no estado normal de operação quando as seguintes condições são cumpridas:

- A solicitação de todas as cargas alimentadas pelo sistema é satisfeita.
- A frequência é mantida constante em seu valor nominal.

Na apreciação destes requisitos, deve ser considerado que as cargas do sistema variam de maneira aleatória, por vezes lentamente e em ciclos diários, semanais e sazonais ou no caso em estudo com grandes variações devido à variação de produção do Parque Eólico da Graciosa. Além disso, somente uma pequena parte da energia eléctrica pode ser armazenada, através do volante de inércia instalado, esta deve injectada na rede no instante em que for solicitada pelo sistema de controlo.

A função principal do controlo de sistemas de potência é manter o sistema operando no estado normal. Em outras palavras, trata-se de garantir um suprimento contínuo de energia respeitando-se simultaneamente certos padrões de qualidade. Estes últimos consistem basicamente em se manter a frequência constante e a tensão dentro de certos limites.

A acção de controlo primário é responsável pela variação da potência gerada por uma unidade de modo a igualar a carga, após uma variação desta. [8]. Este fenómeno dá-se às custas de uma variação da frequência do sistema. No nosso caso, sistemas interligados, as variações de carga provocam adicionalmente desvios nas potências de intercâmbio entre geradores interligados. Embora a regulação primária propicie o atendimento à variação da carga da rede, isto se dá às custas de uma queda na frequência do sistema. O valor do desvio estático de frequência, embora limitado, pode ser inaceitável, uma vez que há uma série de restrições à operação com subfrequência. A rede eléctrica não pode operar em modo de subfrequência esta deve obedecer em Portugal à norma portuguesa NP EN 50160 2001 que regula as características da tensão fornecida pelas redes eléctricas de distribuição pública de energia eléctrica, pois estes fenómenos provocam o aumento da fadiga dos grupos geradores, problemas nas cargas controladas por processos síncronos entre outros.

Além do controlo primário de velocidade, os geradores de um sistema eléctrico isolado estão em geral sujeitos a uma outra malha de controlo de velocidade, conhecida como controlo suplementar, controlo secundário, ou ainda controlo automático de geração (AGC).

O controlo secundário tem a função de restabelecer tanto a frequência quanto a potência para seus valores nominais de exploração da rede. Isto é possível através do deslocamento da referência dos reguladores de velocidade dos geradores. Portanto, o controlo suplementar pode vir a ter que actuar sobre vários geradores de um dado sistema, e não apenas um só.

É necessário, portanto, a existência de um controlo secundário que faça a frequência retornar o seu valor original. Este controlo actua na referência dos reguladores de velocidade, com o objectivo de corrigir o desvio de frequência que resulta quando apenas o controle primário actua.

Uma estratégia de um controlo secundário deve ter os seguintes requisitos:

- A malha de controlo resultante deve ser suficientemente estável;
- Após uma variação em degrau da carga, o desvio de frequência Δf deve voltar a zero, sendo a magnitude do desvio transitório de frequência a mínima possível.

5.3.1. Máquina Síncrona

Um sistema de energia têm que estar em permanente equilíbrio como tal devem-se obedecer os seguintes pressupostos: [8]

- A produção de energia = Consumo + Perdas do sistema
- Em cada gerador deve verificar-se:

$$P_m = P_e \quad (5.1)$$

$P_e =$ Carga que o gerador alimenta

$P_m =$ Potência que a máquina primária

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(P_m - P_e)}{M} \quad (5.2)$$

$M =$ Constante de inércia do sistema

$\omega =$ Velocidade angular da máquina síncrona

Sendo 5.2 a equação de movimento ou em linguagem anglo-saxónica “swing equation”

Se M é o momento de inércia da massa girante de um gerador síncrono, γ é a aceleração angular do rotor e T_a é o binário aplicado sobre o rotor, a segunda Lei de Newton na forma rotacional fornece:

$$J\gamma = T_a \quad (5.3.)$$

Note que o binário T_a apresenta como componentes o binário mecânico de entrada devido à acção da turbina, o binário devido às perdas rotacionais (atrito, ventilação, perdas no núcleo) e o binário electromagnético. Este último pode ser subdividido em binário síncrono e binário assíncrono (efeito de motor de indução).

Se:

$T_m =$ Binário mecânico de entrada, corrigido para perdas rotacionais, e $T_e =$ Binário electromagnético, então:

$$T_a = T_m - T_e \quad (5.4.)$$

Em regime, esta diferença é nula e não há aceleração. Durante perturbações, contudo $T_a \neq 0$. Ao invés de medir a posição angular em relação ao um eixo fixo, é mais conveniente fazê-lo referenciando a um eixo de referência que gira à velocidade síncrona ω_s do que em

relação ao eixo fixo. Se θ é o ângulo medido em relação ao eixo fixo e σ é ângulo medido em relação ao eixo que gira com velocidade ω_s . Então pode-se observar a figura 5.3

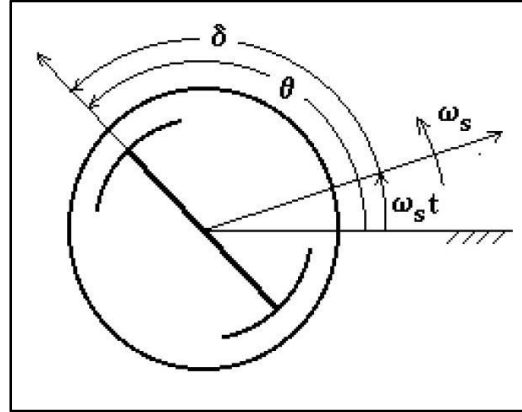


Figura 5.3 - Relação entre θ e σ

$$\sigma = \theta - \omega_s t \quad (5.5)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \quad (5.5)$$

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \gamma \quad (5.6)$$

Substituindo (5.6) e (5.4) em (5.3):

$$J \frac{d^2\sigma}{dt^2} = T_m - T_e \quad (5.7)$$

Multiplicando (5.7) pela velocidade ω e desprezando o termo de amortecimento obtém-se a equação de movimento em (5.8)

$$M \frac{d^2\sigma}{dt^2} = P_m - P_e \quad (5.8)$$

Onde:

$M = J \cdot \omega$ É a quantidade de movimento angular

$P_e = T_e \cdot \omega$ É a potência eléctrica de saída

$P_m = T_m \cdot \omega$ É a potência mecânica de entrada corrigida pelas perdas rotacionais

5.3.2. Modelo de grupo *diesel*

O grupo gerador *diesel* é uma máquina síncrona convencional e foi modelada com função de regulação de frequência.

A equação de movimento do grupo gerador *diesel* é a seguinte:

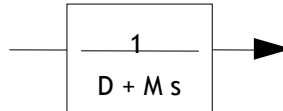


Figura 5.4 - Função transferência da equação de movimento

Onde: D é o coeficiente total de variação da carga com a frequência (p.u.MW / rad/s) e M a constante de inércia (s)

O regulador de velocidade do grupo poder ser modelizado da seguinte forma:

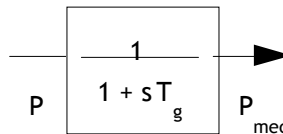


Figura 5.5 - Função transferência do regulador de velocidade

Onde: T_g a constante de tempo do regulador (s)

O motor do grupo poder ser modelizado da seguinte forma:

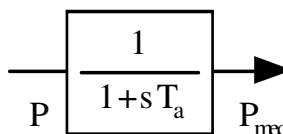


Figura 5.6 - Função transferência do motor *diesel*

Onde: T_a é a constante de tempo motor *diesel*; P é posição da válvula do injetor e P_{mec} é a potência mecânica.

O regulador de velocidade do grupo *diesel* possui um controlador PI (proporcional e integral) que tem como variável de entrada o desvio de frequência obtido na equação de movimento.

O controlo proporcional (controlo primário) decrece a velocidade do grupo quando a carga aumenta sendo possível uma divisão estável de cargas quando estão mais grupos em paralelo. O ganho integral (controlo secundário) controla a injeção do grupo *diesel* de forma que a frequência volte ao seu valor nominal em caso de desvio desta. A velocidade do rotor é medida e comparada com a referência, o erro medido é amplificado e integrado para que se transforme num sinal de controlo que actuará na injeção do grupo. A máquina vai para um patamar estabilidade somente quando desvio for nulo.

Na figura 5.7 pode-se observar o modelo completo do grupo *diesel* com a equação de movimento.

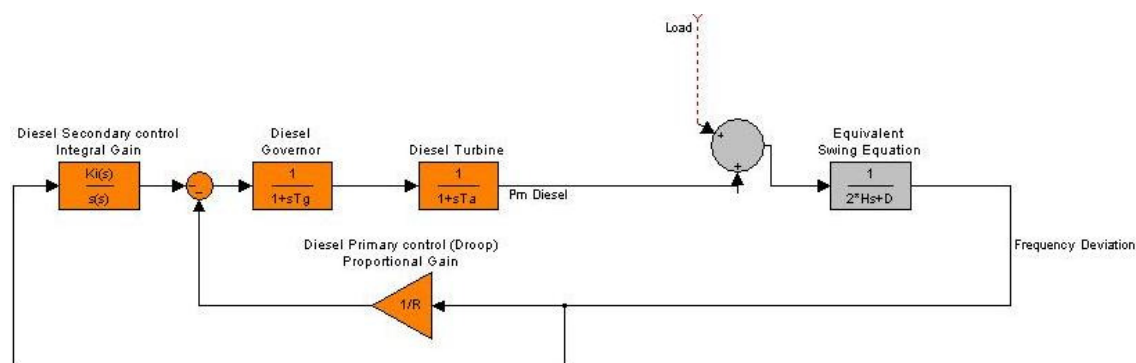


Figura 5.7 - Modelo grupo *diesel* com regulação primária e secundária

5.3.3. Modelo de volante de inércia

As duas principais funções de controlo do volante de inércia são o controlo dinâmico de frequência *Dynamic Frequency Support* (DFS) e o algoritmo de controlo de tensão *Dynamic Voltage Support* (DVS), sendo neste trabalho apenas se analisa o controlo dinâmico de frequência.

A Figura 5.8 mostra uma base resumo dos componentes do volante de inércia *PowerStore*.

O estado de carga do volante de inércia pode ser modelado por integração da potência activa menos perdas. Estas são cerca de 13KW, em condições normais operações.

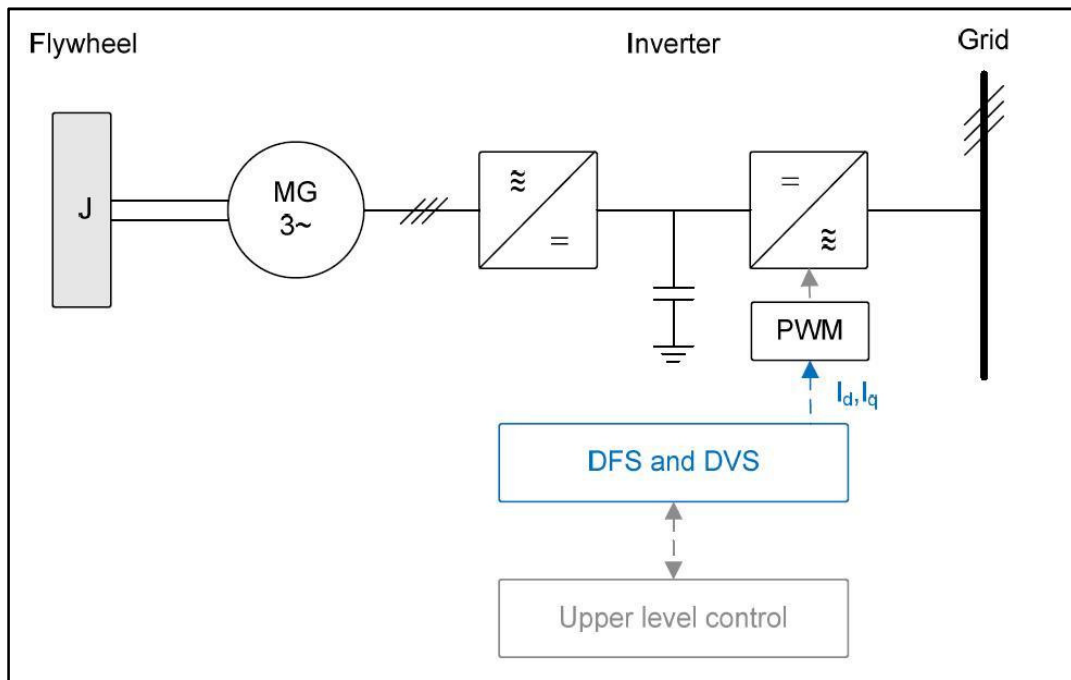


Figura 5.8 - Resumo dos componentes do volante de inércia

Para um controlo dinâmico da frequência o ponto FSCTRF deve ser ajustável.

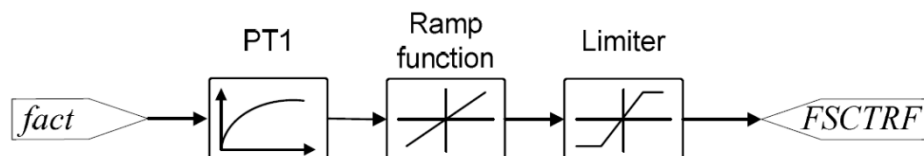


Figura 5.9 - Valor de ajuste de frequência para o controlo dinâmico

Após uma variação de carga no sistema haverá uma alteração da frequência. Através da função de frequência média esta irá indicar um novo ponto de ajuste e lentamente a frequência irá para o valor nominal da rede.

A figura 5.10 mostra que a potência activa depende directamente do desvio de frequência.

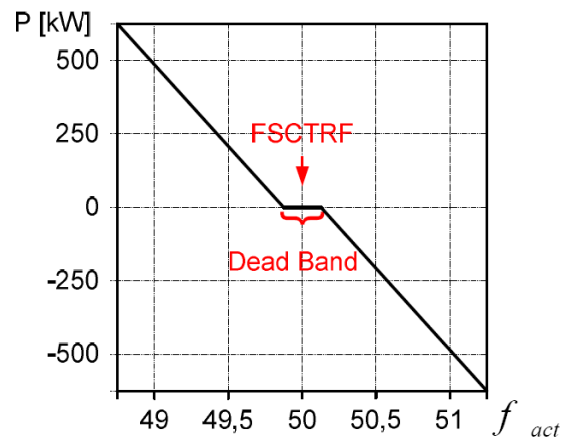


Figura 5.10 - Potência activa em função frequência actual do sistema

Existe uma zona de não actuação, em linguagem anglo-saxónica “*Dead Band*” em torno do valor de referência. Enquanto a frequência se mantiver dentro desse limite não haverá nenhuma participação de potência na rede por parte do volante de inércia. Se a frequência for superior a esse intervalo de referência o volante de inércia irá consumir potência activa caso contrário irá injectar potência activa.

O diagrama de blocos da função de controlo dinâmico de frequência, DFS, é mostrado na figura 5.11

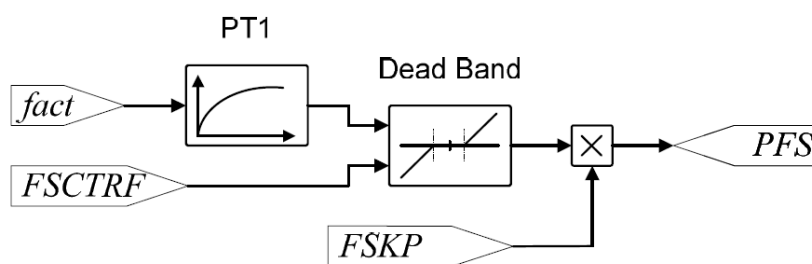


Figura 5.11 - Controlo dinâmico de frequência, DFS

Quando a frequência vai para valores da zona de actuação o desvio é multiplicado pelo ganho de frequência, *Frequency Support Gain*, (FSKP). Este factor define o valor de potência activa necessária injectar ou consumir devido ao desvio de frequência, sendo o limite o valor máximo e mínimo de carga existente no volante de inércia. O estado de carga do volante de inércia é aqui chamado por SOC "*State of charge*"

O estado de carga do volante de inércia, SOC, quando atinge 5% e a 95% o valor de potência activa é reduzido linearmente de forma que este não termine abruptamente como se pode observar na figura 5.12

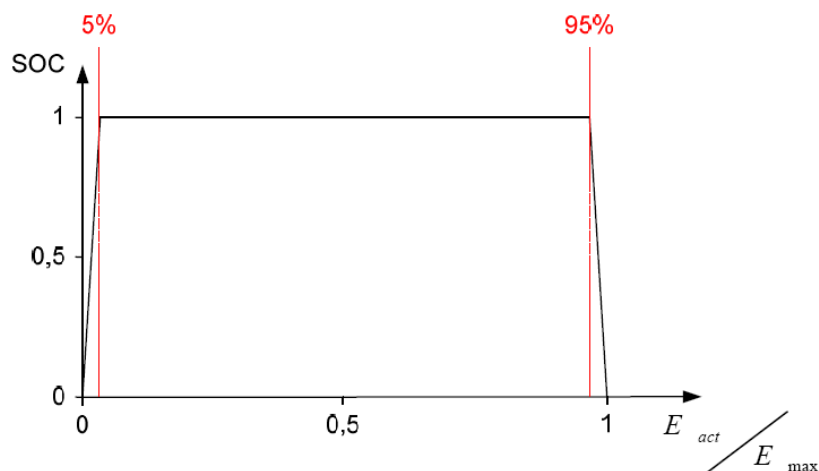


Figura 5.12 - Função estado de carga do volante de inércia, SOC

Na figura 5.13 pode-se observar o diagrama de blocos para a determinação da Modulação por largura de impulso (MLP), mais conhecida pela sigla em inglês PWM (*Pulse-Width Modulation*). O valor de referência da potência activa PFS é limitada pelo estado de carga do volante de inércia. Dividindo a potência pela tensão absoluta V_{abs} o valor da corrente id pode ser determinado. O bloco PT1 reflecte o tempo de resposta do controlador.

