

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TIAGO MALAVAZI DE CHRISTO

**UMA PROPOSTA DE MATRIZ ENERGÉTICA PARA A ESTAÇÃO
ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ: UMA EXPERIÊNCIA
APLICÁVEL A NOVAS EDIFICAÇÕES**

VITÓRIA
2012

TIAGO MALAVAZI DE CHRISTO

**UMA PROPOSTA DE MATRIZ ENERGÉTICA PARA A ESTAÇÃO
ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ: UMA EXPERIÊNCIA
APLICÁVEL A NOVAS EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr^a. Jussara Farias Fardin.
Co-orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

VITÓRIA
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C556p Christo, Tiago Malavazi de, 1983-
Uma proposta de matriz energética para a Estação Antártica Comandante Ferraz : uma experiência aplicável à novas edificações / Tiago Malavazi de Christo. – 2012.
198 f. : il.

Orientador: Jussara Faria Fardin.
Coorientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia elétrica e calor - Cogeração. 3. Estação Antártica Comandante Ferraz. I. Fardin, Jussara Farias. II. Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

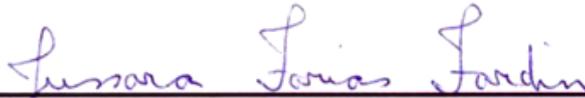
TIAGO MALVAZI DE CHRISTO

**UMA PROPOSTA DE MATRIZ ENERGÉTICA PARA ESTAÇÃO
ANTARTICA COMANDANTE FERRAZ: UMA EXPERIÊNCIA
APLICÁVEL À NOVAS EDIFICAÇÕES**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de outubro de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA

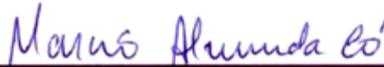


Prof.^a Dr.^a Jussara Farias Fardin - Orientadora
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti - Co-orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Márcio Almeida Có
Instituto Federal do Espírito Santo

“ O único homem que está isento de erros é aquele que não arrisca acertar”

(Albert Einstein)

A minha família, com amor.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelas oportunidades e pessoas que tem colocado em meu caminho.

A minha família e a meus amigos que por tantas vezes entenderam o motivo de meus finais de semana em retiro. Em especial aos meus pais Arcemar Rocha de Christo e Maria de Lourdes Malavazi Christo, e minha querida irmã Marcella Malavazi de Christo.

Aos professores da UFES, em especial a Professora Dra. Jussara Faria Fardin, ao Professor Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti e a Professora Dra. Cristina Engel Alvarez, pela oportunidade e pelas orientações ao longo desse percurso.

Aos colegas de laboratório e do grupo ARQUIANTAR, em especial ao amigo Anderson Buss Woelffel pelas inúmeras dicas antárticas e pelo apoio na coleta de dados.

Agradeço também a Simone de Souza, por todo seu carinho e pela essencial colaboração na fase final deste trabalho.

Agradeço também a Marinha do Brasil, aos militares do Grupo Base 2010/2011, e em especial ao Encarregado de Eletricidade, Diego de Lima, e ao Encarregado de Motores, Vanderson Ramos Guimaraes que juntamente com o Chefe da Estação, Comandante Alexey Bobroff Daros, prestaram total apoio ao desenvolvimento da coleta de dados na Estação Antártica.

Ao INPE, que, por meio do Projeto Meteorologia na Antártica, construiu ao longo dos últimos 30 anos um fantástico banco de dados climático, o qual foi de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro por meio de bolsa de mestrado. Ao CNPq e FAPERJ, pelo financiamento do grupo de pesquisa por meio do INCT-APA.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal do Espírito Santo, instituição à qual pertencem e que sempre que possível foi flexível, viabilizando o desenvolvimento da pesquisa.

Resumo

Neste trabalho, é apresentado um estudo para proposta de matriz energética híbrida para a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). A pesquisa contemplou o diagnóstico energético da Estação Brasileira, a avaliação dos potenciais renováveis locais e simulação de desempenho de possíveis soluções de matrizes Diesel-Eólica-Solares. Foi realizada uma revisão das soluções energéticas adotadas em estações antárticas, o diagnóstico energético da EACF, levantamentos dos potenciais energéticos locais e análises de topologias de matrizes energéticas híbridas. O levantamento dos potenciais energéticos locais avaliou as possibilidades de aproveitamento de resíduos sólidos, cogeração, energia eólica e energia solar. Como principal resultado, é proposta uma matriz energética híbrida Diesel-Eólica-Solar, com o uso de cogeração e que possibilita operação sem o uso baterias. A redução de consumo esperada para a matriz proposta é de 37%, uma economia de 131.413 litros de óleo *diesel* por ano.

Abstract

This paper presents a study proposal of hybrid energy matrix for the Comandante Ferraz Antarctic Station (EACF). The research covered the Brazilian Station energy diagnosis, the assessment of local renewable potential and performance simulation of possible solutions of Wind-Solar-Diesel matrixes. Was conducted a review of energy solutions adopted in Antarctic stations, the EACF energy diagnosis, the potential of local energy surveys and the analysis of hybrid energy matrices topologies. The survey of local energy potential assessed the potential use of solid waste, cogeneration, wind power and solar energy. As a main result, it is proposed a hybrid Diesel-Wind-Solar energy matrix, with the use of cogeneration, that allows operation without using batteries. The reduction in consumption expected for the proposed matrix is 37%, a savings of 131,413 liters of *diesel* per year.

Sumário

Sumário	x
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xx
Nomenclatura	xxii
Capítulo 1: Introdução.....	22
1.1 Antártica, Continente Austral	25
1.2 Evolução da Estação Antártica Comandante Ferraz.....	27
1.3 Justificativa do Estudo.....	30
1.4 Objetivo e Delimitação do Estudo.....	31
1.5 Materiais e Métodos	31
1.5.1 Pesquisa sobre tecnologias utilizadas em estações antárticas	31
1.5.2 Diagnóstico energético	32
1.5.3 Seleção de dados de entrada para estudos e simulações.....	33
1.5.4 <i>Softwares</i> de simulação	34
1.5.5 Levantamento dos Potenciais Energéticos	34
1.5.6 Definição de topologias e análise das matrizes híbridas	35
1.5.7 Escolha e proposta de uma matriz energética híbrida para a EACF	36
1.6 Conclusão	36
Capítulo 2: Energia e o Desenvolvimento Sustentável.....	38
2.1. Energias renováveis e a sustentabilidade.....	38
2.2. Otimização de desempenho em grupos Motogeradores	40
2.3. Fundamentos Para Aplicação de Painéis Fotovoltaicos	44
2.4. Fundamentos para Aplicação de Aerogeradores	49
2.5. Uso de Resíduos Sólidos para Geração de Energia.....	54
2.5.1. Cogeração em Incineradores	54
2.5.2. Digestão Anaeróbia	56
2.6. <i>Smart Grid</i> e a Qualidade de Energia.....	57
2.7. Efeitos do clima sobre equipamentos e processos.....	59
2.8. Conclusão	62
Capítulo 3: Matrizes energéticas em Estações Antárticas	64
3.1. Estação Antártica da Bélgica – Princess Elizabeth	64
3.2. Estações Antártica Australianas	69

3.2.1.	Estação Mawson – Operada pela Austrália	69
3.2.2.	Davis, Casey e Macquarie Island – Operadas pela Austrália	77
3.3.	Estação McMurdo e Estação Scott – Operadas pelos Estados Unidos e Nova Zelândia	81
3.4.	Conclusão	85
Capítulo 4:	Infraestrutura energética da EACF	86
4.1.	Armazenamento de Combustíveis	86
4.2.	Sistema de geração e distribuição de energia elétrica	88
4.3.	Sistema de calefação: Caldeiras a <i>diesel</i>	91
4.4.	Incinerador a <i>diesel</i>	92
4.5.	Pontos de emissões e poluentes na EACF	93
4.6.	Conclusão	96
Capítulo 5:	Diagnóstico energético da EACF.....	98
5.1.	Consumo de combustíveis	98
5.2.	Perfil de cargas elétricas da EACF	99
5.3.	Análise de qualidade de energia da EACF	104
5.4.	Conclusões.....	108
Capítulo 6:	Potenciais energéticos da EACF	109
6.1.	Resíduos Sólidos Orgânicos	109
6.2.	Potencial de cogeração	111
6.3.	Potencial de uso de Fontes renováveis: Eólica e Solar.....	116
6.3.1.	Potencial Eólico.....	118
6.3.2.	Potencial Solar Fotovoltaico.....	128
6.4.	Comparativo dos recursos renováveis	137
6.5.	Conclusões.....	137
Capítulo 7:	Proposta de matriz energética para a EACF	139
7.1.	Introdução.....	139
7.2.	Inserção dos dados no modelo de simulação.....	139
7.3.	Simulação de matrizes híbridas	142
7.4.	Determinação da matriz energética para EACF	148
7.5.	Conclusões.....	155
Capítulo 8:	Conclusão Geral	157
Referências		161
APÊNDICE A – Relatório de Qualidade de Energia.....		166

ANEXO A	– Dados Coletados.....	185
ANEXO B	– Energia Eólica	186
ANEXO C	– GMG’s e Caldeiras.....	190
ANEXO D	– Dados do Aerogerador e Painel Solar	192