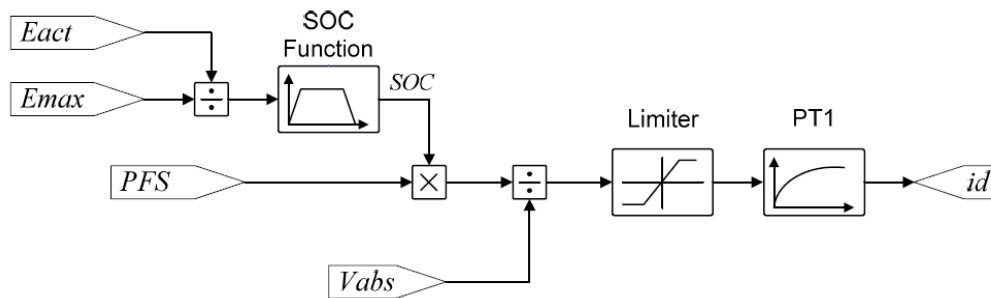


Figura 5.13 - Função de determinação do valor de referência do PWM

Os parâmetros do controlo dinâmico de frequência do volante de inércia *PowerStore* instalado na Ilha Graciosa são os seguintes:

- Frequência nominal, *Frequency Support Centre Frequency* FSCTRF; 50Hz
- Frequência de não actuação, *Frequency Support Dead Band* FSDBND; 0,2Hz
- Ganho de Frequência, *Frequency Support Gain*, FSKP; 0.5 pu/Hz
- Tempo de resposta do controlador, T_i ; 1 ms

5.4. Implementação

Os modelos descritos na secção anterior foram implementados em ambiente MATLAB SIMULINK®.

O SIMULINK é uma livreria que permite modelar, simular e analisar sistemas cujas saídas mudam ao longo do tempo, tais como sistemas dinâmicos, que são tratados nesta dissertação.

A implementação dos modelos de sistemas dinâmicos foi realizada graficamente através de diagramas de blocos, estes são uma descrição gráfica da relação matemática que existe entre entradas e saídas e estados internos dos blocos ao longo dos tempos.

Para a implementação destes modelos, criaram-se os diagramas de blocos correspondentes, usando o editor de modelo SIMULINK, que representa graficamente, em função do tempo relações matemáticas entre as entradas do sistema, estados e saídas.

Os modelos possuem na generalidade três componentes principais: fontes, o sistema a ser modelado e dispositivo de saída. Como se pode observar na figura 5.14.

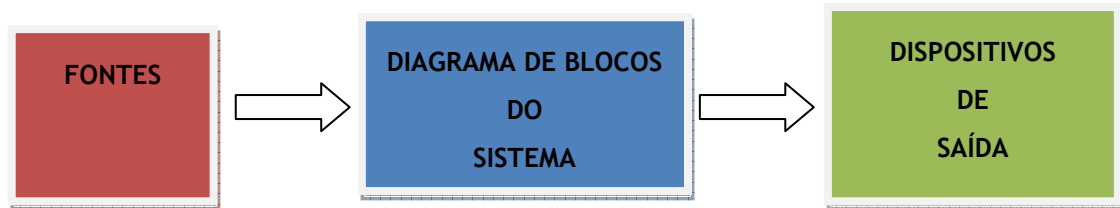


Figura 5.14 - Elementos principais de um modelo de MATLAB SIMULINK®.

O elemento central, o sistema, é a representação do nosso sistema dinâmico a ser modelado em SIMULINK®. As fontes são as entradas aplicadas ao sistema dinâmico. Podem incluir valores constantes, como utilizado para simulação da carga da rede eléctrica da Ilha Graciosa, ou geradores de funções, como sinusóides sinais em degrau, dente de serra ou ainda sinais personalizados, como igualmente utilizado para simular as variações de produção do Parque Eólico da Graciosa. A saída do sistema é entregue aos dispositivos de saída. Tais blocos são encontrados na biblioteca de Dispositivos de Saída, aqui utilizados, de forma que possamos observar graficamente a resposta dos modelos registadas.

Os diagramas de blocos SIMULINK® podem ser compostos de diversas camadas ou em linguagem anglo-saxónica “*Layers*”. Cada camada é definida por um subsistema. Um subsistema é parte do diagrama de blocos geral. Na presente modelização utilizou-se o sistema principal de forma a representar os elementos pretendidos, produção *diesel*, parque eólico e carga da rede e um subsistema para modelizar o volante de inércia, esta opção foi puramente de aspecto organizacional do diagrama de blocos.

A rede eléctrica da Ilha Graciosa foi modelizada como uma rede isolada ligada a um barramento comum único com duas máquinas em paralelo (volante de inércia, e equivalente dos grupos *diesel* na rede), uma carga constante referente aos consumidores e uma produção variável no tempo referente à variação de potência debitada pelo parque eólico. O volante de inércia e o equivalente dos grupos *diesel* na rede foram modelados com controladores separados mas com uma equação de movimento única e comum.

5.4.1. Dados

Na tabela 5.4 encontram-se os dados de cada grupo *diesel* para modelização onde:

- S_n (MVA) - Potência aparente
- S_{base} (MVA) - Potência de base
- H (s) - Constante de inércia do grupo *diesel*
- D (p.u.MW / rad/s) - Coeficiente total de variação da carga com a frequência
- T_g (s) - Constante de tempo de reposta do regulador de velocidade
- T_{turb} (s) - Constante de tempo do gerador *diesel*
- R (Hz/pu) - Estatismo do grupo *diesel*
- K_i (pu.s/rad) - Ganho integral do grupo *diesel*

Tabela 5.4 – Dados para modelização dos grupos *diesel*

Grupos	S_n (MVA)	H	D	D	$T_g(s)$	$T_{turb} (s)$	R (Hz/pu)	K_i (pu.s/rad)
			Vazio	Ponta				
Grupo 1	0,75	3	1,168	2,029	0,1	1	0,0867	2,25
Grupo 2	0,75	3	1,168	2,029	0,1	1	0,0867	2,25
Grupo 3	0,75	3	1,168	2,029	0,1	1	0,0867	2,25
Grupo 4	1,1	3	1,168	2,029	0,1	1	0,0591	3,3
Grupo 5	1,1	3	1,168	2,029	0,1	1	0,0591	3,3
Grupo 6	1,1	3	1,168	2,029	0,1	1	0,0591	3,3
S_{base}								
MVA								
1								

Sendo o Cenário A, hora de vazio e o Cenário B, hora de ponta, considerando a tabela 5.1 em que estão indicados os grupos *diesel* que estão na rede nas respectivas horas e através das fórmulas (5.25) a (5.30) correspondentes às equivalências dos dois grupos em uma só máquina equivalente resultou que tabela 5.5 de dados equivalentes de cada cenário para modelização dos grupos *diesel*.

$$H_{eq} = H_{Maq1} + H_{Maq2} \quad (5.9)$$

$$D_{eq} = D_{Maq1} + D_{Maq2} \quad (5.10)$$

$$T_g = \frac{T_{g1} + T_{g2}}{2} \quad (5.11)$$

$$T_{Turb} = \frac{T_{Turb1} + T_{Turb2}}{2} \quad (5.12)$$

$$R_{eq} = \frac{R_{maq1} \times R_{maq2}}{(R_{maq1} + R_{maq2})} \quad (5.13)$$

$$K_{i_{eq}} = K_{i_{Maq1}} + K_{i_{Maq2}} \quad (5.14)$$

Tabela 5.5 – Dados equivalentes de cada cenário para modelização dos grupos *diesel*

Cenário A		Cenário B	
Data:	22-01-2007	Data:	22-01-2007
Hora:	5:30	Hora:	19:00
Vazio	1168 kW	Ponta	2029 kW
Heq	6	Heq	6
Deq	2,340	Deq	4,058
Tg(s)	0,1	Tg(s)	0,1
T turb (s)	1	Tturb (s)	1
Req	0,043	Req	0,030
Ki eq	4,5	Ki eq	6,6

Considerando que a velocidade do vento do parque eólico no dia em causa estava num dado momento nos 24 m/s o que corresponde a uma potência total debitada pelos aerogeradores de 839,46 kW mas devido aos limites técnicos inferiores (40% carga nominal) dos grupos *diesel*, a produção dos aerogeradores será do máximo de 688kW durante o vazio e num dado instante a velocidade do vento baixa para 9m/s correspondente a 522,62 kW total debitado, sendo a curva de potência das máquinas na tabela 5.3, teremos uma perda de produção de 316,84 kW.

Como tal elaborou-se um sinal com alguma semelhança à forma de “dente de serra” e outro, ilustrado na figura 5.17 este corresponde à produção do parque eólico, com uma simulação de 1000 segundos, considerando uma perda aproximada da ordem de grandeza acima indicada e de outras registadas em dias semelhantes. Aos 816 segundos é simulado um disparo por avaria de um aerogerador de E-30 à potência nominal de 312kW, originando uma perda total dessa potência. Nas rampas de ascensão do sinal foram consideradas as características da tomada de carga de $dP/dt = 25\text{kW/s}$ dos aerogeradores.

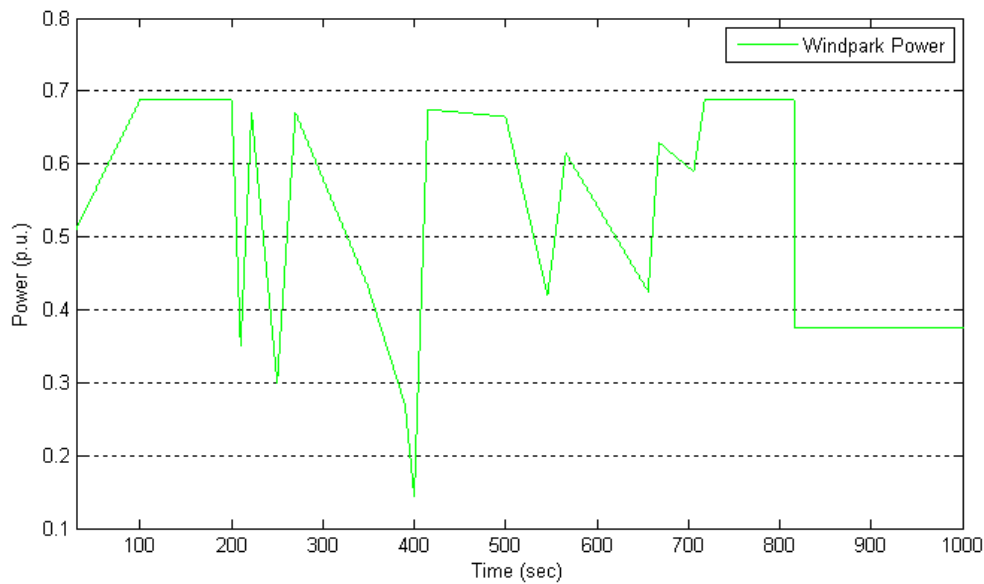


Figura 5.15 - Variação de produção do Parque Eólico da Graciosa com as condições iniciais do cenário A

Onde:

O eixo do x corresponde ao tempo em segundos

O eixo do y corresponde à produção potencia activa em p.u sendo a $S_{base}=1MVA$

5.4.2. Diagrama de blocos

Com a formalização do problema atrás descrito e com apoio nas tabelas, figuras e fórmulas elaborou-se o seguinte modelo dos equivalentes dos equipamentos instalados na rede eléctrica da Ilha Graciosa.

Por uma questão organizacional e de melhor visualização o modelo geral possui um subsistema do volante de inércia.

Na figura 5.19 encontra-se o diagrama de blocos geral do modelo implementado com os dados equivalentes da hora do vazio. Na figura 5.20 pode-se visualizar o subsistema do volante de inércia do diagrama de blocos geral.

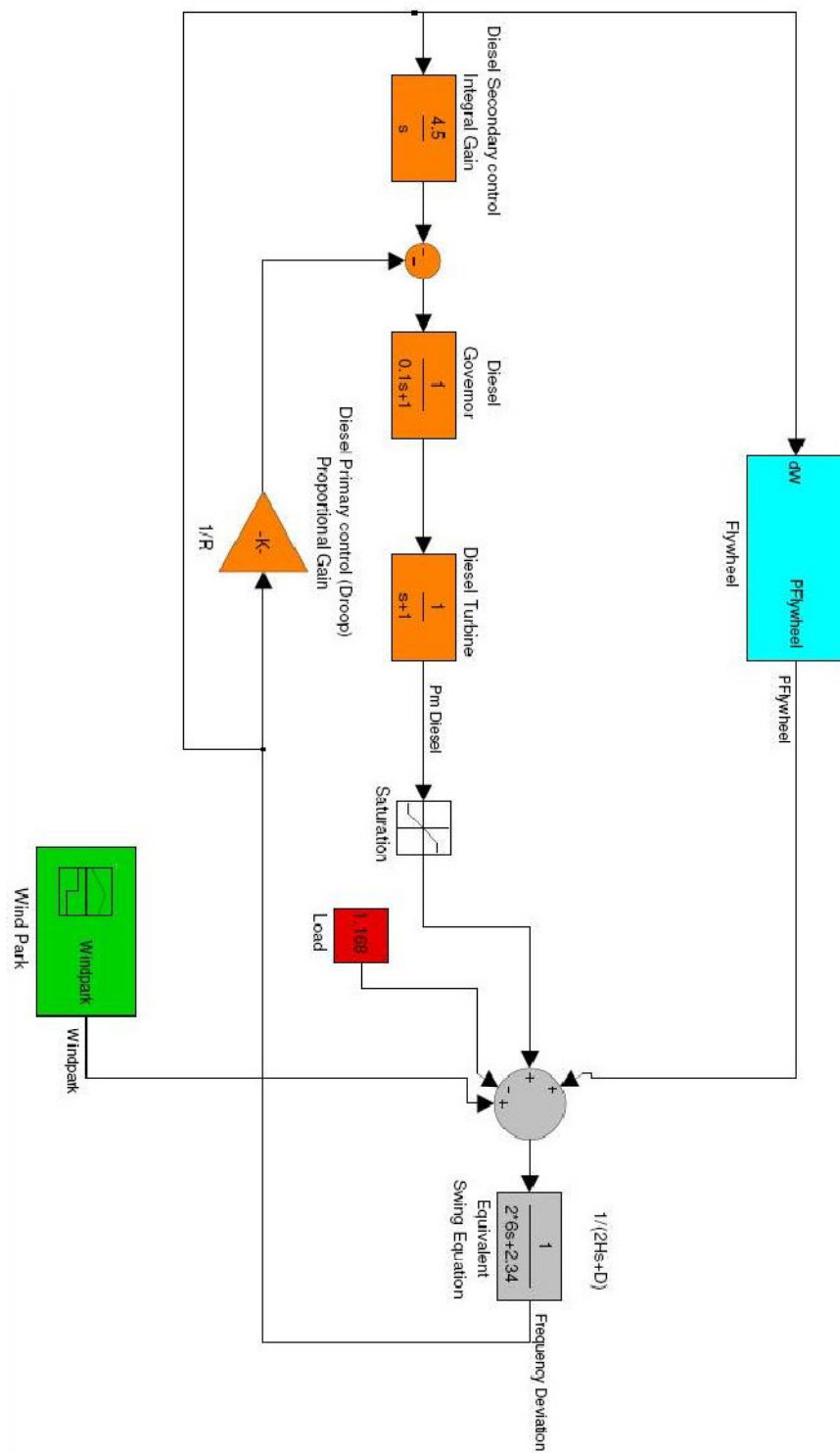


Figura 5.16 - Diagrama de blocos geral do modelo com o subsistema volante de inércia, hora do vazio

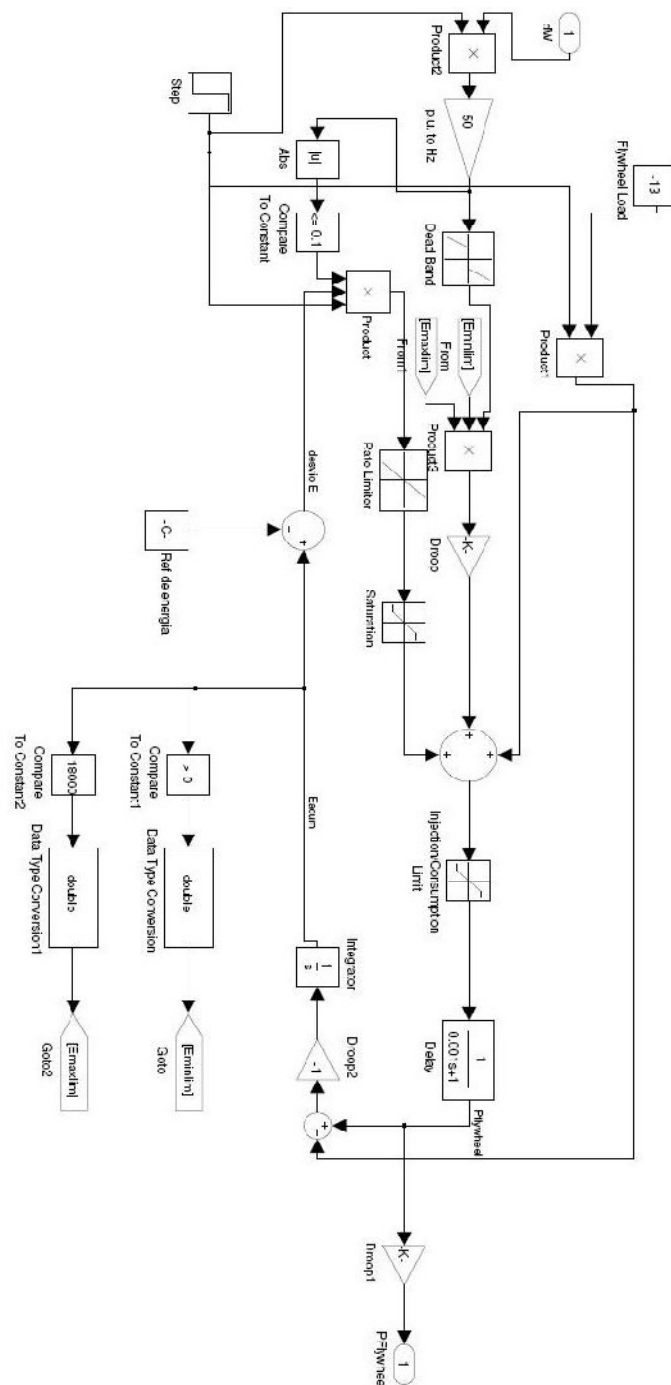


Figura 5.17 - Diagrama de blocos do subsistema do volante de inércia

Com base nos modelos, da figura 5.16 e 5.17, equivalentes ao sistema eléctrico da Ilha Graciosa em estudo e através da constituição de quatro cenários possíveis apresentados no capítulo seguinte é possível observar o comportamento da frequência da rede eléctrica da Ilha Graciosa.

Capítulo 6

Casos de Análise

6.1. Introdução

Neste capítulo são estudados dois cenários principais: **Cenário A** referente ao período de vazio de um diagrama de cargas típico da Ilha Graciosa, com velocidades de vento muito variáveis e a desligação da linha de saída do ponto de entrega do parque eólico; **Cenário B** igual ao panorama anterior mas num período de hora de ponta. Ambos os cenários foram simulados com e sem volante de inércia, a observar o comportamento da frequência da rede eléctrica em ambos os casos, perfazendo no total de quatro simulações.

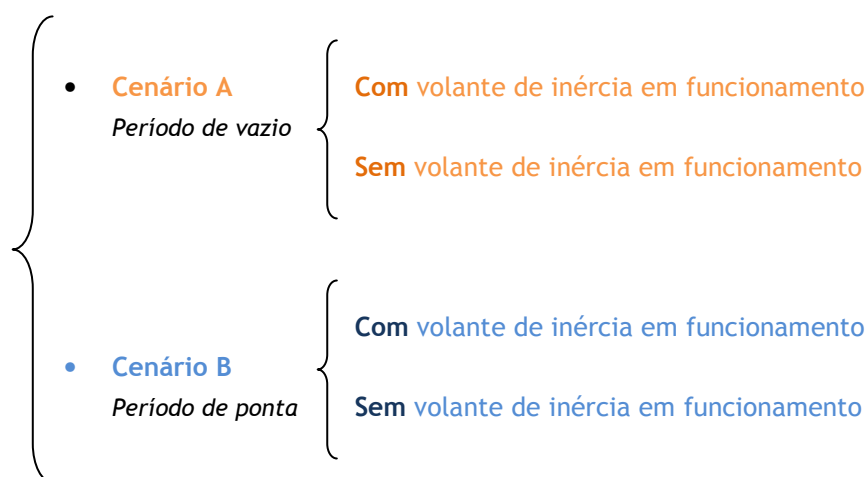


Figura 6.1 - Cenários do sistema eléctrico da Ilha Graciosa simulados

Conforme referido no em 2.4.6 existem quatro saídas de linha da Subestação da Central Térmica da Graciosa, com relés de protecção multifunção estando as protecções de subfrequência activas/desactivas e com as parametrizações indicadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parametrizações de protecção de linha - subfrequência

Saída de linha	Protecção de subfrequência			
	Deslastre	Frequência	Δf	Temporização
Linha da Praia	Activo	48,5 Hz	1,5 Hz	1,0 s
Linha da Guadalupe	Activo	47,5 Hz	2,5 Hz	1,5 s
Linha da Pronicol	Activo	47,5 Hz	2,5 Hz	1,5 s
Linha da Santa Cruz	Desactivo			

Através da observação da tabela anterior pode verificar-se se os desvios de frequência alcançados pela oscilação provocam o deslastre de cargas, realizado através da saída de serviço das linhas.

Todos os cenários foram construídos considerando os modelos dos capítulos anteriores, condições de operação, limites técnicos e características técnicas dos equipamentos envolvidos.

6.2. Cenário A - Hora de Vazio

O cenário A corresponde ao período de vazio do diagrama de cargas, pelas 5h30 da manhã as condições de operação iniciais do parque eólico e central térmica são as indicadas nas tabelas 6.2 e 5.4. A variação de potência do parque eólico é o sinal da figura 5.18 com a variação explanada no capítulo anterior.

Tabela 6.2 – Condições de operação iniciais - 0 segundos

Cenário A	
Vazio	1168 kW
Grupo 1	307 kW
Grupo 3	282 kW
Subtotal	589 kW
% Diesel	50,43%
AG 1	0 kW
AG 2	96 kW
AG 3	237 kW
AG 4	246 kW
Subtotal	579 kW
% Eolica	49,57%

A carga da rede mantém-se constante nos 1168kW havendo a variação somente da potência debitada pelo parque eólico e consequentemente a variação de produção dos motores *diesel* e ou volante de inércia.

6.2.1. Sem volante de inércia

A figura 6.2 descreve a evolução temporal do parque eólico, do grupo diesel equivalente e o desvio de frequência da rede para o sistema sem volante de inércia em funcionamento.

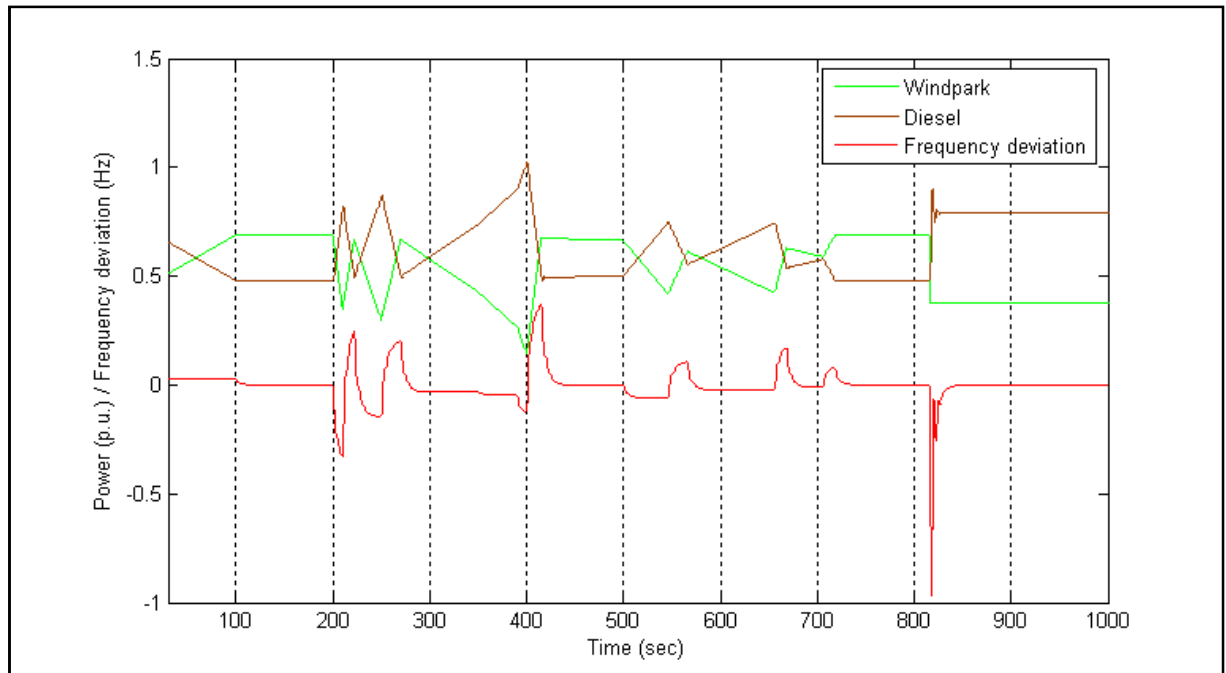


Figura 6.2 - Variação do sistema sem volante inércia na hora do vazio

Os maiores desvios de frequência em relação ao valor nominal de 50Hz observados são nos seguintes períodos.

Período de tempo $t=150s$ a $t=350s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,32 Hz$ e $\Delta f = +0,24 Hz$

Período de tempo $t=350s$ a $t=450s$ - Maior desvio: $\Delta f = +0,36 Hz$

Período de tempo $t=800s$ a $t=850s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,96 Hz$

Observando a maior sobrefrequência de $\Delta f = +0,36 Hz$ aos $t=415$ segundos e maior subfrequência de $\Delta f = -0,96 Hz$ aos $t=817$ segundos.

Nas figuras 6.3 a 6.5 poder-se-á observar os desvios de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

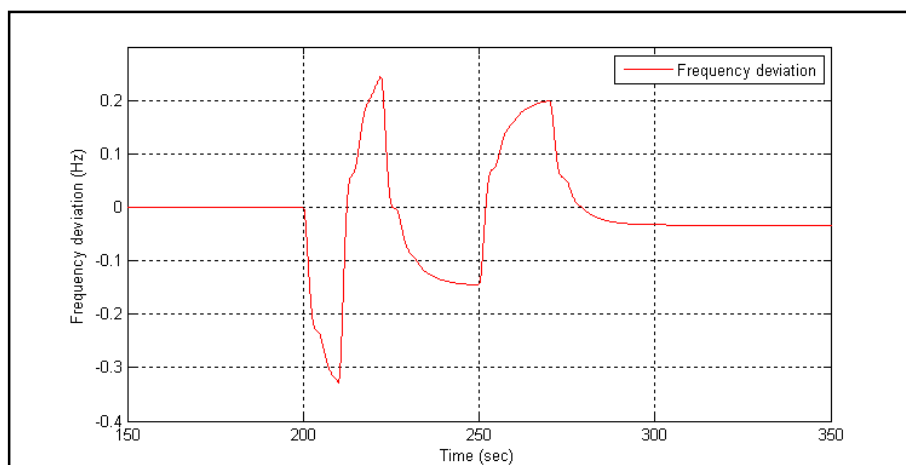


Figura 6.3 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$

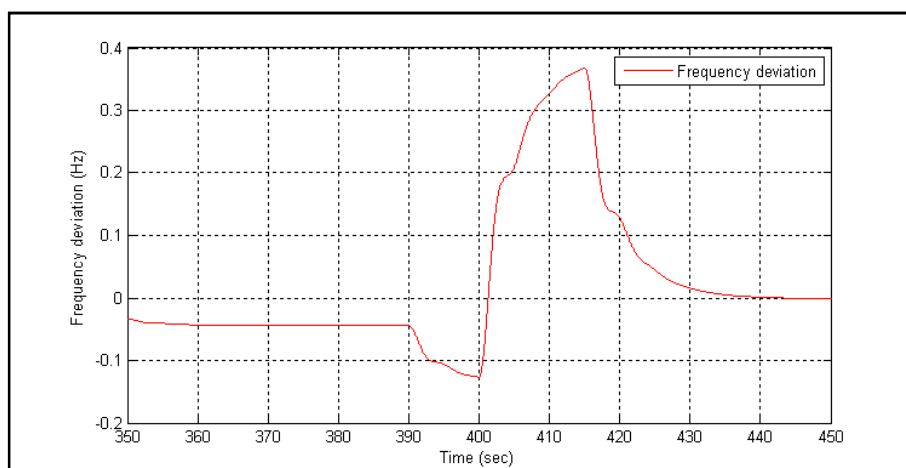


Figura 6.4 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$

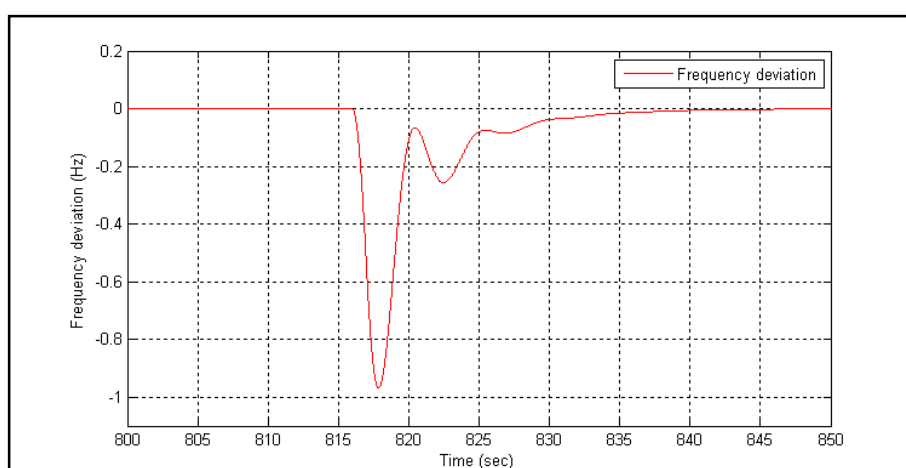


Figura 6.5 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$

Nas figuras 6.6 a 6.8 ilustra-se o comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico bem como as consequências dessas variações no desvio de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

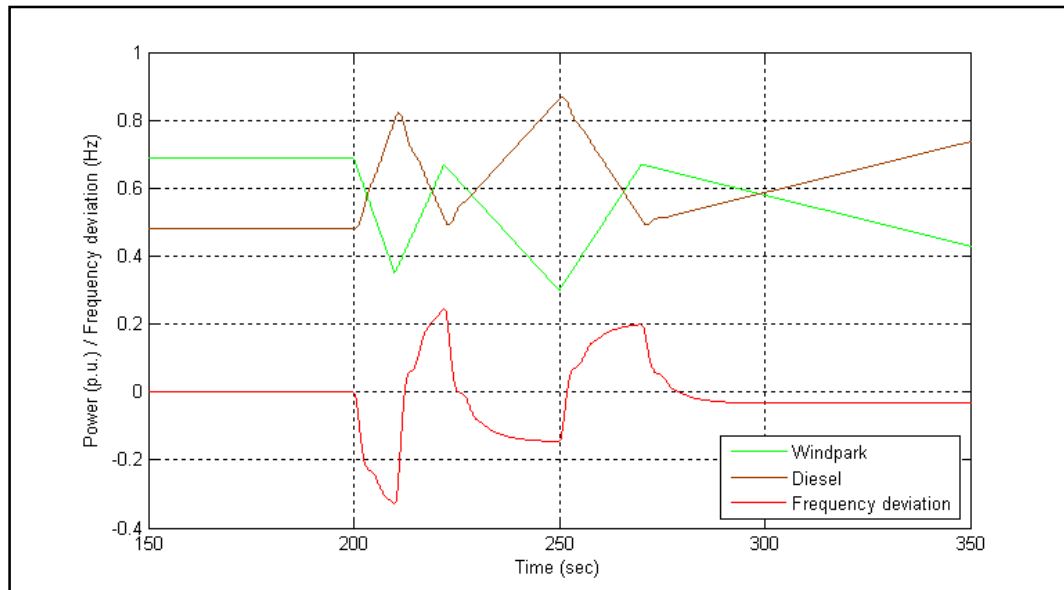


Figura 6.6 - Comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$

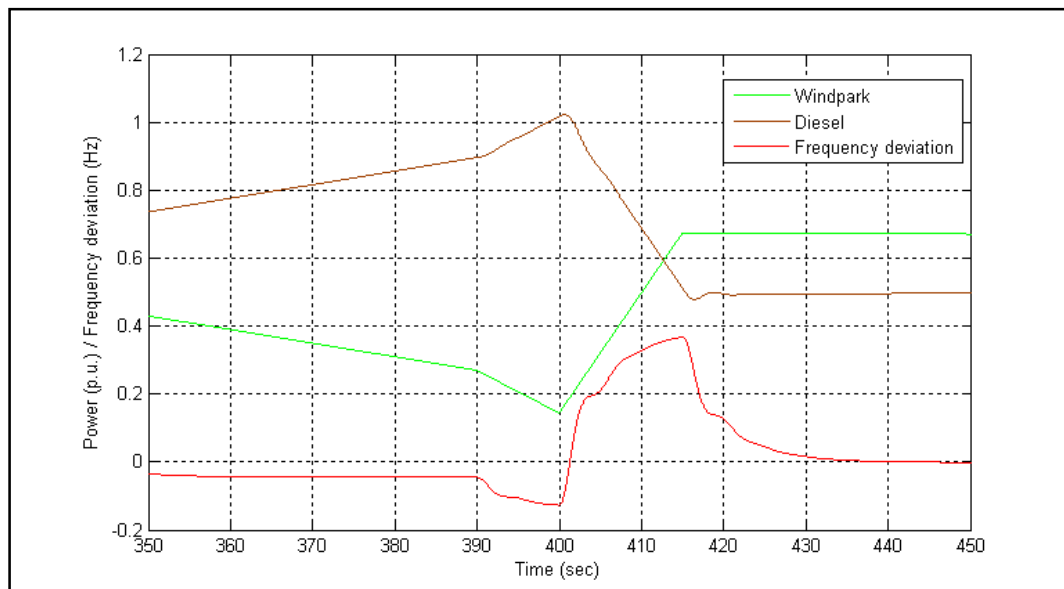


Figura 6.7 - Comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$

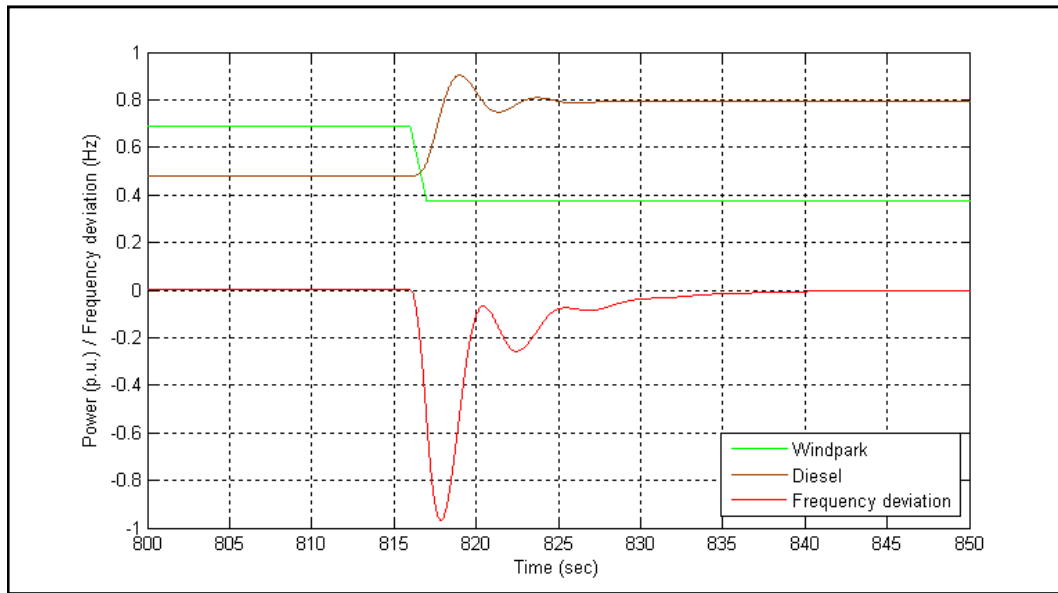


Figura 6.8 - Comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$

6.2.2. Com volante de inércia

A figura 6.9 ilustra a simulação do desempenho total, do sistema com volante de inércia em funcionamento.