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Mapa ilustrando a localização da Estação Antártica Comandante Ferraz (ZERO HORA, 2012).	27
Figura 1.2 - Imagem da Estação Brasileira em 1984. Foto: Edson Nascimento Martins (SOUZA, 2008).	27
Figura 1.3 - Fotografia do corpo principal da EACF (centro da foto), heliponto (à direita) e tanques de combustíveis (à esquerda), logo após os trabalhos de expansão e revitalização (MB, 2010).	29
Figura 2.1 – Níveis das emissões de CO ₂ para tecnologias de geração de eletricidade (ABEN, 2010).	39
Figura 2.2 - Distribuição de energia primária em um <i>dual-fuel</i> V32/40DF fabricado pela MAN B&W (ADDAD e LORA, 2006).	41
Figura 2.3 - Consumo de combustível em um motogerador Yanmar NSB50, alimentado a <i>diesel</i> e para diferentes proporções de biodiesel (FERRARI, OLIVEIRA e SCABIO, 2005).	44
Figura 2.4 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°(CRESESB-GTES, 2004).	45
Figura 2.5 - Ilustração das componentes da radiação solar direta, difusa e refletida (NREL, 2012).	46
Figura 2.6 - Evolução das tecnologias de células fotovoltaicas, quanto à eficiência (1975 a 2011) (NREL, 2012).	47
Figura 2.7 – Curvas típicas de potência e IxV de uma célula fotovoltaica padrão (CRESESB-GTES, 2004).	47
Figura 2.8 - Comportamento da curva característica IxV em função da radiação solar incidente e da temperatura de operação (CRESESB-GTES, 2004).	48
Figura 2.9 - Diagrama de blocos de um sistema solar fotovoltaico (REIS, 2003).	49
Figura 2.10 - Esquema de circulação de ar a escala planetária em um sistema rotacional, em que se produzem três circuitos independentes por hemisfério (DELEITO, 1984).	50
Figura 2.11 - Esquema das circulações do ar, produzidas pelas diferentes insolações recebidas em regiões costeiras e em regiões montanhosas(DELEITO, 1984).	50
Figura 2.12 - Plotagem tridimensional da distribuição de Weibull para "c" igual a 10 mph e 15 mph, e "k" variando de 1,5 a 3 (PATEL, 1999).	50
Figura 2.13 - Comparação das curvas teóricas de rendimento aerodinâmico de diferentes tecnologias de turbinas eólicas em função das velocidades típicas dos rotores (PATEL, 1999).	52
Figura 2.14 - Curvas do coeficiente de potência e da potência de saída de um aerogerador ENERCON E-33 (330 kW), para densidade do ar igual a 1,225 Kg/m ³ (ENERCON, 2012)	52

Figura 2.15 - Parâmetros de velocidade dos ventos em função da classificação das turbinas eólicas segundo a IEC61400-1(BURTON, SHARPE, <i>et al.</i> , 2001).	54
Figura 2.16 - Fluxograma típico de uma planta de incineração com cogeração(MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000).	55
Figura 2.17 - Diagrama do processo de digestão anaeróbia da tecnologia DRANCO (REICHERT, 2005).	57
Figura 2.18 - Comparação entre as redes elétricas do presente e a do futuro, a <i>Smart Grid</i> (EEP, 2012).	59
Figura 2.19 - Detalhes construtivos e de funcionamento de um cabo térmico autorregulável (RAYCHEM, 2011).	61
Figura 2.20- Comportamento do fluxo luminoso em função da temperatura do ambiente em lâmpadas fluorescentes tubulares tradicionais e especiais para ambientes de elevada amplitude térmica (OSRAM, 2011).	62
Figura 2.21 - Comportamento do fluxo luminoso do LED branco em função da temperatura da junção, para uma corrente de teste fixa (PHILIPSLUMILEDS, 2009).	62
Figura 3.1 - Foto da Estação da Bélgica e dados do consumo de energia durante o ano (PEA, 2009).	64
Figura 3.2 - Níveis de prioridades analisados pelo sistema de gerenciamento energético da Estação Princess Elisabeth(SCIENCEPOLES, 2010).	66
Figura 3.3 - Detalhe do sistema de proteção dos aerogeradores. Curvatura das pás em função da intensidade dos ventos (PEA, 2009).	66
Figura 3.4 - Fotos dos aerogeradores utilizados na Estação Princess Elisabeth e seus sistemas de molas.(PEA, 2009)	67
Figura 3.5 - Fotos dos painéis solares da Estação Princess Elisabeth (POLAR FOUADATION, 2009).	67
Figura 3.6 - Gráfico em kWh da participação de cada sistema de geração e do consumo total na Estação Princesa Elisabeth durante 12 meses.(POLAR FOUADATION, 2009)	68
Figura 3.7 - Localização das estações antárticas mantidas pela Austrália(AAD, 2011).	69
Figura 3.8 - Foto de uma das turbinas eólicas da Estação Mawson(POLARPOWER.ORG, 2011).	69
Figura 3.9 - Foto da sala principal dos geradores a <i>diesel</i> da Estação Mawson.(AAD, 2009)	71
Figura 3.10 - Foto da sala do gerador de emergência da Estação Mawson.(AAD, 2009)	71
Figura 3.11 - Tela de monitoramento dos sistemas de geração elétrica da Estação Mawson numa situação de vento a 131Km/h(AAD, 2009).	72
Figura 3.12 - Tela de monitoramento dos sistemas de geração elétrica da Estação Mawson numa situação de vento a 80Km/h(AAD, 2009).	73
Figura 3.13 - Tela de monitoramento dos sistemas de geração elétrica da Estação Mawson numa situação de vento a 50Km/h(AAD, 2009).	73
Figura 3.14 - Tela de monitoramento do sistema de aquecimento de água elétrico e <i>diesel</i> (AAD, 2009).	74

Figura 3.15 - Tela de monitoramento do sistema de obtenção e armazenamento de água da Estação Mawson(AAD, 2009).	75
Figura 3.16 - Diagrama da produção, armazenamento e uso do hidrogênio em Mawson (AAD, 2009).	76
Figura 3.17 - Diagrama do uso de hidrogênio em campo na Estação Mawson(AAD, 2009)..	76
Figura 3.18 – Uso de hidrogênio na Estação Mawson. (a) Sistema de abastecimento local e móvel e turbina ao fundo; (b) sistema células de combustível de 2 kW; (c) sistema de abastecimento; (d) queima do hidrogênio para preparo de alimentos(AAD, 2009).	77
Figura 3.19 - Vista aérea da Estação australiana Davis(AAD, 2011).	78
Figura 3.20 - Projeto piloto de utilização de coletores solares para aquecimento de água, na Estação Davis em 1998/1999 (POLARPOWER.ORG, 2011).....	78
Figura 3.21 - Vista aérea da Estação Casey(AAD, 2009).	79
Figura 3.22 - Desenho esquemático do sistema de monitoramento eólico e solar na Estação Casey(POLARPOWER.ORG, 2011).....	79
Figura 3.23 - Vista aérea da Estação Macquarie Island(AAD, 2009).	80
Figura 3.24 – Módulo de potência para áreas remotas (RAPS). (a) Vista do aerogerador, painel solar e reservatório de combustível do RAPS. (b) RAPS sendo instalado em um refúgio de Macquarie Island(AAD, 2009).	80
Figura 3.25 - Características das fundações das turbinas eólicas. (a) Desenho em três dimensões dos blocos de concreto e estrutura metálica. (b) Foto o bloco de concreto já pronto(MERIDIAN ENERGY, 2011).	81
Figura 3.26 - Esquema construtivo e especificações gerais dos aerogeradores utilizados na fazenda eólica de McMurdo e Scott Base(MERIDIAN ENERGY, 2011).	82
Figura 3.27 – Hélices das turbinas de vento sendo transportadas por caminhão, do píer da Estação McMurdo para a fazenda eólica na ilha Ross(OTAGO DAILY TIMES ONLINE, 2009).	82
Figura 3.28 – Módulo inversor com 1.500 kVA de potência (POWERCORP, 2011).....	83
Figura 3.29 – Volante de inércia da Estação McMurdo. PowerStore 500 Flywheel System (POWERCORP, 2011).	84
Figura 3.30 - Fazenda eólica das estações MacMurdo e Scott Base. Turbinas Enercon E33 certificadas pela NREL (NREL, 2010).	84
Figura 4.1 - Organização dos elementos envolvidos na avaliação energética da EACF.....	86
Figura 4.2 - Tanques e bombas de combustíveis externos à Estação. Foto do autor, 2011.	87
Figura 4.3 - Chata para transporte de combustíveis com capacidade para 12.000 litros durante um desembarque de óleo.Ao fundo Navio Almirante Maximiano H-41. Foto do autor, 2011.....	87
Figura 4.4 - Fotos dos grupos motogeradores a <i>diesel</i> e suas proteções acústicas, presentes na praça de máquinas. Fotos do autor, 2011.....	89
Figura 4.5 - Esquema de conexão entre as bobinas dos alternadores Stamford UCI274H1 da EACF. Representação da topologia estrela paralela, conforme fixado no alternador.	89
Figura 4.6 - Foto do quadro elétrico principal na praça de máquinas. Foto do autor, 2011.....	90

Figura 4.7 – Vista dos barramentos do quadro elétrico principal. Foto do autor, 2011.....	91
Figura 4.8 - Foto da caldeira Alfa em operação. Foto do autor, 2011.....	92
Figura 4.9 – Foto do incinerador RGL200S em operação. Foto do autor, 2011.....	93
Figura 4.10 – Foto do painel de comando do incinerador RGL200S. Foto do autor, 2011.	93
Figura 4.11 - Fotos das descargas das presentes no teto da EACF. Fotos do autor, 2011.	93
Figura 4.12 - Fatores de emissão para grupos motogeradores de 50kW a 450kW, gráficos elaborados com base nos estudos de Kassoy (2009).	95
Figura 5.1 - Gráfico de consumo mensal de óleo <i>diesel</i> na EACF em 2011. A categoria “Outros” reúne o consumo das viaturas e embarcações. Elaborado com base nos dados da MB.	98
Figura 5.2 - Participação dos processos no consumo óleo <i>diesel</i> na EACF em 2011. Elaborado com base nos dados da MB.....	99
Figura 5.3 - Perfil de cargas elétricas da EACF. Elaborado com base nos dados de 2010 da MB.	100
Figura 5.4 – Foto de cintas térmicas expostas, aguardando finalização da instalação. Foto do autor, 2011.	101
Figura 5.5 – Características das cintas térmicas utilizadas nas tubulações vindas dos lagos da EACF (RAYCHEM, 2011).....	101
Figura 5.6 – Temperaturas da tubulação e cinta térmica, no lago sul. Foto do autor, 2011...	102
Figura 5.7 - Potencia de iluminação instalada na EACF por tipo de lâmpada. AID - Alta Intensidade de Descarga. Dados referentes a 2008/2009.....	102
Figura 5.8 - Participação por tipo de lâmpada na potência instalada do sistema de Iluminação. AID - Alta Intensidade de Descarga. Dados referentes a 2008/2009.	103
Figura 5.9 - Luminária da Praça de Máquinas, operando sem tampa de proteção. Foto do autor, 2011.	103
Figura 5.10 - Consumo diário de energia elétrica na EACF, no período de 11 a 17 de janeiro de 2011.....	105
Figura 5.11 - Consumo de energia elétrica por fase, no período de 11 a 17 de janeiro de 2011.	105
Figura 5.12 – Potências trifásicas, ativa (em vermelho), reativa (em azul) e aparente (em preto).	106
Figura 5.13 - Registros apresentados: potência ativa, potência reativa e fator de potência ao longo de três dias no PCV. Cintas térmicas desligadas de 9 horas às 21h do primeiro dia.	107
Figura 5.14 - Distorção harmônica de tensão, na saída do Gerador 1.....	107
Figura 5.15 - Tensões de linha na casa de bombas do lago sul.	108
Figura 6.1 - Resíduos sólidos orgânicos produzidos na EACF no período de 01/2009 a 03/2010. * Meses com descarte de gêneros vencidos, 793Kg, 892Kg e 257 Kg respectivamente para os meses 10/09, 12/09 e 1/10. Elaborado com base nos dados do Relatórios de Resíduos Gerados na EACF, da Marinha do Brasil.	110