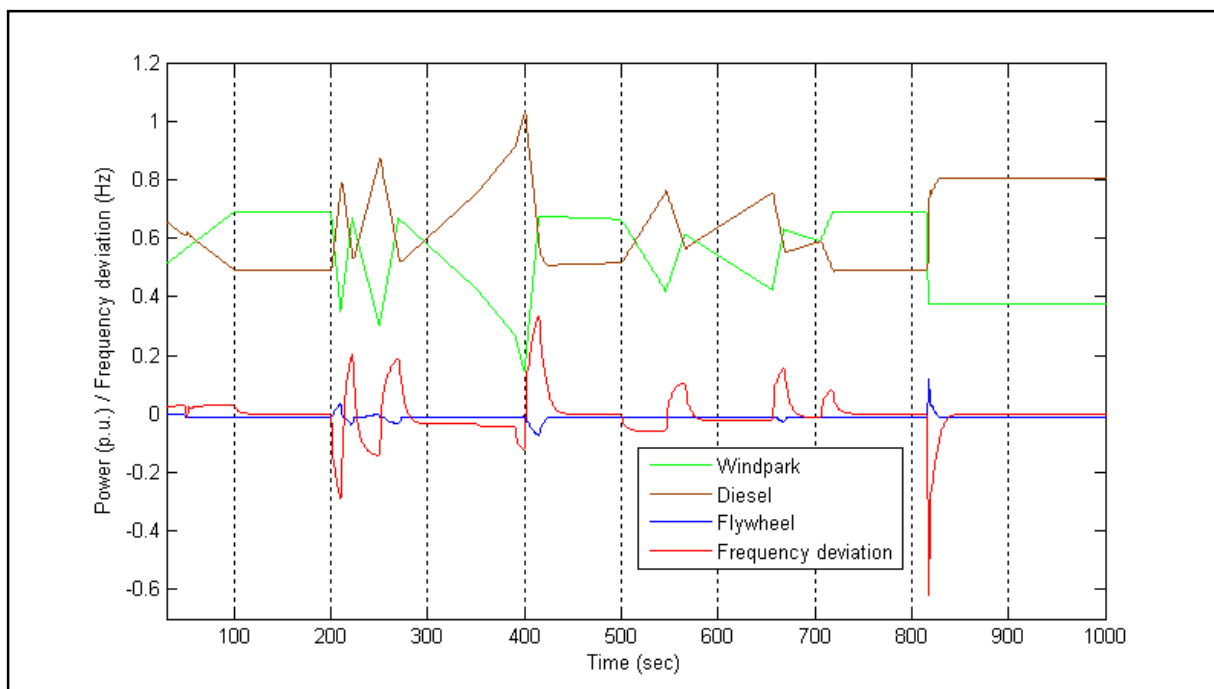


Figura 6.9 - Variação do sistema com volante inércia no período de vazio

Os maiores desvios de frequência em relação ao valor nominal de 50Hz observados são nos seguintes períodos.

Período de tempo $t=150s$ a $t=350s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,28 \text{ Hz}$ e $\Delta f = +0,20 \text{ Hz}$

Período de tempo $t=350s$ a $t=450s$ - Maior desvio: $\Delta f = +0,33 \text{ Hz}$

Período de tempo $t=800s$ a $t=850s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,61 \text{ Hz}$

Observando a maior sobrefrequência de $\Delta f = +0,33 \text{ Hz}$ aos $t=415$ segundos e maior subfrequência de $\Delta f = -0,61 \text{ Hz}$ aos $t=817$ segundos.

Nas figuras 6.10 a 6.12 poder-se-á observar os desvios de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

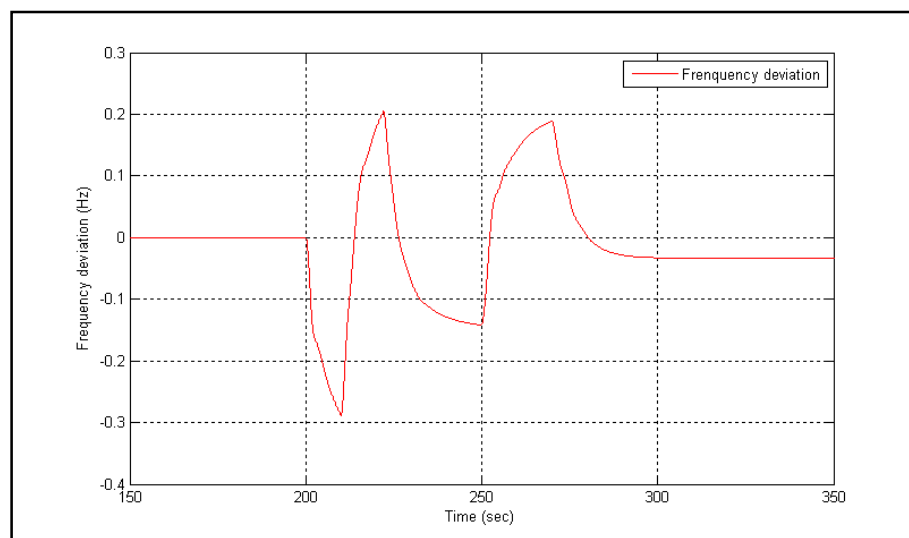


Figura 6.10 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$

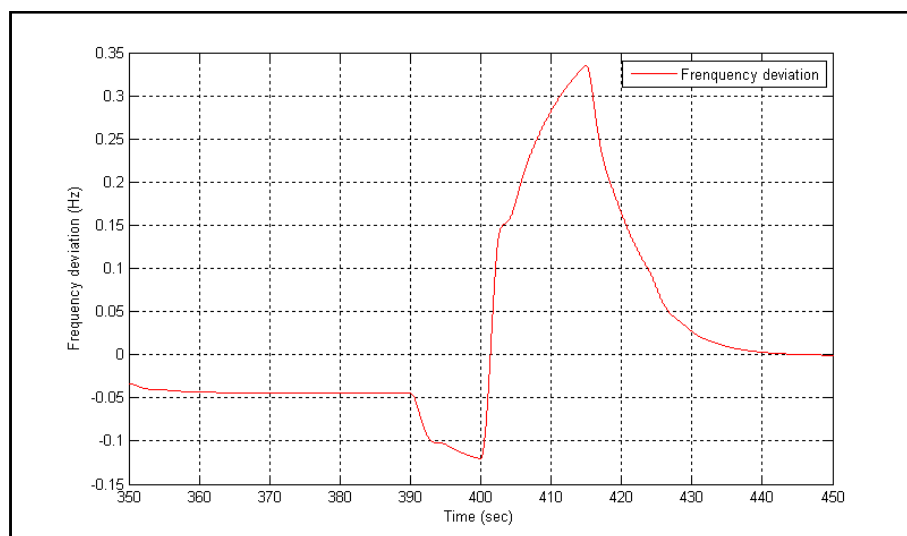


Figura 6.11 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$

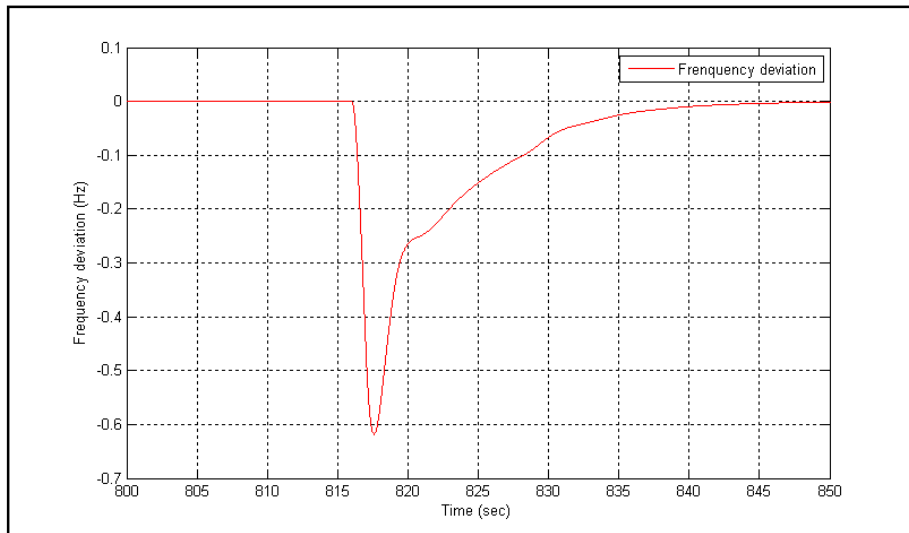


Figura 6.12 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$

Nas figuras 6.13 a 6.15 ilustra-se o comportamento dos grupos *diesel*, volante de inércia vs parque eólico bem como as consequências dessas variações no desvio de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

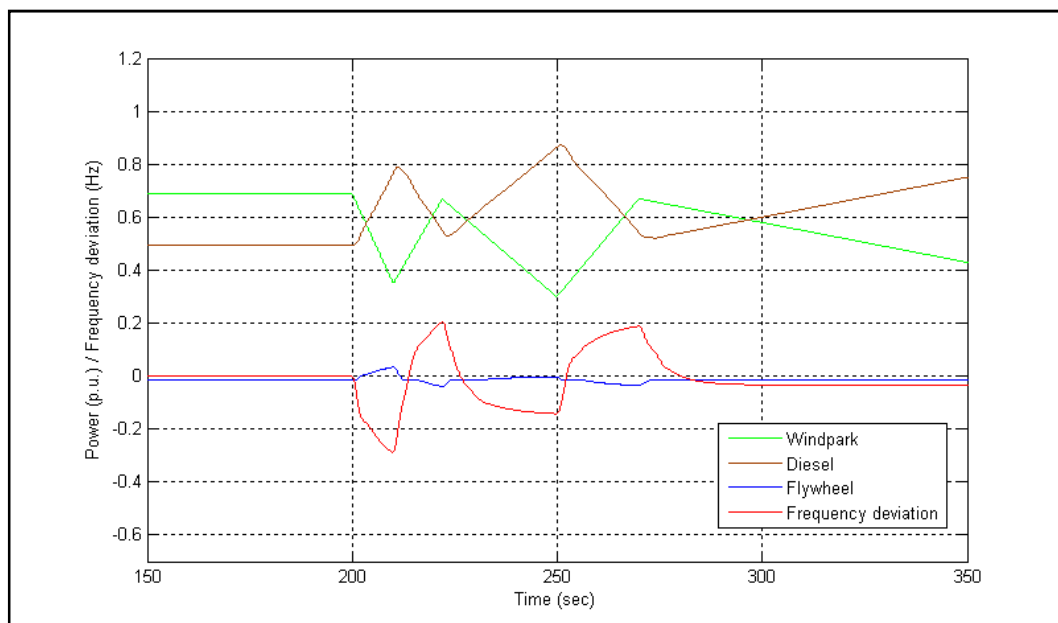


Figura 6.13 - Comportamento dos grupos *diesel*, volante de inércia vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$

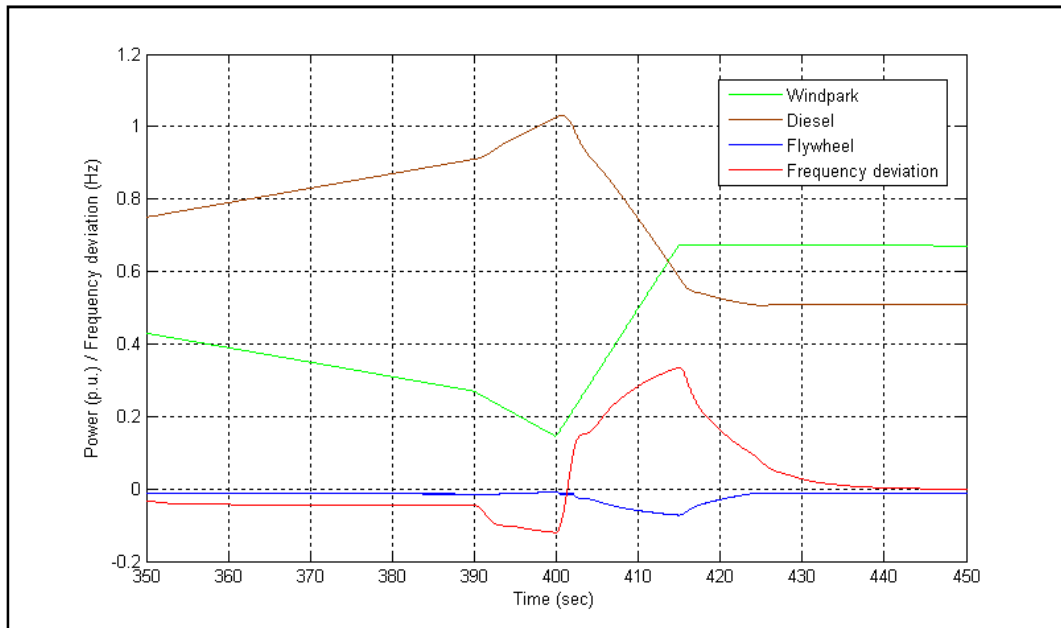


Figura 6.14 - Comportamento dos grupos *diesel*, volante de inércia vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$

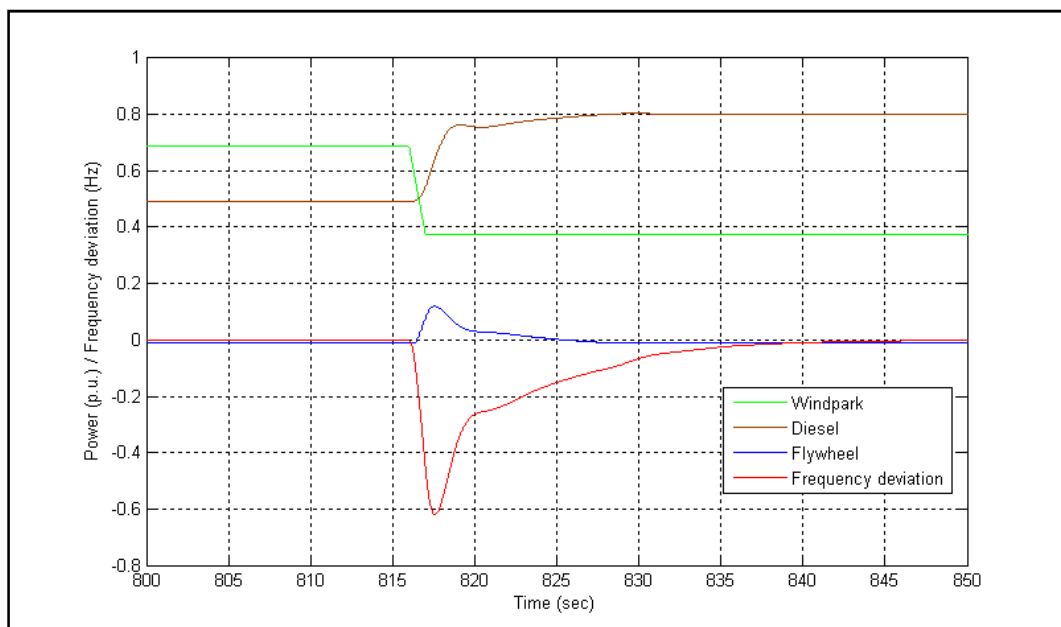


Figura 6.15 - Comportamento dos grupos *diesel*, volante de inércia vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$

6.3. Cenário B - *Hora de Ponta*

O cenário B corresponde ao período da hora de ponta do diagrama de cargas, pelas 19h00, as condições de operação iniciais do parque eólico e central térmica são as indicadas nas tabelas 6.3 e 5.4. A variação de potência do parque eólico é descrito na figura 5.15 assumindo-se a variação descrita no capítulo anterior. Aqui o limite de 688kW de produção máxima do parque eólico, devido aos limites técnicos mínimos dos grupos *diesel* já não se colocam pois a carga neste período já é substancialmente maior. De salientar que neste período estão em paralelo dois grupos diferentes que na hora de vazio. Para efeitos de uma melhor comparação entre cenários utilizou-se o mesmo sinal produzido para efeitos de simulação do parque eólico, somente com a alteração das condições iniciais.

Tabela 6.3 – Condições de operação iniciais - 0 segundos

Cenário B	
Ponta	2029 kW
Grupo 4	614 kW
Grupo 5	609 kW
Subtotal	1123 kW
% Diesel	60,28%
AG 1	99 kW
AG 2	108 kW
AG 3	299 kW
AG 4	300 kW
Subtotal	806 kW
% Eolica	39,72%

A carga da rede mantém-se constante nos 2.029kW havendo a variação somente da potência debitada pelo parque eólico e consequentemente a variação do restante sistema contribuidor da rede eléctrica.

6.3.1. Sem volante de inércia

A figura 6.16 ilustra a simulação do desempenho total, do sistema sem volante de inércia em funcionamento.

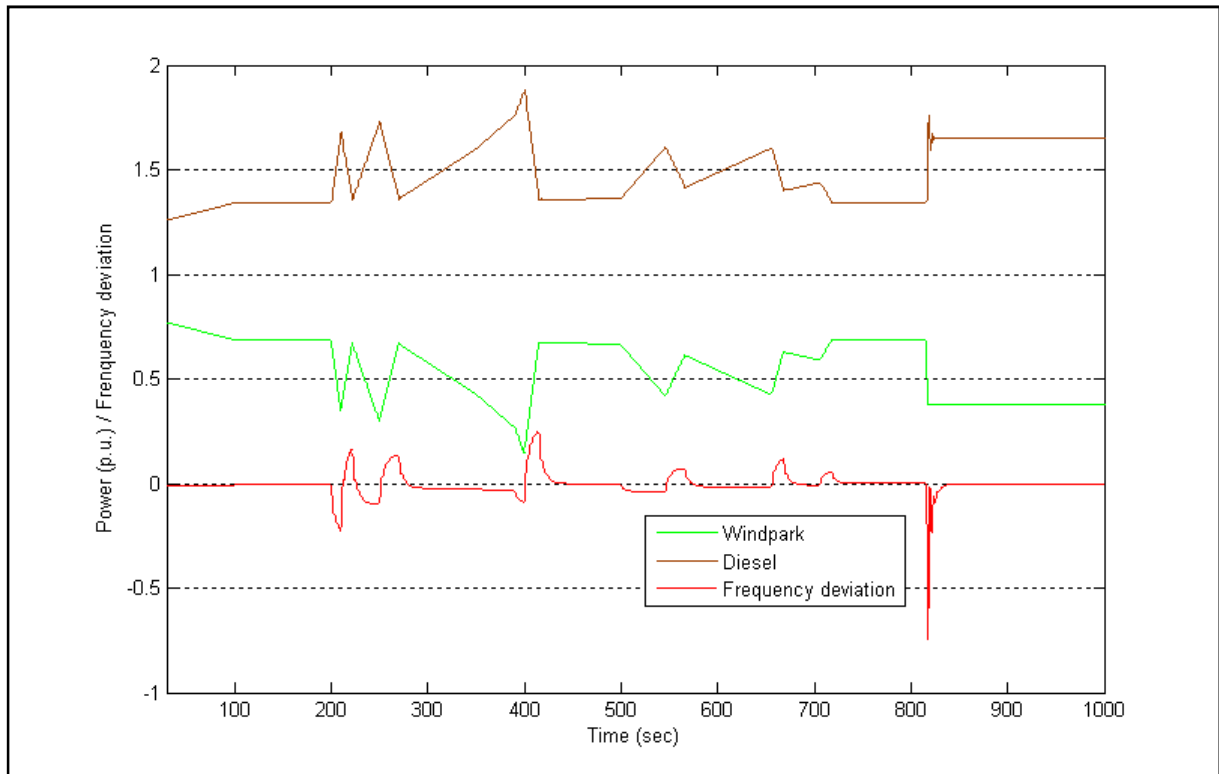


Figura 6.16 - Variação do sistema sem volante inércia na hora de ponta

Os maiores desvios de frequência em relação ao valor nominal de 50Hz observados são nos seguintes períodos.

Período de tempo $t=150s$ a $t=350s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,22 Hz$ e $\Delta f = +0,16 Hz$

Período de tempo $t=350s$ a $t=450s$ - Maior desvio: $\Delta f = +0,25 Hz$

Período de tempo $t=800s$ a $t=850s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,74 Hz$

Observando a maior sobrefrequência de $\Delta f = +0,25 Hz$ aos $t=415$ segundos e maior subfrequência de $\Delta f = -0,74 Hz$ aos $t=817$ segundos.

Nas figuras 6.17 a 6.19 poder-se-á observar os desvios de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

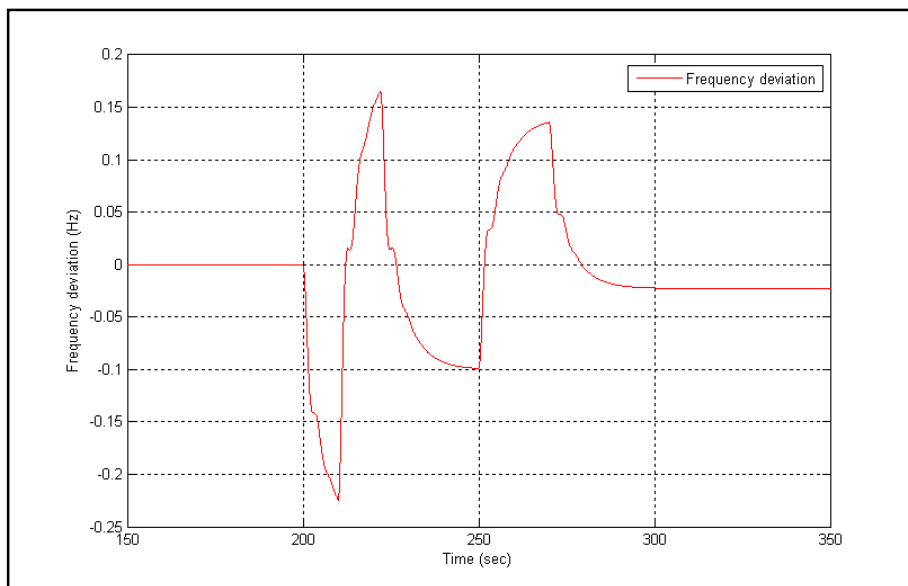


Figura 6.17 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$

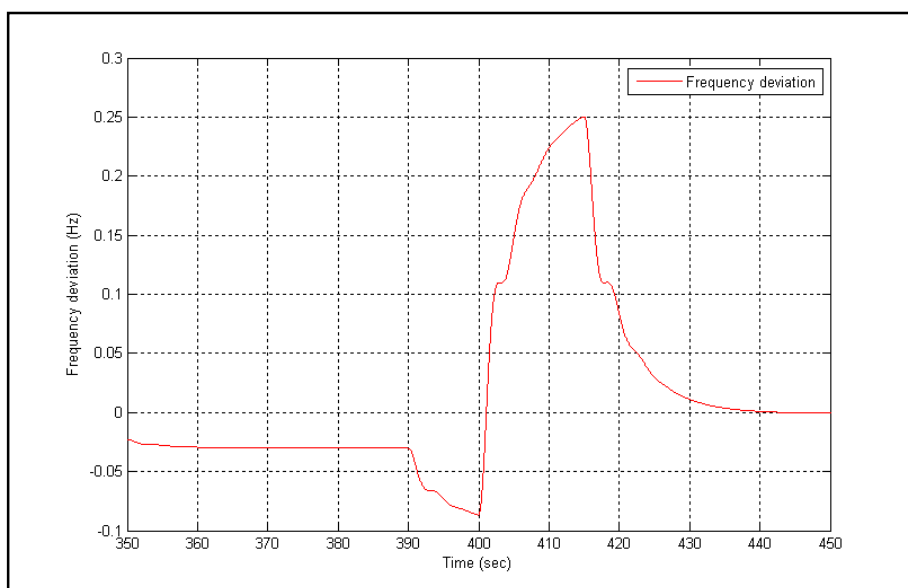


Figura 6.18 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$

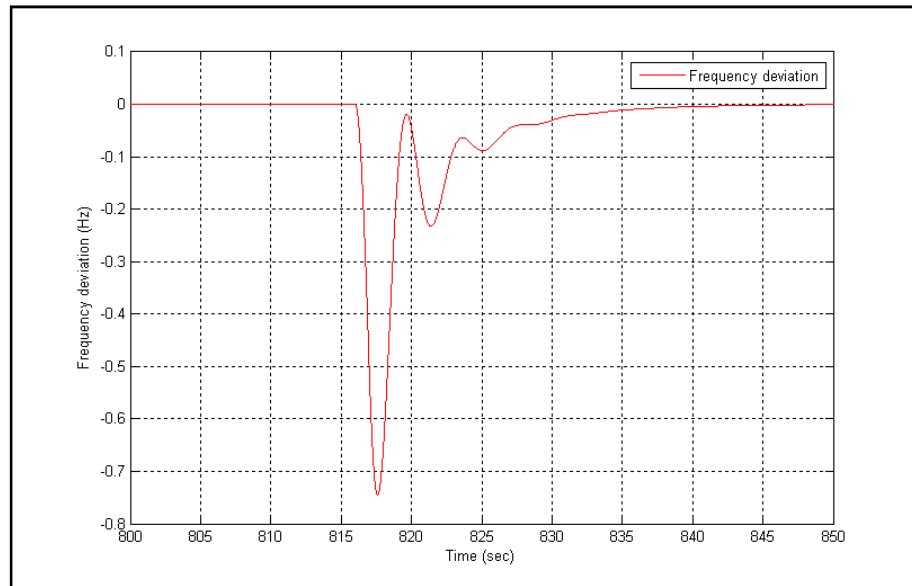


Figura 6.19 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800s$ a $t=850s$

Nas figuras 6.20 a 6.22 ilustra-se o comportamento dos grupos *diesel*, vs parque eólico bem como as consequências dessas variações no desvio de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

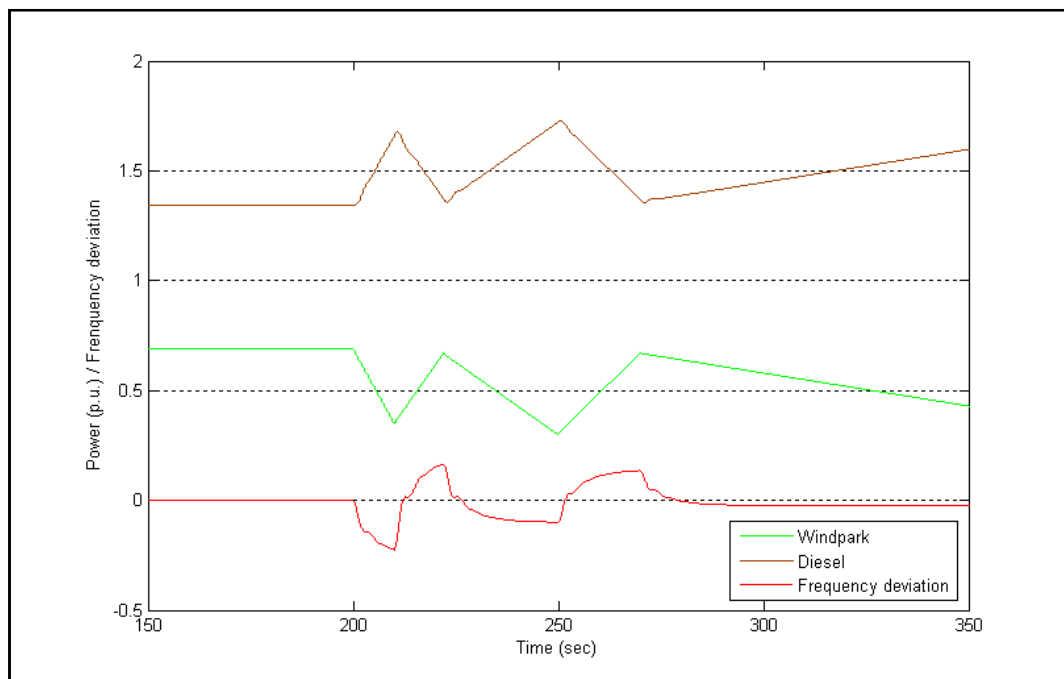


Figura 6.20 - Comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico no período $t=150s$ a $t=350s$

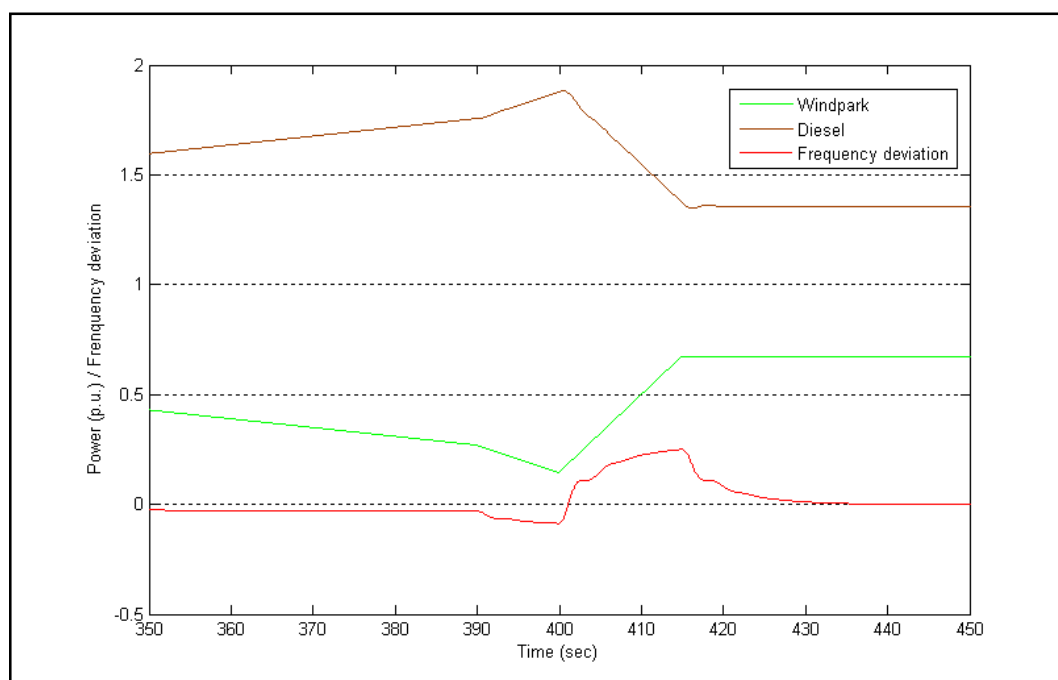


Figura 6.21 - Comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$

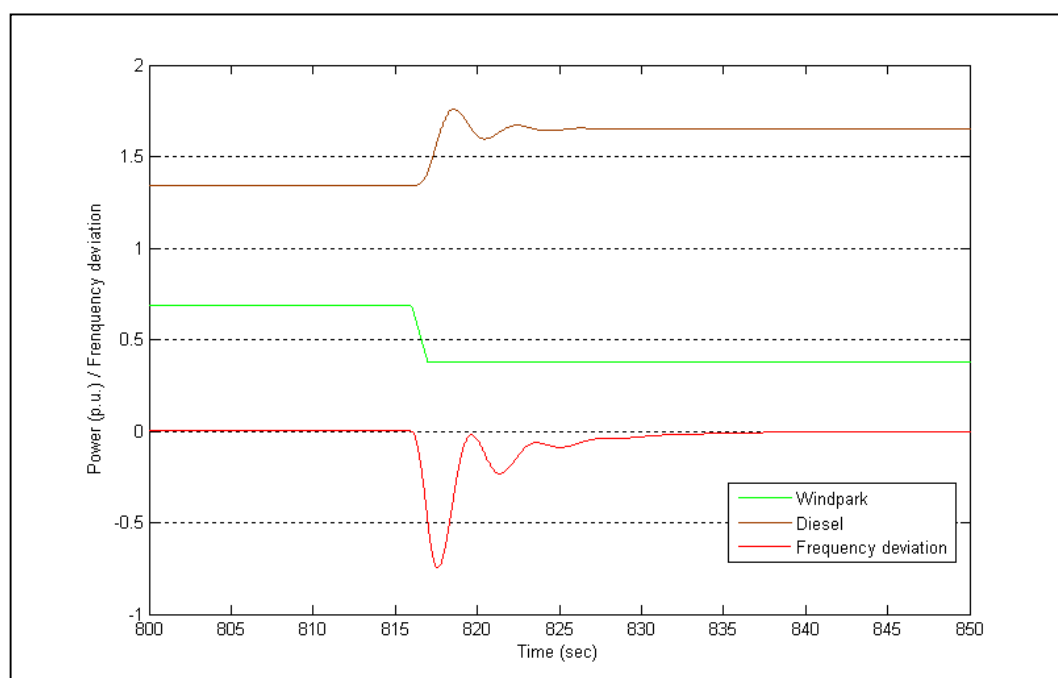


Figura 6.22 - Comportamento dos grupos *diesel* vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$

6.3.2. Com volante de inércia

A figura 6.23 ilustra a simulação do desempenho total, do sistema com volante de inércia em funcionamento.