Figura 6.2 - Diagrama de Sankey do balanço energético típico de um grupo motogerador a óleo <i>diesel</i> , adaptado de (LORA e NASCIMENTO, 2004).....	111
Figura 6.3 - Balanço energético do consumo de óleo <i>diesel</i> na EACF, para avaliação de potencial de cogeração.	112
Figura 6.4 - Gráfico de oferta e demanda térmica na EACF, com base em dados médios diários de energia térmica aproveitável nos geradores e demanda da caldeira.....	114
Figura 6.5 – Sistema de pré-aquecimento da água de consumo do reservatório de água da EACF. Foto do autor, 2011.....	115
Figura 6.6 –Laboratório de Meteorologia na Antártica do INPE, instalada ao lado do Lago Sul, a 16m de altitude. Foto do autor, 2011.	116
Figura 6.7 - Mapa topográfico do entorno da EACF e indicação do ponto de aquisição dos dados eólicos e de radiação solar(JÚNIOR, DANI, <i>et al.</i> , 2010).	117
Figura 6.8 - Gráfico de velocidades médias anuais de 1986 a 2010. Destaque em linha contínua para valores extremos. Destaque em linhas pontilhadas para maiores variações observadas. Elaborado com base nos dados coletados pelo CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).	119
Figura 6.9 - Gráfico de velocidade média mensal do vento na EACF, 26 anos (1986-2011). Destaque para comportamento anual. Elaborado com base nos dados coletados pelo CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).	119
Figura 6.10- Rosa dos ventos de frequência e rosa dos ventos de densidade de potência na EACF referente ao mês de janeiro de 2010.	121
Figura 6.11 - Histograma das velocidades do vento e levantamento dos parâmetros da curva de distribuição de Weibull. Registros de 1994 a 2006 na EACF.....	121
Figura 6.12 – Características das distribuições das velocidades do ventos e curvas de Weibull para todos os meses do ano, na região da EACF, no período de 1994 a 2006.....	122
Figura 6.13 - Velocidade do vento e densidade média de potência mensal na EACF, 1994 a 2006.....	123
Figura 6.14 - Distribuição de velocidades e de densidade de energia dos ventos na EACF. Período de 1994 a 2006.....	124
Figura 6.15 - Curvas de potência dos aerogeradores Endurance G-3120, Enercon E33 e Proven 15kw.	125
Figura 6.16 – Geração de energia eólica, referente a janeiro de 2010. Em amarelo: excedente produzido. Em verde: energia eólica diretamente consumida. Em vermelho: geração complementar necessária.	127
Figura 6.17 - Radiação Global horizontal e índice de claridade para a região da EACF (NASA, 2011).	128
Figura 6.18 – Perfil anual por hora da radiação solar global horizontal na região da EACF(NASA, 2011).....	129
Figura 6.19 - Exemplificação dos ângulos de inclinação e azimute para posicionamento de painéis solares.	129
Figura 6.20 – Energia anual produzida pelo painel solar em função do posicionamento.	130
Figura 6.21 – Influência da refletividade do solo na inclinação ideal do painel solar.	131

Figura 6.22 – Potência produzida pelo painel solar para posicionamento fixo, albedo a 70%, inclinação a 60°, azimute a 180°.....	132
Figura 6.23 – Potências mensais médias, máximas e mínimas para posicionamento fixo, albedo a 70%, inclinação a 60°, azimute a 180°.....	132
Figura 6.24 – Valores dos ângulos ótimos de inclinação para ajuste mensal, azimute fixo em 180° e albedo de 70%.....	133
Figura 6.25 - Potência produzida pelo painel solar para albedo a 70%, azimute a 180° e ajuste mensal de inclinação.....	133
Figura 6.26 – Potências médias, máximas e mínimas produzidas pelo painel solar para albedo a 70%, azimute a 180° e ajuste mensal de inclinação.....	133
Figura 6.27 - Potência produzida pelo painel solar para posicionamento com albedo a 70%, inclinação 60° e rastreamento e azimute ótimo.....	134
Figura 6.28 - Potências médias, máximas e mínimas produzidas pelo painel solar para albedo a 70%, inclinação 60° e rastreamento de azimute ótimo.....	134
Figura 6.29 - Potência produzida pelo painel solar para posicionamento com rastreamento de posição ótima e albedo de 70%.....	135
Figura 6.30 - Potências médias, máximas e mínimas produzidas pelo painel solar para rastreamento de posição ótima e albedo a 70%.....	135
Figura 6.31 – Curvas de economia anual de óleo <i>diesel</i> esperada na EACF por kWp renovável instalado, considerando <i>diesel</i> geradores sem cogeração.....	137
Figura 7.1 - Perfil de consumo de energia elétrica e térmica na EACF em 2011. Calculado com base em dados da Marinha do Brasil.....	140
Figura 7.2 - Curva de eficiência do gerador C200-D6, gerada pelo HOMER, com base nos dados técnicos do motogerador.....	140
Figura 7.3 - Consumo de combustível da Estação em função da potência renovável instalada, considerando o uso de cogeração (CHP) em todas as matrizes renováveis.....	145
Figura 7.4 – Taxa de variação do consumo de combustível em função da potência renovável instalada considerando o uso de cogeração.....	146
Figura 7.5 – Característica da Potência elétrica produzida pelas fontes renováveis de energia para a matriz proposta.....	152
Figura 7.6 – Característica da produção complementar de energia no grupo motogerador, para a matriz proposta.....	152
Figura 7.7 - Produção média mensal de eletricidade por tecnologia para a matriz proposta.....	152
Figura 7.8 – Característica da penetração das energias renováveis da matriz proposta.....	153
Figura 7.9 – Valores médios, máximos e mínimos da penetração de energia renovável na matriz proposta.....	153
Figura 7.10 – Produção média mensal de energia térmica da matriz proposta, por tecnologias.....	154
Figura 7.11 – Característica da produção de energia térmica no motogerador da matriz proposta, sobreposta a demanda térmica da EACF.....	154

Figura 7.12- Característica de produção de energia térmica nas caldeiras da matriz proposta, sobreposta a demanda térmica da EACF.	154
Figura 7.13 – Variação no consumo anual de combustível na matriz proposta em função da oferta de recursos renováveis.	155
Figura B.1 - Esquema de uma corrente fluida ao atravessar a área de captação de um rotor genérico(DELEITO, 1984).	186
Figura B.2 - Perfil das correntes de vento e característica da curva de potência em função dos mecanismos de controle aerodinâmico de turbinas eólicas, controle por estol e controle por passo (CRESESB-CEPEL, 2012).	189

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Relação dos dados utilizados nos levantamentos de potencial e nas simulações de matrizes.....	33
Tabela 2.1- Comparativo entre grupos motogeradores a <i>diesel</i> e a etanol (VSE, 2011).....	43
Tabela 2.2 - Comprimentos das rugosidades típicas de diversos terrenos (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).	53
Tabela 3.1 - Tecnologias de geração de energia elétrica e suas respectivas potências, na Estação da Bélgica (PEA, 2009). A unidade kWp expressa a maior potência que o sistema produzirá sobre condições ótimas de operação.....	65
Tabela 3.2 - Estatísticas de operação das turbinas eólicas de Mawson. Dados medidos entre março 2003 e março de 2007 em relação ao ano de 2002(POLARPOWER.ORG, 2011).	70
Tabela 4.1 – Poluentes e alguns dos seus efeitos nocivos (LORA e NASCIMENTO, 2004; NREL, 2010).....	94
Tabela 6.1 - Dados numéricos do balanço energético para potencial de cogeração, em litros de óleo <i>diesel</i> por ano e equivalência percentual.....	112
Tabela 6.2 - Direções predominantes dos ventos na EACF, anual de 1986 a 2010. . Elaborado com base nos dados coletados pelo CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).	120
Tabela 6.3- Parâmetros da distribuição de Weibull na EACF, referente ao período de 1994 a 2006.....	122
Tabela 6.4 - Desempenho anual de diferentes modelos de turbinas eólicas, considerando as características dos ventos da EACF.	126
Tabela 6.5 - Volume anual de óleo <i>diesel</i> economizado para diferentes modelos de turbinas, considerando as características dos ventos da EACF.	126
Tabela 6.6 – Indicadores de desempenho para uso do aerogerador Enercon E33. Referente a janeiro de 2010.....	127
Tabela 6.7 - Radiação global horizontal e índice de claridade para a região da EACF (NASA, 2011).	128
Tabela 6.8 – Quadro comparativo de desempenho de diferentes técnicas de posicionamento de painéis solares.	136
Tabela 6.9 - Economia anual de óleo <i>diesel</i> esperada na EACF por kWp renovável instalado, considerando <i>diesel</i> geradores sem cogeração.....	137
Tabela 7.1 – Consumo de combustível do grupo motogerador Cummins C200-D6, em modo Prime (CUMMINSPower, 2008).	140
Tabela 7.2 - Simulação da matriz energética da EACF no HOMER, com base nos dados de demanda energética do ano de 2011.	141
Tabela 7.3 - Matrizes energéticas simuladas para avaliação do comportamento das diferentes tecnologias nas três faixas de potência renovável instalada.	143