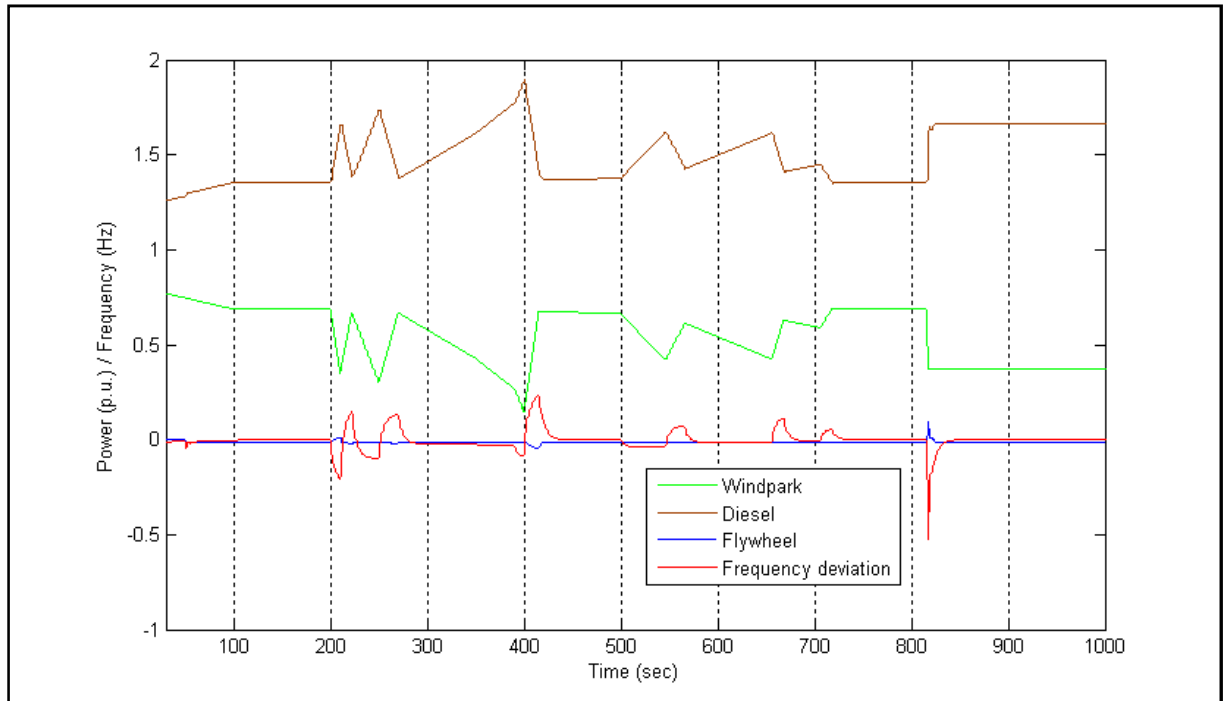


Figura 6.23 - Variação do sistema com volante inércia na hora de ponta

Os maiores desvios de frequência em relação ao valor nominal de 50Hz observados são nos seguintes períodos.

Período de tempo $t=150s$ a $t=350s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,20 Hz$ e $\Delta f = +0,15 Hz$

Período de tempo $t=350s$ a $t=450s$ - Maior desvio: $\Delta f = +0,23 Hz$

Período de tempo $t=800s$ a $t=850s$ - Maior desvio: $\Delta f = -0,52 Hz$

Observando a maior sobrefrequência de $\Delta f = +0,23 Hz$ aos $t=415$ segundos e maior subfrequência de $\Delta f = -0,52 Hz$ aos $t=817$ segundos.

Nas figuras 6.24 a 6.26 poder-se-á observar os desvios de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

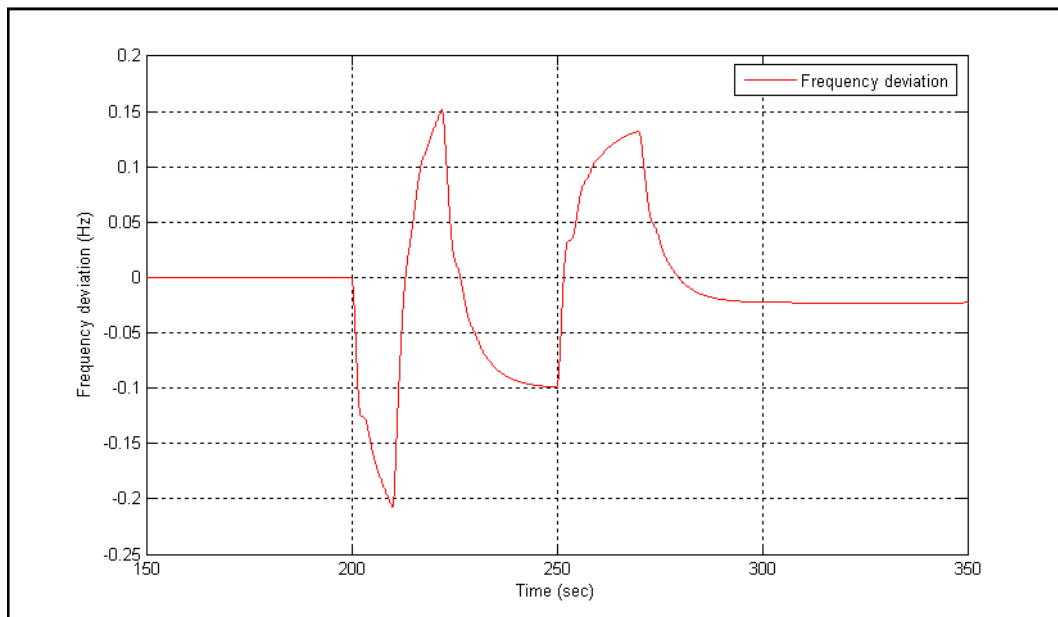


Figura 6.24 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=150s$ a $t=350s$

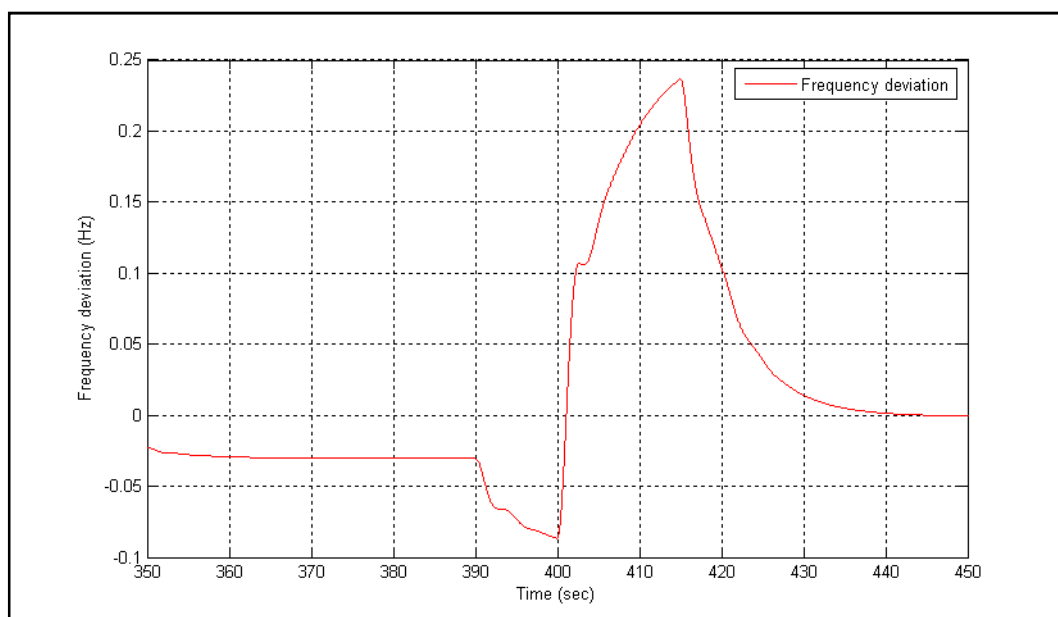


Figura 6.25 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=350s$ a $t=450s$

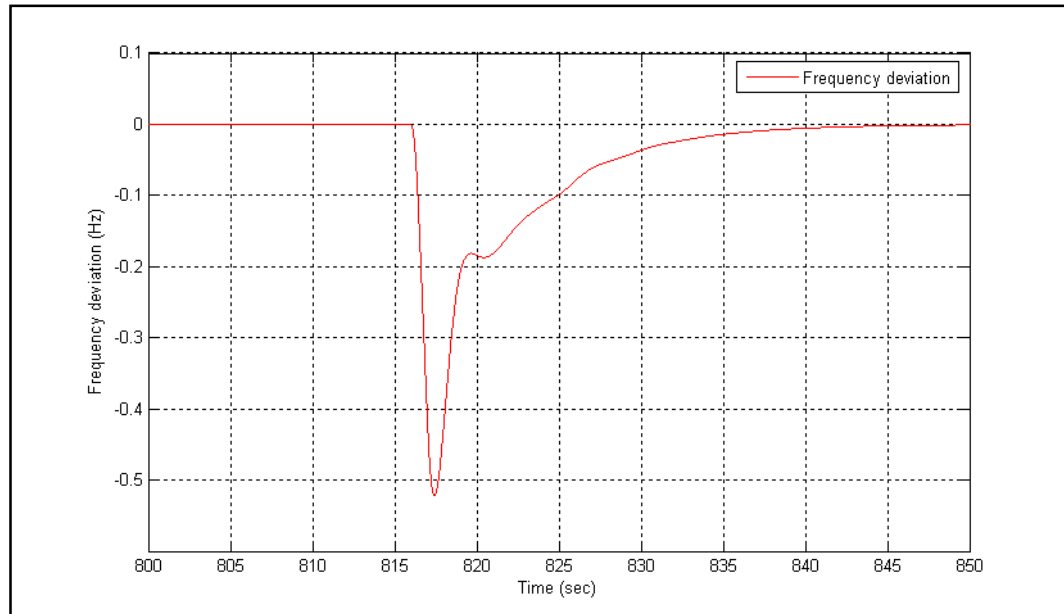


Figura 6.26 - Desvio de frequência Δf (Hz) no período $t=800$ s a $t=850$ s

Nas figuras 6.27 a 6.29 ilustra-se o comportamento dos grupos *diesel* e volante de inércia vs parque eólico bem como as consequências dessas variações no desvio de frequência nos respectivos períodos mais críticos.

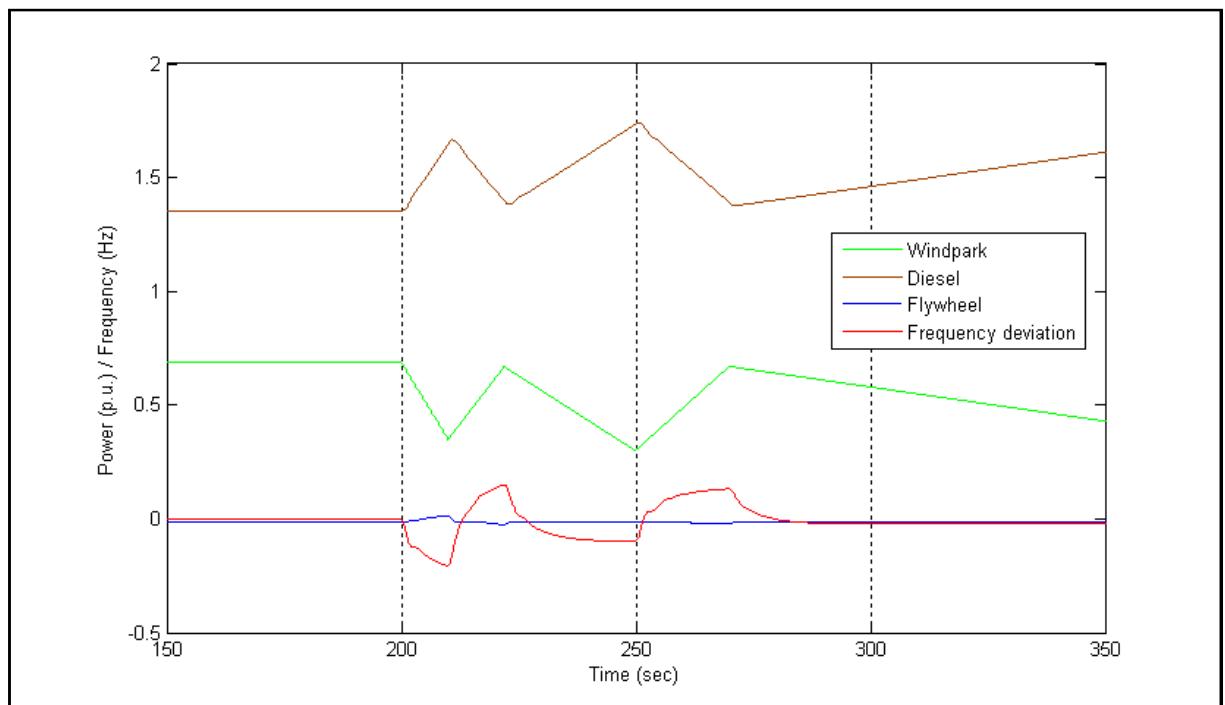


Figura 6.27 - Comportamento dos grupos *diesel* e volante de inércia vs parque eólico no período $t=150$ s a $t=350$ s

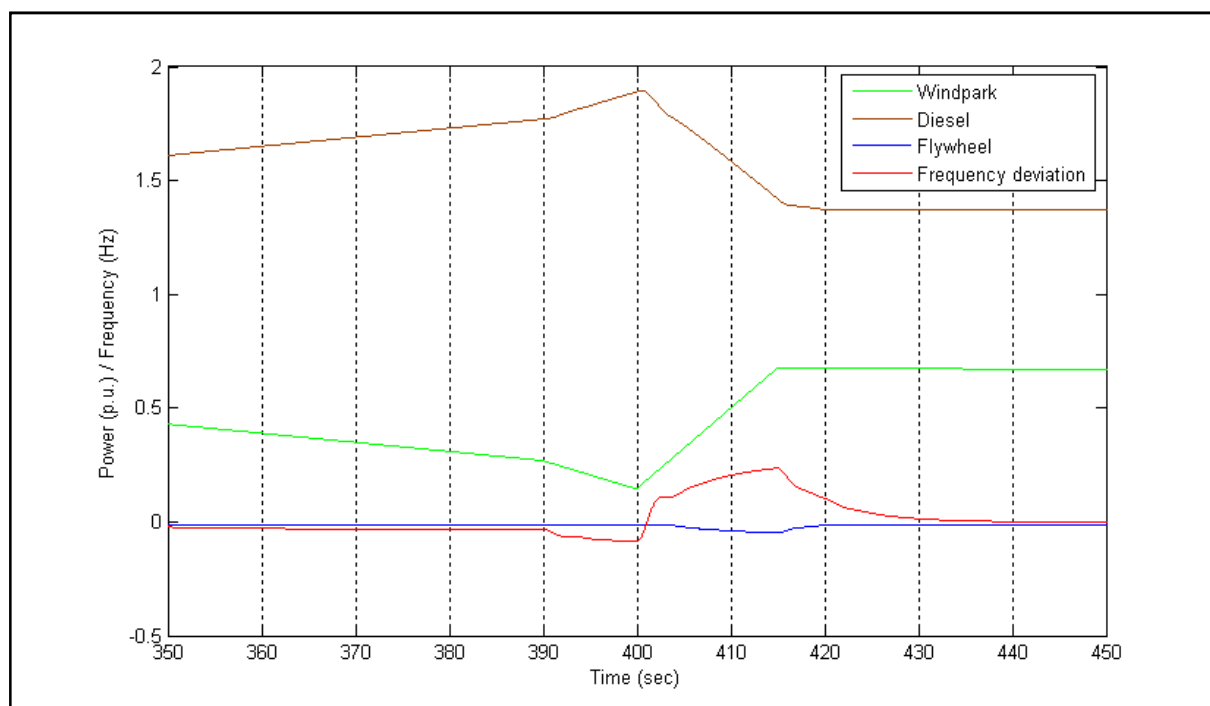


Figura 6.28 - Comportamento dos grupos *diesel* e volante de inércia vs parque eólico no período $t=350s$ a $t=450s$

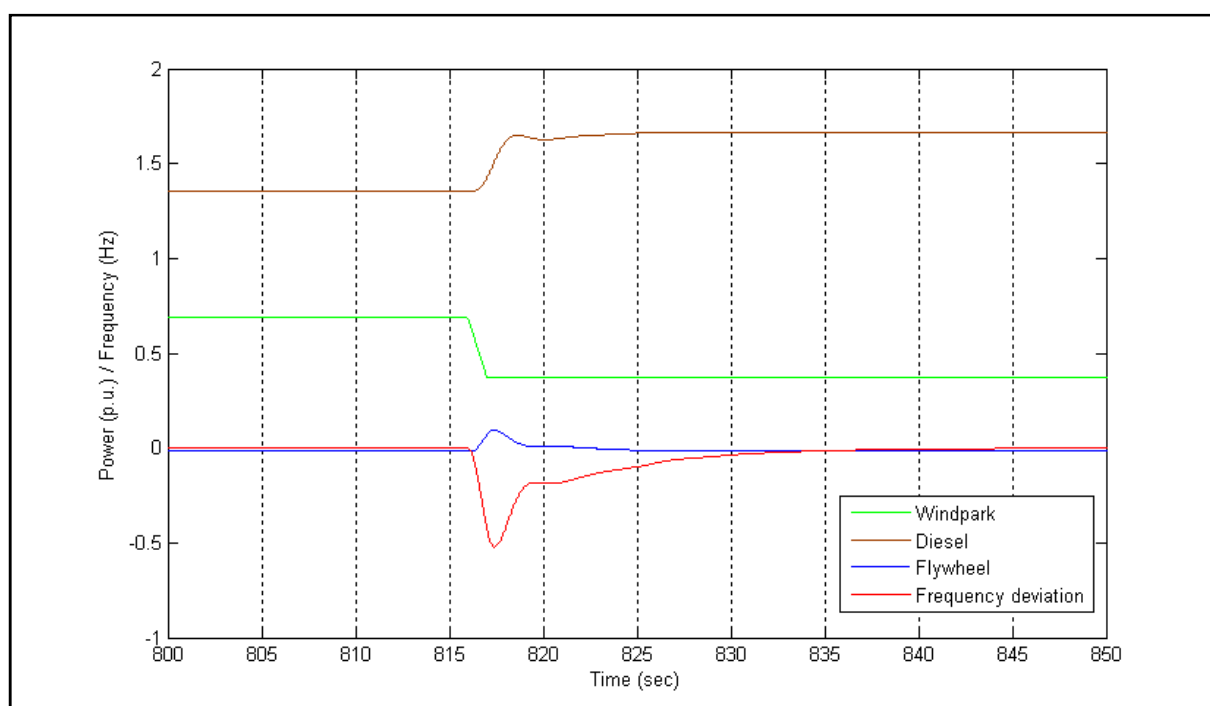


Figura 6.29 - Comportamento dos grupos *diesel* e volante de inércia vs parque eólico no período $t=800s$ a $t=850s$

6.4. Conclusões

As tabelas 6.4 e 6.5 foram elaboradas, tomando em consideração o comportamento do modelo nos dois cenários, nomeadamente do desvio de frequência em relação ao valor nominal de 50Hz, recalcando somente os períodos mais críticos da simulação.

Tabela 6.4 – Quadro resumo das subfrequências

DESVIO DE FREQUÊNCIA			
Cenário	Frequência	Δf	Período
Cenário A - sem V.I.	49,04 Hz	-0,96 Hz	817 s
Cenário A - com V.I.	49,39 Hz	-0,61 Hz	817 s
Cenário B - sem V.I.	49,26 Hz	-0,74 Hz	817 s
Cenário B - com V.I.	49,48 Hz	-0,52 Hz	817 s

Tabela 6.5 – Quadro resumo das sobrefrequências

DESVIO DE FREQUÊNCIA			
Cenário	Frequência	Δf	Período
Cenário A - sem V.I.	50,36 Hz	+0,36 Hz	415 s
Cenário A - com V.I.	50,33 Hz	+0,33 Hz	415 s
Cenário B - sem V.I.	50,25 Hz	+0,25 Hz	415 s
Cenário B - com V.I.	50,23 Hz	+0,23 Hz	415 s

O período mais desfavorável para uma maior penetração de energia eólica na rede eléctrica Ilha Graciosa é a hora do vazio. Caso existiam condições de velocidades de vento em que o parque eólico produza a sua potência nominal torna-se necessário que haja uma limitação em potência activa, para que os limites técnicos mínimos dos grupos não sejam atingidos. Será necessário reduzir pelo menos 150kW ($\approx 17\%$) ao valor nominal total, no caso de estarem em paralelo os dois grupos de menor potência, o que já acontece na exploração normal daquele sistema, pela via automática, conforme explicado no capítulo 2, através autómato do volante de inércia ou pela acção manual do operador de despacho. Na simulação foi tido em consideração esse valor pois com as variações de vento simuladas e com a produção expectável, poder-se-ia obter desvios de frequência ainda maiores devido à diferença de potência ser consideravelmente maior. Os piores casos de desvio de frequência em relação ao valor nominal de 50Hz foram encontrados quando houve uma redução de potência debitada pelo parque eólico.

No cenário A, na hora do vazio, sem volante inércia com uma redução de produção do parque eólico de 312KW referente a um disparo de um aerogerador, situação de pouca frequência ($\approx 0,5/\text{mês}$), registou-se um desvio de frequência de pico de $\Delta f = -0,96 \text{ Hz}$ com uma duração de aproximadamente 26 segundos até ao restabelecimento total de desvio de frequência a 0Hz, ilustrado na figura 6.5. Já com o volante de inércia em funcionamento a mesma perturbação teve um valor de pico de $\Delta f = -0,61 \text{ Hz}$ com uma duração de

aproximadamente 14 segundos até ao restabelecimento total de desvio de frequência a 0 Hz, ilustrado na figura 6.12, observando-se uma significativa melhoria do sistema. O valor de desvio de subfrequência registado ainda esteve um pouco afastado do disparo por deslastre da saída da subestação da Central Térmica da Graciosa referente à linha da Praia, $\Delta f = -1,5 \text{ Hz}$ a $1,5 \text{ s}$, conforme observa-se na tabela 6.1. Através da observação da figura 6.8 verifica-se que no momento da redução de produção do parque eólico, $t=816 \text{ s}$, os grupos *diesel* reagem, injectando mais potência activa havendo um pequeno *overshoot* positivo com um valor de 900kW, dois segundos ($t=819 \text{ s}$) após ao desvio máximo $\Delta f = -0,96 \text{ Hz}$, havendo após esse momento uma estabilização oscilatória em torno do valor a atingir 792kW. Na figura 6.15 com o volante de inércia os grupos *diesel* já não efectuam esse *overshoot* positivo atingindo suavemente o valor objectivo de 792kW, havendo uma reacção rápida do volante de inércia a essa subida de carga, estando este aos $t=817,9 \text{ s}$ com uma potência máxima de 200kW e suavemente essa carga foi sendo transferida do volante de inércia para os grupos *diesel* com uma redução grande, da componente oscilatória da estabilização da potência activa. A reposta mais rápida do volante de inércia comparativamente à dos grupos *diesel*, faz com que a frequência não atinja valores tão baixos e aproximando-se do valor nominal de forma mais suave sem oscilações como se pode comparar pelo seu comportamento ilustrado na figura 6.19 e 6.26, demonstrando aqui boa função do volante de inércia.

No cenário A, na hora do vazio, sem volante inércia quando o valor da potência gerada pelo parque eólico era baixo e de súbito aos $t=400 \text{ s}$ a velocidade do vento sobe e consequentemente a produção de potência activa igualmente em rampa de aproximadamente $dP/dt = 25 \text{ kW/s}$, observa-se na figura 6.7 que os grupos *diesel* acompanham essa redução de demanda de forma que a frequência do sistema suba e que haja um desvio de pico $\Delta f = +0,36 \text{ Hz}$. Os grupos *diesel* apresentam um pequeno *overshoot* negativo com um valor de 478kW, 0,16 segundos e uma pequena estabilização oscilatória, desprezável, após esse incremento de produção eólica ($t=816,16 \text{ s}$) estabilizando depois no valor objectivo de 500kW conforme ilustrado na figura 6.7. Com o volante de inércia em funcionamento conforme ilustrado na figura 6.14 após $t=400 \text{ s}$ este começa a absorver um pouco da potência activa que o parque eólico incrementou fazendo que a redução de potência dos grupos *diesel* fosse mais suave, o volante de inércia atingiu o valor máximo de consumo de potencia activa de 75kW transferindo esta suavemente para os grupos *diesel*, fazendo que estes não tenham *overshoot* negativo tendo-se atingindo somente o desvio de frequência de pico $\Delta f = +0,33 \text{ Hz}$ e um alcance à frequência nominal mas suave, havendo um pequena melhoria do sistema.

O período de ponta a que se refere o cenário B é o mais favorável a uma maior penetração de energia eólica na rede eléctrica da Ilha Graciosa. Nesse período a carga é substancialmente maior, quase que duplica, permitindo que o parque eólico não esteja limitado em termos de produção de potência activa, devido ao limite técnico mínimo dos grupos *diesel*. Paralelamente a esse factor, a percentagem de energia eólica em relação à produzida pelos grupos *diesel* é menor induzindo uma menor perturbação no sistema devido à variação da velocidade do vento. Igualmente conforme observado no cenário A observou-se no cenário B um melhor desempenho com o volante de inércia em funcionamento havendo desvios de frequência superiores e inferiores menores do que sem o funcionamento do volante de inércia. Observou-se a mesma interacção entre grupos *diesel*, volante de inércia, parque eólico e frequência do sistema do que no cenário A, conforme descrito anteriormente e como se ilustra nas figuras 6.16 a 6.29 devido ao sinal de simulação de produção eólica ser igual, mas sempre com desvios de frequência menores como ilustrado nas tabelas 6.4 e 6.5.

Capítulo 7

Conclusões globais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões globais do trabalho realizado, bem como os objectivos alcançados e são apresentadas algumas recomendações sobre estratégias de exploração do sistema eléctrico da Ilha Graciosa.

7.1. Objectivos alcançados

Sistemas de redes eléctricas isoladas quando existe um grande volume de produção de energia proveniente de parques eólicos possuem graves problemas de controlo de frequência da rede eléctrica, bem como na gestão dos limites técnicos mínimos de potência dos grupos geradores *diesel*.

As flutuações e variações da velocidade do vento prejudicam ainda mais a integração da energia eólica, principalmente quando esta tem uma quantidade percentual elevada no abastecimento total de energia eléctrica.

Pela pesquisa de mercado efectuada encontraram-se diversos fabricantes de volantes de inércia e sistemas associados. Verifica-se que existem diversas ofertas aplicáveis para redes isoladas e que o mercado não está restrito a um só fabricante.

Da análise dos casos reais constata-se que existe uma grande quantidade de energia eólica não utilizada, devido à limitação em potência dos aerogeradores, por parte dos operadores de despacho e pelo autómato do volante de inércia. Devendo-se às limitações técnicas impostas dos equipamentos e controlo de frequência da rede eléctrica, sendo somente conseguido uma grande diminuição dessa energia não utilizada com o auxílio do volante de inércia.

Verificou-se que com a integração de sistemas de armazenamento de energia do tipo volante de inércia consegue-se melhorar a performance do sistema, sendo possível uma ainda maior penetração de energia eólica na rede, em certos casos a diminuição de energia não aproveitada em cinco vezes ou mais. Verifica-se igualmente que existe um maior controlo da frequência da rede eléctrica, limitando-a a valores muito interessantes.

Foi constatado que no caso de defeitos de equipamentos produtores de energia e ou saídas de paralelo de aerogeradores com entradas de carga em “degrau” com valores elevados o volante de inércia auxilia o sistema eléctrico injectando a potência activa necessária para manutenção da frequência dentro dos parâmetros nominais e suavemente essa carga é assumida pelos grupos *diesel* em paralelo. Conclui-se igualmente que o período de pior integração de energia eólica é do de menor consumo do diagrama de cargas, o vazio.

Pelos históricos conclui-se que quanto maior for a penetração de energia eólica no sistema maior será o consumo específico dos grupos *diesel*. Com a integração do volante de inércia em sistemas de redes isoladas consegue-se que esse aumento de consumo seja inferior ao de sistemas sem o auxílio do volante de inércia. O facto de a carga entrar e sair mais suavemente dos grupos *diesel* proporciona que não haja um consumo superior de combustível nem haja grandes desgastes para os equipamentos mecânicos do que sem integração do volante de inércia.

7.2. Recomendações de exploração

Volantes de inércia integrados em sistemas de redes isoladas são sem dúvida uma mais-valia para o sistema, conseguindo-se grandes melhorias de aproveitamento de energia eólica, controlo de frequência da rede eléctrica, menores consumos específicos e menores desgastes para os grupos geradores *diesel*.

No caso da Ilha Graciosa constata-se que existe uma grande quantidade de energia eólica não aproveitada, nomeadamente nos períodos de vazio, mas um bom controlo de frequência da rede eléctrica e exploração dos grupos *diesel* existentes. Com o auxílio do volante de inércia é possível diminuir a energia rejeitada que advém da limitação de potência activa por parte dos operadores de despacho e automático do volante de inércia ao parque eólico. Nota-se que mesmo com o sistema automático de limitação de potência aos aerogeradores, pelo volante de inércia, os operadores mantêm o parque eólico limitado demasiado tempo, por uma questão de receio do sistema ou por uma outra razão pessoal ou técnica. Este procedimento deverá ser desencorajado bem como tecnicamente deverá ser analisado com mais detalhe.

Constata-se que os grupos *diesel* possuem praticamente a mesma potência nominal fazendo muito pouca diferença de potência entre eles. Situação que não é a mais adequada para sistemas de elevada penetração eólica pois nos períodos do vazio poderia haver uma maior quantidade de energia eólica aproveitada se houvesse pelo menos dois grupos *diesel* com metade da potência dos restantes.

Deverá ser continuada o investimento em energias renováveis na Ilha Graciosa bem como o aumento da capacidade instalada no Parque Eólico da Serra Branca com aerogeradores que permitam o controlo de potência activa e reactiva por sistemas automáticos e eficientes de controlo da rede eléctrica, ficando o operador de despacho somente com a tarefa de supervisão do sistema.

Referências

- [1] Wikipédia. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Graciosa>. Acesso em 1 Junho de 2010.
- [2] ESA- *Energy Storage Association*. Disponível em <http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/flywheels/> Acesso em 12 Junho 2010
- [3] Paisley MA, Overend RP. “Verification of the performance of future energy resources’ SilvaGasw biomass gasifier—operating experience in the Vermont gasifier”.
- [4] Björn Bolund, Hans Bernhoff and Mats Leijon. “Flywheel energy and power storage systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 11 pp. 235-258. Uppsala, Suécia; Fevereiro 2007.
- [5] Beaconpower. Disponível em <http://www.beaconpower.com/> Acesso em 12 Junho 2010
- [6] Enercon. Disponível em http://www.enercon.de/pt/_home.htm Acesso em 12 Junho 2010
- [7] Powercorp. Disponível em <http://www.pcorp.com.au> Acesso em 12 Junho 2010
- [8] António J.A. Simões Costa e Aguinaldo S. e Silva, *Controlo e Estabilidade de Sistemas Eléctricos de Potência*, Florianópolis, Agosto de 2000

ANEXO A

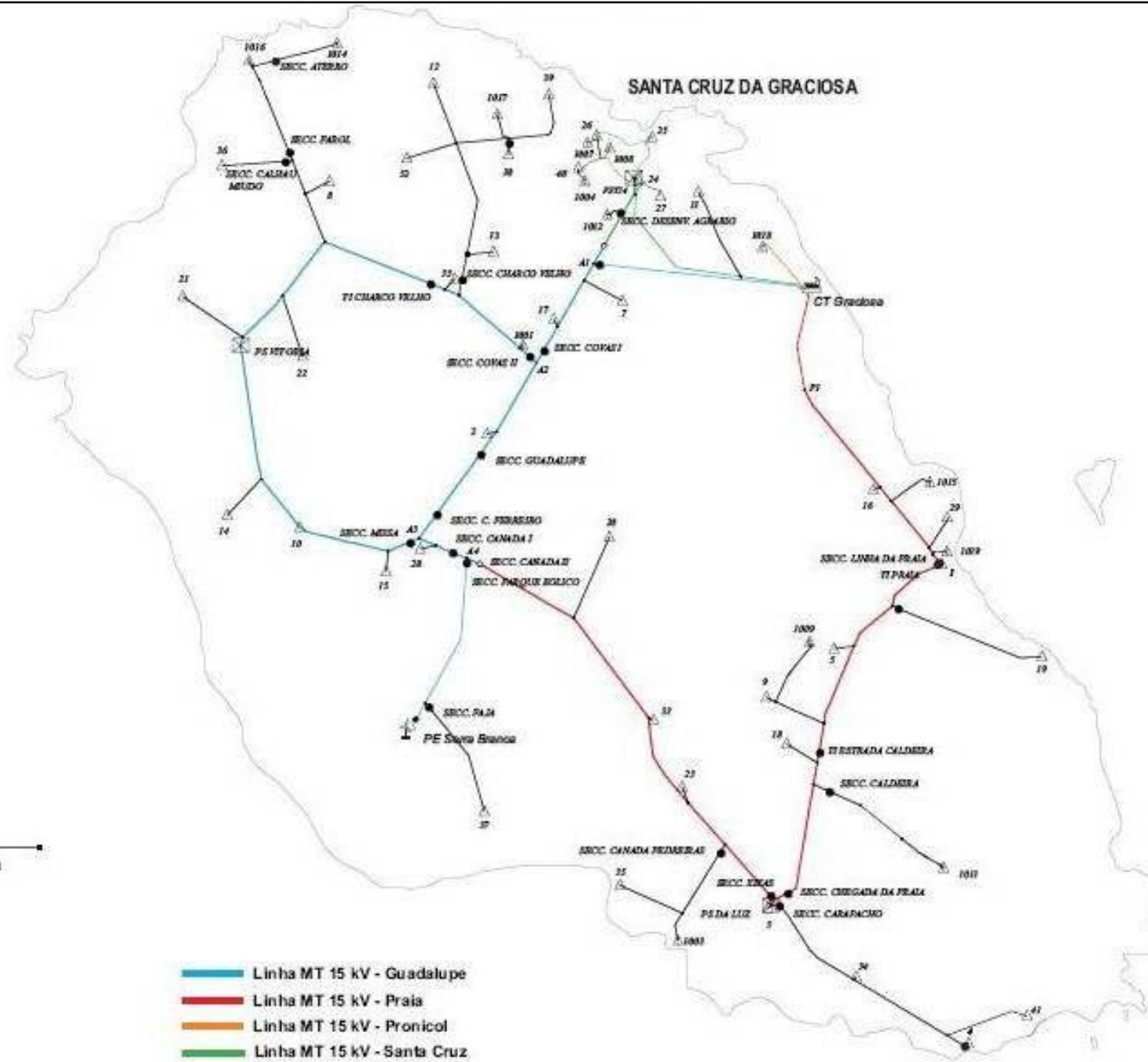
Caracterização da rede distribuição MT da Ilha Graciosa