Tabela 7.4 - Desempenho de matrizes híbridas Diesel-Eólico-Solar, com cogeração, tomando como referência o <i>diesel</i> consumido em 2011 na EACF e considerando potenciais de recursos renováveis levantados.....	148
Tabela 7.5 – Comparativo de possíveis soluções de matrizes energéticas por tipo de solução. Potência renovável instalada (PRI).....	149
Tabela 7.6 – Diagrama da matriz proposta para a EACF. Dados de consumo de combustível e geração de energia elétrica e térmica.....	151
Tabela A.1 - Cronograma de medidas do analisador de energia.....	185
Tabela A.2 - Relação da documentação coletada (copiada).....	185
Tabela A.3 - Relação dos registros fotográficos, local e tipo de registro.....	185

Nomenclatura

Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
δ	Declinação Solar	graus
n	Dia do ano em que se deseja calcular a declinação solar	dias
α	Ângulo de azimute	graus
P_{mp}	Ponto de máxima potência do painel solar	Watt
V_{mp}	Tensão de máxima potência do painel solar	Volt
I_{mp}	Corrente de máxima potência do painel solar	Ampere
V_{oc}	Tensão de circuito aberto do painel solar	Volt
I_{sc}	Corrente de curto circuito do painel solar	Ampere
c	Parâmetro de velocidade da distribuição de Weibull	m/s
k	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull	unidade
η_a	Rendimento aerodinâmico da turbina eólica	%
η_m	Rendimento mecânico da turbina eólica	%
η_e	Rendimento elétrico da turbina eólica	%
C_p	Coefficiente de potência do aerogerador	%
P_{vento}	Potência do vento incidente na turbina eólica	Watt
$P_{útil}$	Potência efetivamente entregue pela turbina eólica	Watt
ρ	Densidade do ar	kg/m^3
A	Área do rotor da turbina eólica	m^2
V	Velocidade do vento incidente	m/s
V_{rotor}	Velocidade do vento na altura do rotor	m/s
V_a	Velocidade do vento na altura conhecida	m/s
H_{rotor}	Altura do rotor do aerogerador	metro
H_a	Altura do vento conhecido	metro
$R_{terreno}$	Rugosidade do terreno	metro
E_{CO_2}	Emissão de dióxido de carbono (CO ₂)	tonelada
E_C	Emissão de carbono (C)	tonelada

Siglas

Símbolo	Descrição
AAD	<i>Australian Antarctic Division</i> - Divisão Antártica Australiana
ABEN	Associação Brasileira de Energia Nuclear
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARQUIANTAR	Arquitetura na Antártica
BGI	<i>Boiler Grid Interface</i> -Interface Caldeira Rede
CCSM	Centro de Comunicação Social da Marinha
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
CIRM	Comissão Interministerial para os Recursos do Mar
CME	Casas de Máquinas de Emergência
CMP	Casas de Máquinas Principais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DA	Digestão Anaeróbia
DHT	Distorção Harmônica Total
DM	Demanda Média
DOE	<i>Department of Energy</i> - Departamento de Energia dos Estados Unidos
DRANCO	<i>Dry Anaerobic Composting</i> – Compostagem Anaeróbica Seca
DVD	<i>Digital Versatile Disc</i> - Disco Digital Versátil
EACF	Estação Antártica Comandante Ferraz
EIA	Estudo de Inserção Ambiental
EPA	<i>US Environmental Protection Agency</i> - Agência de proteção Ambiental dos EUA
EpIA	Estudo Prévio de Impacto Ambiental
EU	<i>European Union</i> – União Européia
FP	Fator de Potência
GB	Grupo Base
GMG	Grupo Motor Gerador
GTES	Grupo de Trabalho de Energia Solar
HOMER	<i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewables</i> - Modelo Híbrido de Otimização de Sistemas Elétricos Renováveis
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> - Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou IEEE

IGY	<i>International Geophysical Year</i> - Ano Geofísico Internacional
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LED	<i>Light Emitting Diode</i> - Diodo Emissor de Luz
LPP	Laboratório de Planejamento e Projetos
MACI	Monitor Alternativo de Combustão Interna
MB	Marinha do Brasil
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> - Seguidor do Ponto de Máxima Potência
NASA SSE	<i>National Aeronautics and Space Administration Surface Solar Energy Data Set</i> - Base de Dados de Energia Solar de Superfície da Agência Espacial Norte Americana
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> - Associação dos Fabricantes de Equipamentos Elétricos
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> - Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos
OPERANTAR	Operação Antártica Brasileira
PCV	Painel de Cargas Vitais
PEAS	<i>Princess Elisabeth Antarctic Station</i>
PFC	Power Factor Correction - Correção de Fator de Potência
PM	<i>Particulate Matter</i> - Particulados
PPF	Painel Principal de Força
PRI	Potência Renovável Instalada
PROANTAR	Programa Antártico Brasileiro
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PVC	Chloride- Cloreto de Polivinil
QEE	Quadro Elétrico de Emergência
QEP	Quadro Elétrico Principal
QSR	Quadro de Sinalização Remota
RAPS	<i>Remote Area Power Supplies</i> - Sistemas de Suprimento de Potência para Áreas Remotas
RGL	Reator de Gaseificação Luftech
Rima	Relatório de Impacto no meio Ambiente
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SCADA	Supervisão Controle e Aquisição de Dados
SECIRM	Secretaria Interministerial para os Recursos do Mar
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UHC	Unburned Hydrocarbons - Hidrocarbonetos não queimados na combustão
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> - Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UPS	<i>Uninterruptible Power Supplies</i> – Fonte de Potência Ininterrupta

USAP	<i>United States Antartic Program</i> - Programa Antártico dos Estados Unidos
VSE	Vale Soluções em Energia
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> - Organização Meteorológica Mundial

Capítulo 1: Introdução

As primeiras edificações na Antártica tinham como principal característica a necessidade de prover condições mínimas para a sobrevivência humana, numa época denominada de “tempos históricos”, cujos feitos heroicos são amplamente contados em livros e outras formas de divulgação. Posteriormente, com o advento da tecnologia, as edificações antárticas passaram a buscar não somente condições de sobrevivência, mas também otimizar o conforto e as condições de vida naquele continente. Eram os chamados “tempos tecnológicos”. Atualmente, os “tempos ambientais” caracterizam-se pela busca por uma inserção harmônica entre o homem e o ambiente, seja através da otimização dos sistemas instalados, seja na busca por soluções que signifiquem um menor impacto ambiental ocasionado pela presença humana (ALVAREZ, 1995).

Conhecido como Protocolo de Madri, o Tratado da Antártica para Proteção ao Meio Ambiente, torna o “continente gelado” uma reserva natural destinada à paz e à ciência. Para isso, o Artigo 3 do protocolo estabelece que as atividades na Antártica sejam organizadas e executadas com base em informações suficientes que permitam avaliações prévias e uma apreciação fundamentada de seu possível impacto no meio ambiente antártico e dos ecossistemas dependentes e associados, de forma a evitar impactos negativos sobre a qualidade do ar e da água, modificações significativas no meio ambiente atmosférico, terrestre, glacial e marinho, riscos para as espécies animais e vegetais e degradação de áreas com especial significado biológico, científico, histórico, estético ou natural (PROANTAR, 2001).

De forma geral, as estações antárticas se assemelham a pequenas vilas isoladas que necessitam de água potável, calefação, tratamento de resíduos e geração de energia elétrica para garantir a sobrevivência de seus ocupantes e continuidade das pesquisas. Atualmente o uso de combustíveis fósseis em estações antárticas para a produção de energia elétrica e térmica configura-se como um elemento preocupante na busca pela redução do impacto ambiental e da necessidade de otimização dos sistemas instalados. Os custos da logística de combustíveis e os riscos de derramamentos de óleos tornam-se fatores ainda mais críticos dadas as particulares condições climáticas e de rigurosidade das medidas de conservação dessas regiões.

Buscando solucionar essas questões, diversos países têm intensificado suas ações relacionadas ao uso de tecnologias de gestão ambiental e energias renováveis. Estes estudos

têm como característica a integração de diversas áreas do conhecimento, envolvendo ciências relacionadas principalmente com o uso racional e eficiente dos recursos de água e energia, gestão de resíduos, métodos, materiais e técnicas construtivas avançadas. Países como Alemanha, Austrália, Bélgica, Estados Unidos e Nova Zelândia são exemplos de nações que vem se destacando em qualidade nas pesquisas e soluções implementadas na Antártica.

O Brasil, em 2004, orientado pelo plano diretor elaborado pela equipe do Laboratório de Planejamento e Projetos da Universidade Federal do Espírito Santo (LPP - UFES), iniciou as atividades de revitalização e modernização de sua principal instalação na Antártica, a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). Em 2008, dando continuidade ao processo de revitalização, mais um avanço foi realizado com a instalação de novos motogeradores, mais silenciosos, eficientes e menos poluentes que os anteriores (SOUZA, 2008). No entanto, apesar dos novos motogeradores permitirem à EACF melhores condições de conforto e segurança, o consumo anual de óleo *diesel* (360.000 litros, relativo ao ano de 2011) já superava as capacidades locais de armazenamento (300.000 litros) e passava a trazer limitações à autonomia da Estação e fortes inconvenientes logísticos e ambientais.

A logística de abastecimento da Estação apresentava-se como um fator de elevado risco ambiental e humano, uma vez que, para transferência de todo o óleo necessário para o período de um ano de atividades da Estação, eram necessários cerca de 60 deslocamentos das chatas¹ de óleo em mar antártico e em condições climáticas adversas. Já a emissão de poluentes na região da EACF, além de contaminar os arredores da Estação poderia provocar impacto na fauna e flora local além de influenciar direta e indiretamente as pesquisas feitas na região. No final do ano de 2011, uma das chatas afundou nas proximidades da EACF enquanto realizava o transporte de combustível do navio para a Estação. Felizmente o óleo *diesel* não vazou, porém a chata só conseguiu ser reflutuada no dia 03 de março de 2012, cerca de 4 meses após seu afundamento. A reflutuação foi conduzida por mergulhadores embarcados no Navio “Gulmar Atlantis”, cedido pela PETROBRAS, e apoiado pelo Navio Polar (NPO) “Almirante Maximiano” da MB. A operação levou cerca de cinco dias para ser executada (CCSM^a, 2012).

Considerando a fragilidade ambiental da Antártica, o *status* de laboratório natural e as responsabilidades advindas do Protocolo de Madrid, constatou-se a necessidade de buscar soluções visando à redução nos níveis de consumo de combustíveis e das emissões oriundas dos processos de geração de eletricidade e calor na EACF.

¹ Chata: Embarcação larga e com fundo chato, utilizada para transporte de cargas.

Partindo-se da hipótese da viabilidade e exequibilidade quanto ao aproveitamento de resíduos gerados na EACF, potencial de cogeração nos motogeradores, bem como na proposta de uso de fontes renováveis de energia, este trabalho apresenta um estudo inicial para proposta de uma matriz energética híbrida Diesel-Eólica-Solar para a EACF, a partir de um detalhado diagnóstico energético da Estação e do levantamento dos potenciais eólico, solar, cogeração e resíduos sólidos orgânicos. Estas soluções apresentam-se particularmente atrativas, uma vez que diversificam a matriz energética, contribuem para a redução do impacto causado pela geração de resíduos, diminuem o consumo de combustível e, conseqüentemente, os esforços e os riscos advindos da logística vinculada às atividades relacionadas aos combustíveis em regiões antárticas.

No entanto, no decorrer da fase de conclusão do presente trabalho, no dia 25 de fevereiro de 2012, a Estação Antártica Comandante Ferraz sofreu um grave incêndio, que terminou por queimar todo o corpo principal da Estação e por vitimar dois militares (CCSM, 2012). Dessa forma, apesar de algumas das etapas de análise e sugestão de otimizações deixarem de ser passíveis de implantação, elas foram mantidas no trabalho com o caráter de registro histórico da infraestrutura elétrica da Estação e com o intuito de serem observadas em novas construções na Antártica. O conhecimento de informações como perfil de cargas elétricas e curvas de demanda térmica e elétrica, quando aliados ao conhecimento dos recursos renováveis disponíveis, podem ser interpretados como indicadores de alto valor para o estabelecimento da nova Estação brasileira.

Para iniciar este estudo, o Capítulo 1: Introdução, apresenta, além desta breve contextualização a respeito dos elementos envolvidos e fatores motivadores da presente pesquisa, alguns dos marcos históricos quanto ao desbravamento do continente antártico e da evolução da EACF até a atualidade, apresenta a justificativa, o objetivo e a delimitação do estudo, além dos materiais e métodos adotados para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2: Energia e o Desenvolvimento Sustentável, é realizada uma revisão dos principais conceitos quanto as tecnologias abordadas ao longo do trabalho, com o intuito de permitir ao leitor uma melhor compreensão dos estudos. Para isto, são apresentados nesse capítulo conceitos sobre energias renováveis, otimização de desempenho em grupos motogeradores, aplicação de painéis fotovoltaicos, levantamento de potencial eólico e aplicação de aerogeradores, uso de resíduos sólidos para produção de energia, *Smart Grid* e efeitos do clima sobre equipamentos e processos.

No Capítulo 3: Matrizes energéticas em Estações Antárticas, são mostradas algumas das matrizes híbridas e soluções energéticas que mais se destacam na Antártica quanto ao

desempenho, versatilidade e complexidade. Para isso, são apresentadas de forma técnica as soluções energéticas utilizadas nas estações da Bélgica, Austrália, Estados Unidos e Nova Zelândia.

Realizada a contextualização referente às particularidades do ambiente antártico e das principais soluções adotadas recentemente, o Capítulo 4: Infraestrutura energética da EACF inicia o estudo em busca da otimização da Estação brasileira pelo detalhamento da estrutura da EACF em 2011, envolvida com a produção de energia elétrica e térmica, suas capacidades e características técnicas, bem como as conseqüentes emissões advindas da queima do óleo *diesel*.

O Capítulo 5: Diagnóstico energético da EACF contempla o diagnóstico da Estação passando pelo levantamento do perfil anual de consumo de óleo *diesel*, balanço energético, perfil de cargas elétricas e análises de qualidade de energia realizadas na EACF durante o verão de 2010/2011.

No Capítulo 6: Potenciais energéticos da EACF, é realizado um detalhado levantamento dos potenciais energéticos da EACF quanto ao aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos, cogeração nos motogeradores e no incinerador, uso de energia eólica e uso de energia solar. São avaliados também os desempenhos de três modelos de aerogeradores e de um painel fotovoltaico para quatro diferentes técnicas de posicionamento.

O Capítulo 7: Proposta de matriz energética para a EACF apresenta a análise das possíveis composições de matrizes energéticas visando a máxima segurança, adequação logística e o mínimo impacto ambiental. São apresentadas as etapas de seleção e inserção de dados na ferramenta de simulação e avaliação de coerência do modelo, simulação de matrizes híbridas com respectivas análises de desempenho, definição de critérios para avaliação das matrizes híbridas, proposta de matriz energética para a EACF e análise detalhada de desempenho e sensibilidade à variação na oferta de recursos renováveis.

Por fim, no Capítulo 8: Conclusão Geral, são reunidos e comentados os principais resultados obtidos ao longo do estudo, particularidades e conceitos técnicos a serem observados para implementação do estudo, além de propostas de continuidade da pesquisa e trabalhos futuros.

1.1 Antártica, Continente Austral

O continente antártico é conhecido como o continente dos superlativos, sendo o mais frio, seco, alto, ventoso, remoto, desconhecido e o mais preservado do planeta. É o quinto em extensão e o único sem divisão geopolítica, detém 80% da água doce do planeta, além de

riquezas minerais incalculáveis, incluindo petróleo e gás. A temperatura média do continente antártico é - 60°C, sendo - 89°C a menor temperatura já registrada. Seus ventos podem alcançar mais de 300 km/h e o ar pode chegar a ser tão seco quanto no deserto do Saara (MMA, 2009).

Embora a Antártica já fosse conhecida por pescadores de baleias e registrada desde a carta de Mercator de 1569, o marco inicial em relação à ocupação na Antártica é tido como o ano de 1820, sendo conhecidos os nomes de Nathaniel Palmer (norte-americano), Fabian Gottlieb Thaddeus Von Bellingshausen (russo) e Edward Bransfield (inglês) como os primeiros exploradores da região. Esse feito marcava o início de uma época de navegações antárticas motivadas pela visão expansionista e exploratória, onde os interesses econômicos superavam a importância da preservação ambiental (ALVAREZ, 1995), (KLINK, 2002).

Em 1902, Willian Bruce, representando o governo britânico, estabelece a primeira base científica, porém, a falta de apoio do governo o faz rebelar-se e, em 1904, toma a base na Ilha Laurie para a Argentina (Child *apud* Alvarez, 1995, p. 17).

O período de 1911-1912 foi marcado por uma grande corrida ao Polo Sul, sendo que no dia 14 de dezembro de 1911, às 15 horas, Roald Amundsen alcançou o tão almejado Polo, a mais de 2.500 metros de altitude. Por outro lado, a expedição liderada por Robert Falcon Scott terminaria tragicamente no dia 29 de março de 1912, com a morte de todos os membros de sua equipe. Scott alcançou o Polo 34 dias após Amundsen e embora todas as glórias da conquista pertençam a Amundsen, foi a história de Scott a que mais sensibilizou e tornou-se popular na epopeia da Antártica (ALVAREZ, 1995).

Em meados de 1950, cientistas do mundo inteiro despertados pelo grande potencial da Antártica para o estudo de geomagnetismo, astronomia, meteorologia e história natural, propuseram um esforço internacional para explorar o espaço e a Antártica. Esse esforço viria a ser conhecido como o Ano Geofísico Internacional (IGY – *International Geophysical Year*). Após anos de intensas discussões a respeito do futuro do continente antártico e seu incalculável potencial científico, foi então, em 1959, assinado o Tratado da Antártica. O Tratado da Antártica entrou em vigor em 1961 e estabelecia o continente como uma área de cooperação internacional para investigação científica, sem atividades militares, submetida a medidas de proteção ambiental. A Antártica passava a ser uma reserva natural, dedicada à paz e a ciência (PROANTAR, 2001).

Por ser a região mais sensível às mudanças globais, monitoramentos realizados na Antártica permitem a percepção antecipada das alterações que o planeta vem sofrendo. O clima na América do Sul também é significativamente influenciado por massas de ar frio

provenientes do Continente Gelado. Essas massas de ar se relacionam com o clima brasileiro, podendo causar repercussões nos recursos hídricos, na indústria, no comércio e no calendário agrícola (MMA, 2009).

Em 1982, o Brasil realizou sua primeira Operação Antártica (OPERANTAR). Essa operação permitiu que, em 1983, o Brasil fosse admitido como membro consultivo do Tratado da Antártica por desempenhar pesquisas científicas no continente Austral. O País passava a ter direito a participar das decisões sobre o futuro do continente Antártico. Começava então a história do Brasil na Antártica (SOUZA, 2008).

1.2 Evolução da Estação Antártica Comandante Ferraz

Inaugurada em 6 de fevereiro de 1984, a Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz (EACF) foi instalada na Península Keller, localizada na Ilha Rei George, a cerca de 3200 km do Polo Sul e a 4000 km do estado brasileiro do Rio Grande do Sul (SOUZA, 2008).

Inicialmente foram instalados 8 módulos e 3 motogeradores, a Estação ocupava cerca de 150 m² e comportava até 12 pessoas, funcionando apenas durante o verão. A técnica construtiva adotada – monoblocos transportados inteiros do Brasil para a Antártica – permitiu sua implementação com a pressa e a segurança necessárias à época (SOUZA, 2008). A Figura 1.1 ilustra através de mapas sobrepostos, o posicionamento geográfico da EACF e a Figura 1.2 apresenta uma imagem da configuração inicial da Estação Antártica Brasileira em 1984.



Figura 1.1 - Mapa ilustrando a localização da Estação Antártica Comandante Ferraz (ZERO HORA, 2012).



Figura 1.2 - Imagem da Estação Brasileira em 1984. Foto: Edson Nascimento Martins (SOUZA, 2008).