SANTA CRUZ DA GRACIOSA



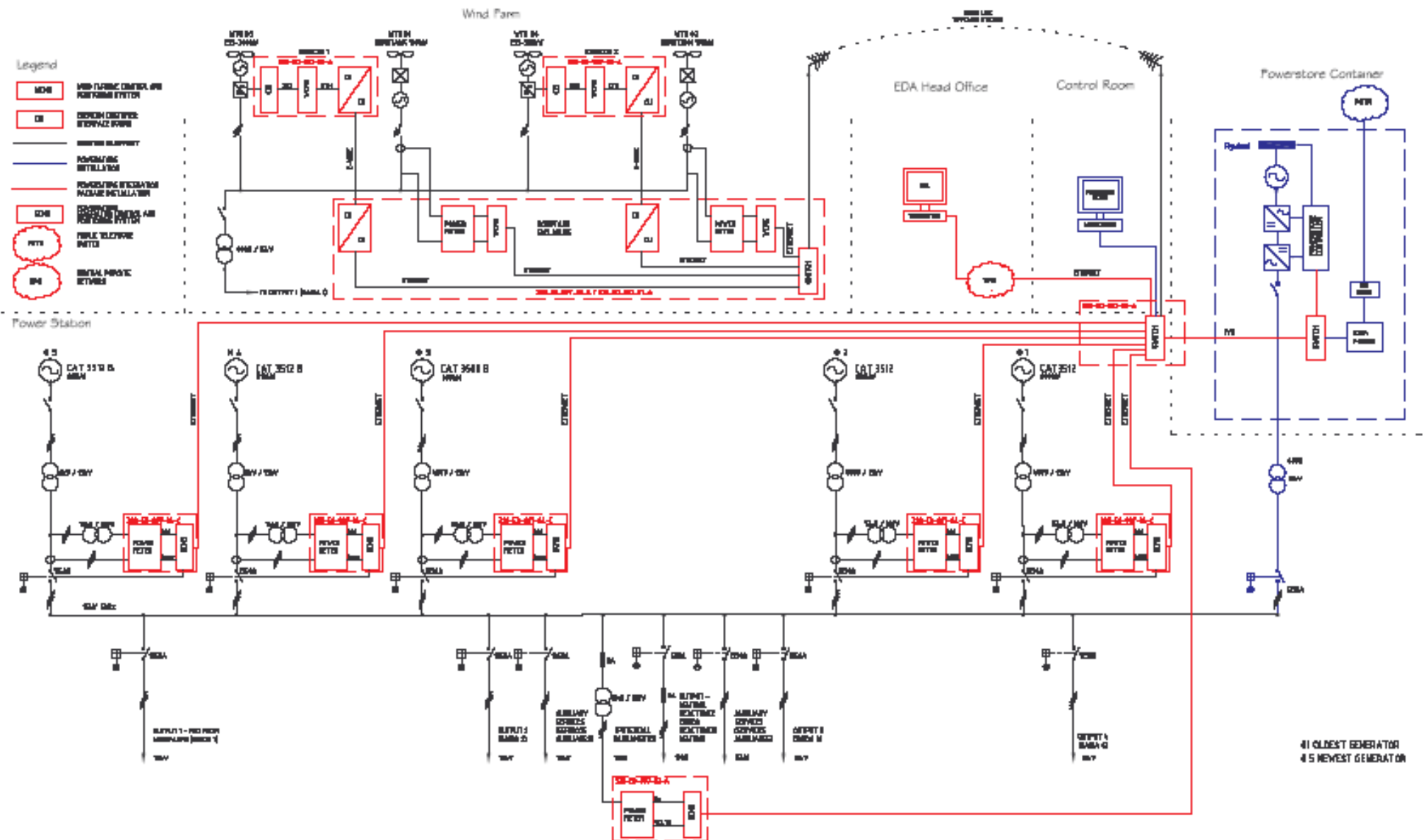
1 km

- Linha MT 15 kV - Guadalupe
- Linha MT 15 kV - Praia
- Linha MT 15 kV - Pronicol
- Linha MT 15 kV - Santa Cruz



ANEXO B

Esquema unifilar da integração do sistema *PowerStore*, sem novo grupo termoelectrico n.º6



ANEXO C

Mapas resumo de produções e consumos anuais (2005 a 2009) da Central Térmica da Ilha Graciosa, Parque Eólico da Serra Branca e volante de inércia.

Ano	Mês	Central Térmica da Graciosa				Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
		Produção	Consumo diesel	Consumo Esp. (L/KWh)		Produção	Auxiliares	Produção	Consumo	Auxiliares
		MWh	Litros	Mensal	Anual	MWh	(KWh)	(MWh)	(KWh)	(KWh)
2005	Janeiro	834,61	206102	0,246944082	0,260395675	190,96	95,40	0,00	0,00	0,00
	Fevereiro	725,4	177030	0,244044665		192,8	90,00	0,00	0,00	0,00
	Março	728,3	188328	0,258585748		183,31	243,1	0,00	0,00	0,00
	Abril	722,93	188945	0,261360021		180,43	128,8	0,00	0,00	0,00
	Maio	771,69	200814	0,260226257		120,98	338,1	0,00	0,00	0,00
	Junho	837,53	217057	0,259163254		81,00	409,50	0,00	0,00	0,00
	Julho	939,33	244154	0,259923563		73,41	670,00	0,00	0,00	0,00
	Agosto	969,23	259905	0,268156165		42,54	3191,7	0,00	0,00	0,00
	Setembro	916,37	241996	0,264081103		78,85	527,9	0,00	0,00	0,00
	Outubro	792,56	210692	0,265837287		208,83	153,2	0,00	0,00	0,00
	Novembro	809,36	217890	0,269212711		140,49	192,1	0,00	0,00	0,00
	Dezembro	864,36	228043	0,263828729		182,08	247,8	0,00	0,00	0,00

Ano	Mês	Central Térmica da Graciosa				Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
		Produção	Consumo diesel	Consumo Esp. (L/KWh)		Produção	Auxiliares	Produção	Consumo	Auxiliares
		MWh	Litros	Mensal	Anual	MWh	(KWh)	(MWh)	(KWh)	(KWh)
2006	Janeiro	844,92	227268	0,268981679	0,265229203	163,44	213	0,00	0,00	0,00
	Fevereiro	725,61	193391	0,266521961		169,37	270,6	0,37	11339,32	3900,00
	Março	862,37	224367	0,260174867		147,64	685,6	0,26	9879,40	3900,00
	Abril	805,27	210252	0,261095036		142,67	704	0,06	0,01	3032,00
	Maio	863,60	208194	0,241076887		121,22	276,4	0,17	7328,72	3291,00
	Junho	907,36	239718	0,264192823		91,88	251,9	0,14	12547,84	3244,30
	Julho	1027,35	281832	0,274329099		75,12	790,9	0,00	9903,63	4116,90
	Agosto	1104,59	299226	0,270893273		77,19	784,5	0,18	9870,48	5608,90
	Setembro	863,68	233063	0,269848787		189,47	66,3	0,19	5337,60	3660,40
	Outubro	798,72	222030	0,277982272		207,3	77,1	0,00	7139,30	560,10
	Novembro	794,21	205812	0,259140530		273,58	214,5	0,22	11712,32	4056,40
	Dezembro	870,76	231383	0,265725343		227,91	192,5	0,25	5057,68	4782,30

Ano	Mês	Central Térmica da Graciosa				Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
		Produção	Consumo diesel	Consumo Esp. (L/KWh)		Produção	Auxiliares	Produção	Consumo	Auxiliares
		MWh	Litros	Mensal	Anual	MWh	(KWh)	(MWh)	(KWh)	(KWh)
2007	Janeiro	874,83	229376	0,262194941	0,261790265	206,26	182,4	0,14	10637,88	4483,10
	Fevereiro	762,00	204974	0,268994751		245,81	116,5	0,57	12253,32	4947,90
	Março	912,55	251120	0,275184921		115,65	198,4	0,09	10015,77	4401,20
	Abril	823,24	203790	0,247546281		182,07	151,2	0,10	9399,29	4550,80
	Maio	857,14	225169	0,262698042		148,37	305,5	0,11	15,53	3135,90
	Junho	828,72	194462	0,234653441		212,37	178,9	0,10	3919,40	3500,00
	Julho	1044,85	251720	0,240914964		111,87	181,8	0,04	10547,12	4669,00
	Agosto	1120,44	303362	0,270752561		98,36	590,7	0,03	11777,59	5239,60
	Setembro	1043,78	283626	0,271729675		92,76	623	0,01	5532,26	2859,70
	Outubro	1010,09	269150	0,266461404		191,2	400,9	0,06	8353,54	3872,90
	Novembro	929,18	246320	0,265093954		128,92	433,1	0,01	3471,60	1701,10
	Dezembro	1031,18	278930	0,270495937		118,08	132,6	0,06	10046,43	4307,20

Ano	Mês	Central Térmica da Graciosa				Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
		Produção	Consumo diesel	Consumo Esp. (L/KWh)		Produção	Auxiliares	Produção	Consumo	Auxiliares
		MWh	Litros	Mensal	Anual	MWh	(KWh)	(MWh)	(KWh)	(KWh)
2008	Janeiro	1035,88	260526	0,251502104	0,253192013	114,53	193,8	0,05	4403,87	2338,60
	Fevereiro	998,43	243132	0,243514317		97,75	715,2	0,06	11551,49	4996,00
	Março	961,11	241626	0,251403065		140,19	146,4	0,09	9885,49	4184,00
	Abril	949,87	233735	0,246070515		133,86	281,3	0,08	8645,96	4115,40
	Maio	997,94	255600	0,256127623		123,64	274,6	0,11	641,96	2091,40
	Junho	1032,02	262748	0,254595841		92,08	444,9	0,14	1,42	2097,20
	Julho	1142,29	267117	0,233843420		78,11	314,4	0,03	8941,28	4092,10
	Agosto	1165,58	306683	0,263116217		66,57	634,9	0,01	10925,44	5312,30
	Setembro	1059,72	279872	0,264099951		115,79	183,9	0,04	10945,64	5187,00
	Outubro	1101,49	284472	0,258261083		104,34	371,9	0,06	11366,19	5404,00
	Novembro	955,5	249011	0,260608059		185,69	92,2	0,16	10550,52	4654,30
	Dezembro	1034,33	263708	0,254955382		169,69	309,9	0,10	11425,18	5038,00

Ano	Mês	Central Térmica da Graciosa			Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
		Produção MWh	Consumo diesel Litros	Consumo Esp. (L/KWh) Mensal Anual	Produção MWh	Auxiliares (KWh)	Produção (MWh)	Consumo (KWh)	Auxiliares (KWh)
2009	Janeiro	1025,59	263301	0,256731247	145,03	506,8	0,17	10233,23	4450,40
	Fevereiro	973,98	254419	0,261215836	72,28	166,4	0,13	4013,60	2826,00
	Março	999,81	256640	0,256688871	128,02	0	0,09	8652,16	3909,70
	Abril	955,21	246043	0,257580009	148	0	0,25	10896,76	4992,00
	Maio	1011,71	262883	0,259840270	120	1	0,10	10105,37	4469,30
	Junho	943,74	243455	0,257968296	135	0	0,07	10380,40	4628,60
	Julho	1095,08	288186	0,263164335	145	0	0,07	14610,24	6713,90
	Agosto	1166,56	316327	0,271162221	52	1000	0,04	9465,17	7124,70
	Setembro	1104,92	281875	0,255108967	104	1	0,04	8800,64	1452,90
	Outubro	998,93	261216	0,261495801	207	0	0,09	10800,18	4678,40
	Novembro	1002,12	257240	0,256695805	128	1000	0,12	489,43	1288,70
	Dezembro	927,91	236806	0,25520363	176	0	0,00	0,00	888,30

Tabela resumo:

Ano	Central Térmica da Graciosa			Parque Eólico S.B.		Volante de Inércia		
	Produção MWh	Consumo diesel Litros	CE(L/KWh)	Produção MWh	Auxiliares (KWh)	Produção (MWh)	Consumo (MWh)	Auxiliares (MWh)
2005	9.911,67	2.580.956,00	0,26040	1.675,68	6,29	0,00	0,00	0,00
2006	10.468,44	2.776.536,00	0,26523	1.886,79	4,53	1,84	90,12	40,15
2007	11.238,00	2.941.999,00	0,26179	1.851,72	3,50	1,32	95,97	47,67
2008	12.434,16	3.148.230,00	0,25319	1.422,24	3,96	0,93	99,28	49,51
2009	12.205,56	3.168.391,10	0,25959	1.560,33	2,68	1,17	98,45	47,42

ANEXO D

Especificações técnicas do volante de inércia *POWERSTORE 500, Powercorp*

DATA SHEET



PowerStore 500

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.....Yes¹
- Paralleling of units Yes

Technical Data

- Nominal kVA rating (@ 415V) +/- 500kVA
- Nominal kW rating (@ 415V) +/- 500kW
- Nominal kvar rating* (@ 415V) +/- 500kvar
- Nominal Current rating 720 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
- 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%²
- Minimum Charging Power spin-up 35 kW
- Nominal DC-link voltage..... 700 Vdc

Dimensions and Weights

Same as Standard Hi-Cube20' Shipping Container

- Dimensions (D x W x H)..... 6000 x 2400 x 2900 mm
- Weight..... 12,520 kg
- Cooling..... Refrigerative

¹ up to the fault current limit

² excluding 12-15kW spinning and inverter losses

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, NextG

ANEXO E

Relatórios de frequência EDA do dia 16 Março 2008



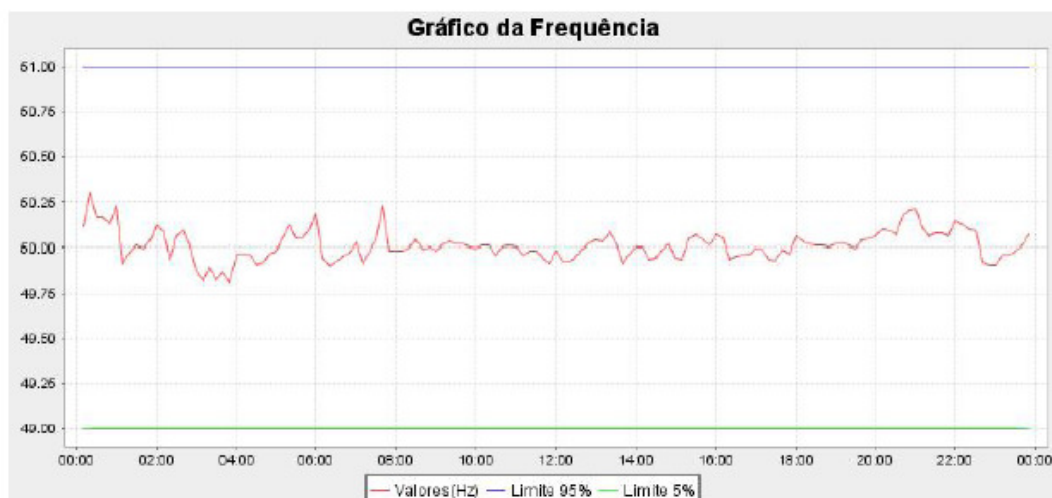
Electricidade dos Açores

Relatório de Frequência

Instalação	4SE01_15B1	Método	10 m
Início Intervalo	2008-11-16 00:00:00.000		
Fim Intervalo	2008-11-16 23:59:00.000		

100%				99%				95%				% Conformes	
max		min		max		min		max		min			
Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%	95%	100%
50.508	1.015	49.582	-0.836	50.457	0.914	49.638	-0.725	50.342	0.684	49.75	-0.499	100.0	100.0

Limites de Variação	100%				95%					
	max		min		max		min			
	Hz	%	Hz	%	Hz	%	Hz	%	% Inválidos	% Em Falta
	57.5	15.0	42.5	-15.0	51.0	2.0	49.0	-2.0	1.4	0.69



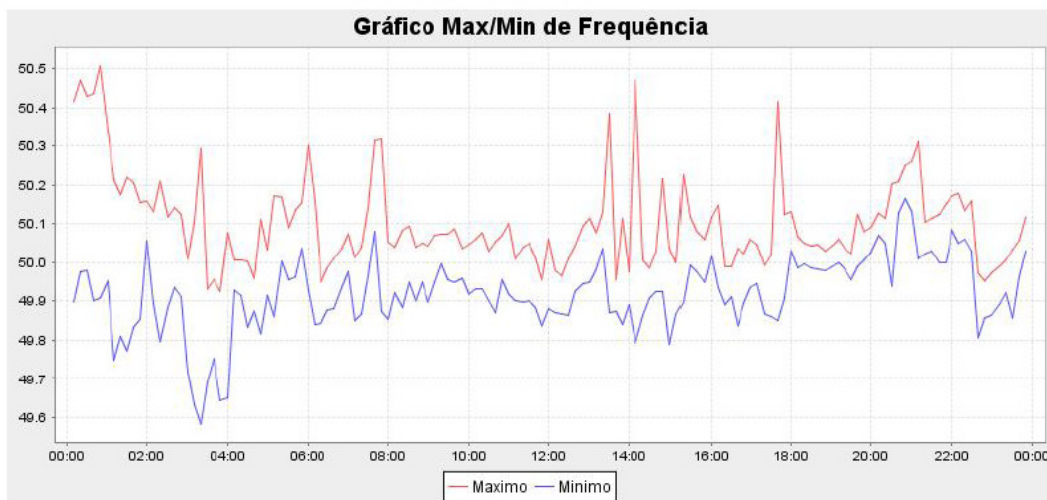
O valor da frequência é integrado ao longo de períodos de 10 ciclos (~200 milissegundos) e, a seguir, estes valores são agregados em períodos de 10 segundos. Na ausência de valores de 10 segundos, são utilizados os dados de 10 minutos. Para o intervalo de tempo seleccionado são determinados os percentis de 95%, 99% e 100%. O significado do percentil máximo de x% é o seguinte: x% dos valores registados são inferiores ao percentil máximo de x%. O significado do percentil mínimo de x% é o seguinte: x% dos valores registados são superiores ao percentil mínimo de x%. São igualmente indicadas as percentagens de valores dentro dos limites para 95% do tempo e para 100% do tempo. Os valores inválidos (marcados originalmente nos aparelhos de medida ou correspondentes a períodos onde houve interrupções na tensão de medida) não são considerados para o cálculo dos percentis.



Electricidade dos Açores

Gráfico Max/Min de Frequência

Instalação	4SE01_15B1
Início Intervalo	2008-11-16 00:00:00.000
Fim Intervalo	2008-11-16 23:59:00.000



O valor da frequência é integrado ao longo de períodos de 10 ciclos (~200 milissegundos) e este gráfico representa os valores máximos e mínimos atingidos em cada intervalo de 10 minutos. A frequência não pode ultrapassar os limites de 47 – 53 Hz no continente ou 42,5 – 57,5 Hz nas ilhas.