Em 1984/1985 (OPERANTAR III) a Estação foi ampliada passando a ter 36 contêineres e capacidade para 22 pessoas. No ano seguinte, um importante avanço foi realizado e a Estação passou a operar também no inverno. Para isso, foram instalados mais 14 contêineres, sendo 5 para armazenamento de *diesel* e 1 para gasolina (SOUZA, 2008).

Em 1986/1987, OPERANTAR V, a preocupação com a preservação do meio ambiente fez com que fosse implantada a coleta seletiva de resíduos e instalado o primeiro incinerador de resíduos sólidos. Nessa OPERANTAR, iniciavam-se também as primeiras pesquisas na área de Tecnologias, com o levantamento métrico das instalações e estudos de técnicas e materiais construtivos, com a finalidade de avaliar a possibilidade de inserção de tecnologias que promovessem um desenvolvimento harmonioso entre infraestruturas e meio ambiente (SOUZA, 2008).

Em 1988, Ferraz continuava em pleno desenvolvimento, já alcançando 50 módulos, mais um ambiente de garagem e 16 tanques de combustíveis. Nas três operações antárticas seguintes, foram instalados nos arredores da EACF, respectivamente, o Módulo VLF (*Very Low Frequency* – Frequências muito baixas), Módulos Meteorológicos, Módulo de Química e Refúgio 1. Os módulos laboratórios eram climatizados por aquecedores elétricos e alimentados pelos motogeradores da Estação. Nessa época, foi também instalado na Estação um sistema de calefação e aquecimento de água composto por duas caldeiras alimentadas a *diesel* (SOUZA, 2008).

Em 1997/1998, foi estabelecido um novo sistema de comunicação com o continente Sul-Americano, possibilitando o uso de telefonia, *fax* e *internet*. No ano seguinte, a Estação Rádio de Emergência foi também otimizada. Nessa época, o crescimento constante da EACF, realizado sem um plano de expansão, fez com que as obras fossem executadas de acordo com as necessidades emergenciais surgidas em cada momento (SOUZA, 2008).

Em 2001, foi elaborado um amplo diagnóstico da estrutura física da Estação e dos refúgios. Era o início de uma fase de pesquisas voltadas para a busca por soluções aos problemas imediatos e formação de uma base de conhecimento para o desenvolvimento tecnológico continuado.

Em 2003/2004, a fim de melhorar o apoio às pesquisas e reduzir ainda mais os impactos ambientais, teve início o planejamento de revitalização da Estação. Nessa fase foi também instalado um moderno sistema de telecomunicações, totalmente nacional, com *internet* de maior velocidade (SOUZA, 2008).

Em 2004/2005, a revitalização e a modernização da Estação foram iniciadas. Orientado pelo Plano Diretor elaborado pela equipe do LPP-UFES e aprovado pelo coordenador da Comissão Interministerial de Recursos do Mar (CIRM), o Arsenal da Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ), seguindo os projetos daquele laboratório, passou a frequentar a Estação, verão e inverno, realizando em ritmo acelerado as obras de revitalização. Em 2005/2006, as obras continuaram: dez novos tanques de combustível com capacidade de

30.000 litros cada um começaram a ser instalados e o antigo incinerador foi substituído por um modelo semiautomático, mais moderno e eficiente (SOUZA, 2008).

Em 2008/2009, foram substituídos os antigos geradores de energia elétrica, de 150 kVA, por 4 novos motogeradores de 240 kVA cada, sendo três operados conforme as necessidades e um para emergência. Os novos geradores, além de mais eficientes e silenciosos, permitiam também a operação e monitoramento remoto pela rede de computadores. Com a mudança dos geradores, toda a rede elétrica foi, por opção, alterada para operação somente em 220 volts.

Em janeiro de 2011, a Estação Antártica já ocupava uma área de 2.250 m², além de refúgios isolados e laboratórios anexos. Sua capacidade máxima passara dos iniciais 12 ocupantes, em 1984, para 60 no corpo principal e 18 nas infraestruturas externas. O consumo de óleo *diesel* na Estação já alcançava os 360.000 litros/ano. A Figura 1.3 apresenta uma foto aérea da edificação principal da EACF, heliponto e tanques de combustíveis, registrada após os trabalhos de expansão e revitalização (MB, 2010).



Figura 1.3 - Fotografia do corpo principal da EACF (centro da foto), heliponto (à direita) e tanques de combustíveis (à esquerda), logo após os trabalhos de expansão e revitalização (MB, 2010).

No entanto, na madrugada do dia 25 de fevereiro de 2012, ocorreu um incêndio na EACF que começou na praça de máquinas e se espalhou para a parte habitável da Estação. O prédio principal da EACF, onde ficavam a parte habitável e alguns laboratórios de pesquisas, foi completamente atingido pelo incêndio, tendo permanecidos intactos os refúgios (módulos isolados para casos de emergência), os laboratórios (de meteorologia, de química e de estudo da alta atmosfera), os tanques de combustíveis e o heliponto da Estação, que são estruturas isoladas do prédio principal. Duas vidas foram perdidas. Os militares Roberto Lopes dos Santos e Carlos Alberto Vieira Figueiredo morreram enquanto tentavam combater o incêndio (CCSM, 2012).

1.3 Justificativa do Estudo

Os motogeradores instalados na EACF, a partir de 2008, representaram mais um avanço do Brasil na Antártica, oferecendo ainda maior segurança na operacionalização, menores níveis de ruído e menores emissões relativas em comparação com os antigos. No entanto, a matriz energética da Estação continuava somente composta por uma tecnologia de geração cujas máquinas primárias eram motores alimentados a *diesel*, levando a um alto consumo anual de combustíveis fósseis e a altas emissões de gases poluentes para a produção de toda a energia elétrica e térmica necessária para operação da Estação.

Em 2011 foram necessários cerca de 360.000 litros de *diesel* para o funcionamento da Estação. Esse consumo superava a capacidade de armazenamento local, 300.000 litros, tornando-se um limitante à autonomia da EACF e à segurança de seus ocupantes, já que o óleo *diesel* era essencial para a manutenção das condições de sobrevivência, tanto pela necessidade de aquecimento quanto de produção de eletricidade para os sistemas de bombeamento de água e telecomunicações.

Na Antártica, o transporte de combustíveis exige grande esforço logístico e a operação é trabalhosa e perigosa, com risco de poluição ambiental por derrames ou vazamentos. Na EACF, o desembarque anual dos 360.000 litros de óleo *diesel*, do navio para a Estação, exigiam cerca de 60 deslocamentos das embarcações de transporte de combustível, o que tornava a operação demorada e ainda mais susceptível a incidentes ambientais dadas as condições climáticas desfavoráveis. Fato infelizmente comprovado pelo afundamento da chata de transporte de óleo nas proximidades da EACF, ocorrido em 2011.

O Tratado Antártico, em seu Protocolo de Preservação Ambiental impõe sérias restrições às atividades que possam provocar impactos ao meio ambiente, direta ou indiretamente, e prevê a adoção de medidas de avaliação do impacto ambiental, com o intuito de promover a adoção e o desenvolvimento de técnicas e tecnologias cada vez mais sustentáveis e menos impactantes para condução de atividades na Antártica. Dessa forma, justifica-se a necessidade de busca por soluções energéticas que propiciem a redução no consumo de combustíveis fósseis na Estação Brasileira, visando tanto reduzir o impacto gerado e riscos na região como garantir uma maior autonomia e segurança das operações na EACF.

1.4 Objetivo e Delimitação do Estudo

O principal objetivo da pesquisa é estudar e propor uma matriz energética diversificada para a EACF e possíveis eficientizações, com foco em soluções tecnológicas comerciais passíveis de implantação imediata, com uso já conhecido em condições antárticas e que propiciem parcelas de redução de consumo de combustíveis e emissões, de 20% ou mais, conforme estabelece o pacote de medidas climáticas e energéticas conhecido como 20-20-20 (EU, 2011). O presente estudo teve ainda o propósito de estimar os potenciais dos recursos renováveis disponíveis e extraíveis na região e reunir informações sobre as características energéticas da EACF, compondo um material de referência para futuros estudos de otimização e implantação, auxiliando na formação de uma base de conhecimento para o desenvolvimento tecnológico continuado de instalações brasileiras na Antártica.

Este trabalho limitou-se ao estudo dos potenciais de redução de consumo de combustível com a adoção das seguintes tecnologias: cogeração em motores de combustão interna, digestão anaeróbia, geração de energia elétrica a partir de aerogeradores e geração de energia elétrica a partir de painéis solares fotovoltaicos.

1.5 Materiais e Métodos

Este tópico apresenta o percurso metodológico adotado para a condução das diversas etapas do presente estudo, a saber:

- Pesquisa sobre tecnologias utilizadas em estações antárticas;
- Diagnóstico energético da EACF;
- Seleção de dados de entrada para estudos e simulações;
- Escolha das ferramentas de simulação;
- Levantamento dos potenciais energéticos;
- Definição de topologias e análise das matrizes híbridas;
- Escolha e proposta de uma matriz energética híbrida para a EACF.

1.5.1 Pesquisa sobre tecnologias utilizadas em estações antárticas

Foram pesquisadas as principais tecnologias utilizadas em estações antárticas referentes à geração e ao aproveitamento energético. A pesquisa foi realizada nos endereços eletrônicos de estações e institutos de pesquisa na Antártica, dispostos nas referências deste trabalho. Para conhecimento das tecnologias utilizadas em estações vizinhas à EACF, foram também realizadas expedições científicas à Estação polonesa Henrik Arctowisk e ao refúgio

norte americano, Copacabana. Em ambas, foram realizadas entrevistas semiestruturadas, com os responsáveis pelo funcionamento do setor energético. Apesar de Arctowisk e Copacabana apresentarem, respectivamente, soluções de cogeração nos motogeradores e uso de painéis solares aliados a um pequeno aerogerador, optou-se por não detalhá-las no presente trabalho devido ao pequeno porte das soluções e por não se apresentarem como inovações tecnológicas.

1.5.2 Diagnóstico energético

O diagnóstico energético da EACF baseou-se na metodologia apresentada em Martins & Haddad (2001), sendo adotadas as seguintes etapas:

- Levantamento de dados gerais da EACF;
- Elaboração de cronograma e estudo da infraestrutura energética da EACF;
- Elaboração do relatório de qualidade de energia da EACF;
- Elaboração do diagnóstico energético da Estação;

O levantamento dos dados gerais da EACF foi realizado no acervo do grupo de pesquisa ARQUIANTAR no LPP-UFES. Nessa etapa foram estudados a localização, o clima, a logística e as rotinas da Estação.

Com base nesse levantamento, foi estabelecido um cronograma de ações para as atividades de campo na Estação para o estudo da infraestrutura energética. O cronograma seguiu estas etapas: reuniões com eletricista, mecânico e engenheiro da Estação; levantamento das plantas elétricas e documentação afim; reconhecimento da infraestrutura; identificação dos pontos de interesse para conexão do analisador de energia; caracterização do consumo energético; avaliação das perdas de energia; registro fotográfico; registro com equipamento analisador de energia; e elaboração de relatório sucinto de campo. A expedição científica na Estação Antártica Comandante Ferraz foi realizada de 04/12/2010 a 21/01/2011. Todas as ações previstas no cronograma foram realizadas. O ANEXO A apresenta a relação de datas e locais em que foram realizados os registros de qualidade de energia. Os registros foram executados de forma ordenada, dos circuitos principais para os terminais, de acordo com a disponibilidade do eletricista do Grupo Base (GB) e conforme a dinâmica da Estação permitiu.

Os indicadores analisados para a avaliação da qualidade de energia da EACF foram: a tensão de alimentação no fornecimento de energia, desequilíbrio de tensão, desequilíbrio de corrente, e as distorções harmônicas. O cálculo do desequilíbrio de tensão segue a

metodologia indicada pela norma da *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) – MG-14.34 e as distorções harmônicas obedecem às recomendações do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), “*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”, *Standard 519 – 1992* e do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

No diagnóstico energético da EACF foi analisado o perfil anual de consumo de combustíveis, de energia elétrica e térmica. A resolução dos dados de consumo de combustíveis foi diária para motogeradores e de quatro em quatro dias para as caldeiras, devido ao intervalo entre os abastecimentos dos tanques das caldeiras. Nessa etapa, foram também avaliados alguns circuitos das cintas térmicas da área externa da Estação.

No que diz respeito à documentação de equipamentos, foram feitas cópias dos materiais citados na Tabela A.2, para a posterior consulta e apoio à realização dos estudos. Foram também realizados os registros fotográficos, conforme mostra Tabela A.3, ANEXO A.

1.5.3 Seleção de dados de entrada para estudos e simulações

Para os estudos e simulações de estimação da demanda elétrica e térmica, potencial eólico e solar fotovoltaico, cogeração e aproveitamento de resíduos sólidos na Estação, bem como análise de desempenho de matrizes, foram utilizados as bases conforme a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Relação dos dados utilizados nos levantamentos de potencial e nas simulações de matrizes.

DADOS	CARACTERÍSTICAS	FONTE
Velocidade do vento, temperatura e pressão atmosférica na região da EACF	Período: 14 anos, de 93 a 2006 e Janeiro de 2011 Resolução: valor médio a cada 3h Altura da torre de medição: 10 m Elevação do terreno: 16 m	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE, 2010)
Radiação Solar na região da EACF	Período: 1 ano Resolução: média a cada 1h Dimensão da Célula: 1° X 1° Ponto médio da célula: 62° 30' S 58° 30' W	NASA SSE World (NASA, 2011)
Consumo de Combustíveis na EACF	Óleo <i>diesel</i> consumido pelas Caldeiras Período: 1 ano, 2011 Resolução: média a cada 4 dias	Marinha do Brasil (MB) (MB, 2011)
	Óleo <i>diesel</i> consumido pelos Motogeradores Período: 1 ano, 2011 Resolução: média a cada 1 dias	
Resíduos gerados na EACF	Período: valor médio diário por habitante em 30 dias para dados de 2006/2007 e valor médio mensal de 2009/2010	(WOELFFEL, ALVAREZ, <i>et al.</i> , 2007) e (SECIRM, 2010)

1.5.4 Softwares de simulação

Para análise gráfica do recurso eólico foi utilizada a ferramenta computacional de análise de ventos *WindoGrapher 2.01*, implementado pela *Mistaya Engineering*. Esta ferramenta utiliza um modelamento já validado pelo Laboratório de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL – *National Renewable Energy Laboratory*) e permite considerar influências da temperatura e pressão atmosférica nas simulações, bem como análises gráficas horária, diária, mensal, anual ou geral dos dados. Permite também a simulação e comparação de desempenho entre diversos modelos comerciais de aerogeradores (WINDOGRAPHER).

Para a análise gráfica do recurso solar e simulação de matrizes híbridas, foi utilizada a ferramenta computacional *HOMER 2.81*, um modelo de otimização de sistemas de potência que permite avaliar o desempenho de matrizes energéticas com fontes renováveis de energia e cogeração. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos (HOMER ENERGY, 2011).

A escolha dessas ferramentas computacionais foi motivada pela conhecida certificação de seus modelos pelo NREL, pelas funcionalidades e geração de gráficos em formatos pré-definidos, e também pelo fato de o presente trabalho se constituir de uma análise integrada dos recursos eólico, solar, de cogeração, com as demandas térmicas e elétricas da EACF, levando em consideração diferentes tecnologias de geração, conversão, recuperação e armazenamento de energia.

1.5.5 Levantamento dos Potenciais Energéticos

Para o levantamento dos potenciais energéticos da EACF, foram realizados os cálculos para um período total de um ano, com a máxima resolução dos dados, a fim de mensurar o volume anual de combustível possível de ser economizado pela adoção de cada tecnologia.

O potencial de utilização dos resíduos sólidos se apoiou nos estudos de Reichert (2005), seguindo as etapas:

- Levantamento da produção mensal de resíduos sólidos;
- Estimativa de potencial energético para Digestão Anaeróbia (DA);
- Análise de viabilidade.

A estimativa do potencial de cogeração baseou-se nas modelos de Lora & Nascimento (2004) e de Addad & Lora (2006), e seguiu as seguintes etapas de:

- Levantamento da produção diária de energia térmica nos motogeradores;
- Levantamento do consumo diário de energia térmica nas caldeiras;

- Estimacão de potencial energético para cogerao no incinerador;
- Análise de viabilidade.

As estimacões dos potenciais de gerao de energia eólica e solar basearam-se nos modelos de Patel (1999) e Reis (2003). Para o levantamento do potencial eólico da EACF adotou-se as seguintes etapas:

- Análise das médias anuais e mensais das velocidades dos ventos;
- Análise das direes dos ventos;
- Análise mensal da distribuico de frequência das velocidades dos ventos;
- Cálculo do potencial eólico disponível e extraível.

Para a estimacão do potencial solar da EACF adotou-se as seguintes etapas:

- Levantamento da radiao horizontal global e ndice de claridade, para a região da EACF;
- Análise da influência do refletividade do solo e do posicionamento do painel na produo anual de energia;
- Cálculo do potencial solar para um modelo comercial de painel fotovoltaico, considerando diferentes técnicas de posicionamento.

1.5.6 Definio de topologias e análise das matrizes híbridas

Para mensurar as vantagens e desvantagens de cada composico de matriz energética para a EACF, foi avaliado o desempenho de topologias de matrizes Diesel-Eólico-Solar, com e sem baterias, aliadas sempre ao uso de cogerao nos motogeradores. As escolhas dos modelos de aerogerador e painel fotovoltaico basearam-se nos desempenhos apresentados nas etapas de levantamento de potencial eólico e solar, respectivamente. Os motogeradores adotados para as simulaes foram do mesmo modelo e potência dos que eram utilizados na Estaco, os quais são detalhados na etapa de descrio da infraestrutura energética da EACF.

Após a insero dos dados técnicos dos aerogeradores e dos painéis fotovoltaicos no HOMER, foi realizada a simulao de uma matriz energética com uma topologia semelhante a que existia na Estaco em 2011 (4 motogeradores e 2 caldeiras, sem uso de cogerao), a fim de verificar a consistência dos valores obtidos em relao aos valores reais.

Demonstrada a consistência do modelo utilizado pelo HOMER, foram simuladas e analisadas 42 topologias de matrizes Diesel-Solar e 42 Diesel-Eólica, com potências renováveis instaladas variando de 15 kWp a 315 kWp, para avaliar separadamente como cada tecnologia se comportava quanto a reduo no consumo anual de combustível, com e sem o uso de baterias. As solues de matrizes foram separadas em três grupos, em funo da

Potência Renovável Instalada (PRI) e Demanda Média da Estação (DM): $PRI < DM$, $PRI \approx DM$ e $PRI > DM$. Para avaliação dos resultados foram elaborados gráficos de consumo de combustível e de litros de *diesel* economizados por quilowatt instalado para cada caso simulado.

Para avaliar o comportamento das matrizes Diesel-Eólica-Solar quanto ao percentual de economia anual de combustível possível de ser alcançada, foram simuladas 81 matrizes energéticas com PRI variando de zero a 270 kW_p, em passos de 15 kW_p. Os resultados foram reunidos em uma tabela e aplicada uma escala tricolor aos valores e definidas regiões possíveis de operação sem o uso de baterias.

1.5.7 Escolha e proposta de uma matriz energética híbrida para a EACF

Os resultados das simulações foram comparados nos quesitos: redução no consumo de combustível, segurança e complexidades de logística e instalação em ambiente antártico. Para facilitar manutenções e minimizar os riscos em caso de falhas elétricas, mecânicas ou incêndios, as composições das matrizes foram estabelecidas de maneira a possibilitar estruturas modulares e redundantes, de operação simultânea e ou individual. Para a melhor eficiência de logística e manutenção, foram escolhidos os componentes da matriz energética de forma a possibilitar reduzidos volumes e massas e permitir reduzido estoque de sobressalentes. As características de cada situação foram avaliadas e a topologia a ser proposta foi eleita e detalhada.

1.6 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentado um breve histórico sobre o continente antártico, passando pelos principais marcos históricos da região, como a chegada de Amundsen ao Polo Sul em 1911 e assinatura do Tratado da Antártica em 1959. Foi apresentado também um histórico da evolução da EACF, desde a fundação da EACF, em 1984, com sua capacidade inicial 12 pessoas e 150 m², até o incêndio ocorrido em fevereiro de 2012, onde sua área construída já superava 2.250 m² e sua capacidade passara para 60 pessoas no corpo principal e 18 pessoas nas estruturas externas.

A justificativa do estudo e o percurso metodológico seguido para a obtenção da proposta de uma matriz energética híbrida para a Estação Brasileira, desde as etapas de diagnóstico energético da EACF, até o levantamento de potenciais locais e análise de diferentes composições de matrizes, foram apresentados e detalhados.

Na sequência, o Capítulo 2 irá revisar conceitos fundamentais sobre os principais assuntos que são abordados no decorrer do trabalho a fim de permitir a melhor compreensão do mesmo.

Capítulo 2: Energia e o Desenvolvimento Sustentável

Este capítulo apresenta conceitos fundamentais relacionados à produção e utilização de energia a partir de fontes renováveis e não renováveis. São abordadas tecnologias para aproveitamento de calor, uso de biocombustíveis, aplicação de painéis fotovoltaicos, avaliação de potencial eólico, escolha de aerogeradores e aproveitamento de resíduos sólidos para produção de energia. São também apresentados aspectos referentes à influência do clima sobre motogeradores, sistemas de iluminação, redes de água e esgoto, painéis solares e aerogeradores.

2.1. Energias renováveis e a sustentabilidade

A produção de energia, seja a partir de fontes renováveis ou não, gera impactos ambientais em toda sua cadeia de desenvolvimento, desde a captura de recursos naturais básicos para seus processos de produção, até seus usos finais. Para minimizar esses impactos, é necessário que esses problemas sejam tratados com uma visão holística, incluindo não apenas a adoção de inovações tecnológicas, mas também o entendimento dos aspectos envolvidos na produção e consumo (REIS, 2003).

As fontes primárias utilizadas para geração de energia elétrica podem ser divididas entre:

- Fontes não renováveis: são aquelas passíveis de se esgotar por serem utilizadas numa velocidade bem maior do que levam para se formar. Estão incluídos nesta categoria os derivados de petróleo, os combustíveis radioativos, a energia geotérmica e o gás natural (REIS, 2003);
- Fontes renováveis: são aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que sua utilização energética, como as águas dos rios, marés, sol e ventos. São também consideradas fontes renováveis de energia aquelas cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de utilização energética. Exemplos destas fontes são a cana-de-açúcar, florestas energéticas² e os resíduos animais, humanos e industriais (REIS, 2003).

Um dos principais aspectos negativos da utilização de combustíveis fósseis é oriundo da emissão de poluentes e do gás de efeito estufa conhecido como dióxido de carbono, CO₂. A liberação de dióxido de carbono pela queima de combustíveis fósseis apresenta-se como

² As florestas energéticas são plantações florestais industriais cultivadas com o objetivo de servirem como insumo para a produção de energia e desempenha importante papel na utilização de terras degradadas.

uma atividade desreguladora do equilíbrio natural do ciclo do carbono e pode levar ao aquecimento do planeta (REIS, 2003). Além da emissão de poluentes, os riscos ambientais oriundos dos processos de extração e de logística até os pontos de consumo também são fatores que desmotivam o uso dos combustíveis fósseis.

Antes da revolução industrial, o ciclo de carbono estava equilibrado. Porém, com a industrialização e a intensificação da queima de combustíveis fósseis, o carbono que estava armazenado no solo e nos oceanos durante milênios passou a ser jogado, pelas atividades humanas, de volta para atmosfera em um curto espaço de tempo. Assim, a emissão de gás carbônico para a atmosfera tornou-se maior que a capacidade natural de absorção (CEPTEC-INPE, 2011).

De forma a visualizar comparativamente os níveis das emissões de CO₂ por diversas tecnologias de geração de energia elétrica, o gráfico da Figura 2.1 apresenta as emissões diretas e indiretas de CO₂ de alternativas renováveis e não renováveis. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN) são chamadas de emissões diretas aquelas provenientes da operação da planta, mineração, processamento, fabricação e transporte do combustível. Já as emissões indiretas são originadas na fabricação de máquinas e componentes para todo o ciclo de geração, fase de instalação do ciclo e de instalação da planta geradora (ABEN, 2010).

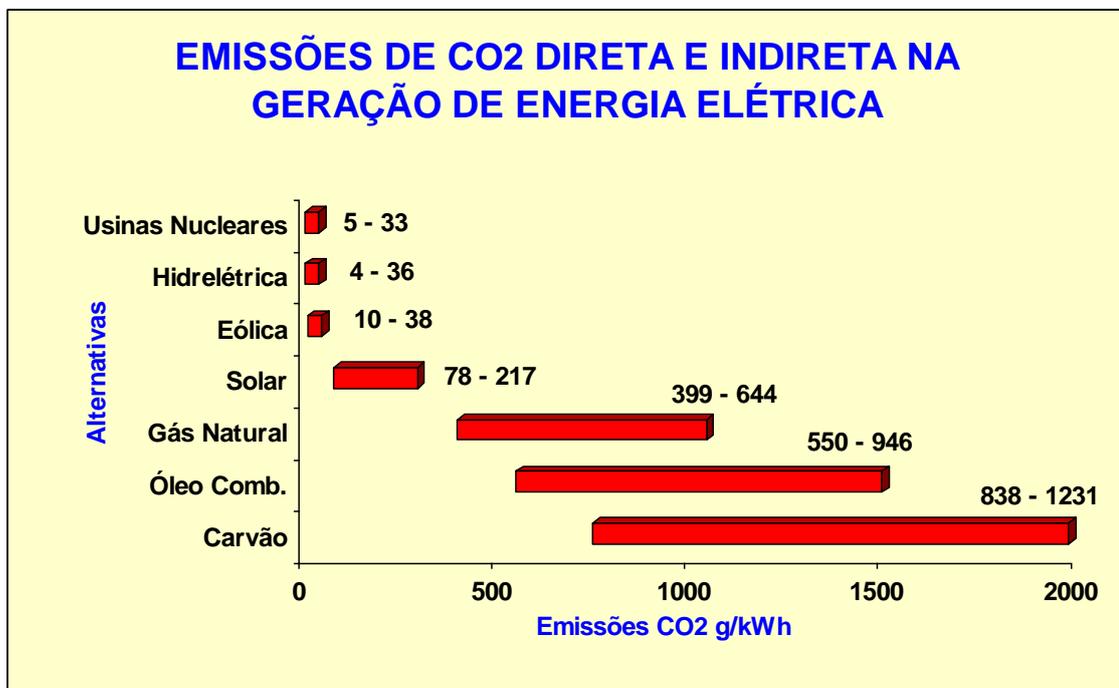


Figura 2.1 – Níveis das emissões de CO₂ para tecnologias de geração de eletricidade (ABEN, 2010).

A Figura 2.1 mostra que as menores taxas de emissão de dióxido de carbono por quilowatt gerado a partir de fontes renováveis são obtidas a partir de geração hidrelétrica, eólica e solar, sendo em geral cerca de 40 vezes menos impactantes que o uso de óleos combustíveis. Assim, alternativas energéticas que primem pela utilização de fontes renováveis aliadas a projetos que otimizem matrizes movidas a combustíveis fósseis configuram-se como as mais atrativas na busca pelo desenvolvimento sustentável.

Um fator de grande influência nos cenários energéticos é a implementação dos controles e ações previstos na Convenção do Clima³ (UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*) relacionada com o problema do aquecimento global. No Brasil, dentre os instrumentos de prevenção contra degradação ambiental, destacam-se a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), o Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EpIA) e as Licenças Ambientais. A AIA destina-se a procedimentos necessários ao planejamento, o EpIA é o documento que relata as indicações estabelecidas em normas jurídicas e a Licença, o ato administrativo que valida ou não o empreendimento. Os requisitos necessários para a instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação ambiental se consubstanciam na exigência do EpIA, pela elaboração e aprovação do Estudo de Inserção Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto no meio Ambiente (Rima). O EIA constitui um conjunto de atividades científicas e técnicas que incluem diagnósticos ambientais e definição de medidas mitigatórias. O Rima é um relatório que consubstancia as conclusões do EIA, e contém a discussão dos impactos positivos e negativos considerados relevantes. O EIA e o respectivo Rima servem para estabelecer a avaliação do impacto ambiental (REIS, 2003).

Na Antártica, destaca-se como principal instrumento de prevenção contra a degradação ambiental, o Protocolo ao Tratado da Antártica sobre Proteção ao Meio Ambiente, conhecido como Protocolo de Madri. O Protocolo de Madri em seu artigo terceiro e anexo primeiro, define inúmeros princípios relativos à proteção do meio ambiente e avaliação de impacto ambiental (MMA, 2009).

2.2. Otimização de desempenho em grupos Motogeradores

Tipicamente, na geração de energia elétrica a partir de motogeradores, um Motor Alternativo de Combustão Interna (MACI) converte energia química contida no combustível

³ A Convenção do Clima foi oficialmente criada na Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro, em 1992, com o objetivo de estabilizar as concentrações de gases de efeito de estufa em níveis que não impliquem alterações climáticas perigosas (EU, 2011).

em potência mecânica que é empregada para rotacionar o eixo de um gerador elétrico, a fim de converter esse movimento em potência elétrica. Esse sistema é denominado como Grupo Motor Gerador (GMG) ou apenas como motogerador.

Os GMG's, apesar de amplamente utilizados, apresentam de forma geral eficiências inferiores a 50%, fato ocasionado pelas elevadas perdas térmicas inerentes aos MACI. Atualmente, na aplicação de GMG's, tem avançado cada vez mais a implementação de soluções visando à minimização das perdas inerentes e o máximo aproveitamento da energia térmica cogenerada (ADDAD e LORA, 2006).

Balço energético e aproveitamento da energia cogenerada nos MACI

Os MACI podem ser classificados em dois grupos principais: motores de ignição por centelha (ciclo Otto), e os de ignição por compressão (ciclo *diesel*). Em geral, os MACI comerciais, apresentam eficiências que variam de 25% a 45%, entretanto, atualmente os fabricantes trabalham para alcançar eficiências de 50% a 55% (ADDAD e LORA, 2006). Para entendimento dos fluxos de energia em um MACI, a Figura 2.2 apresenta a distribuição de energia primária de um motor V32/40DF fabricado pela MAN B&W, *dual-fuel* (gás e *diesel*) (ADDAD e LORA, 2006).

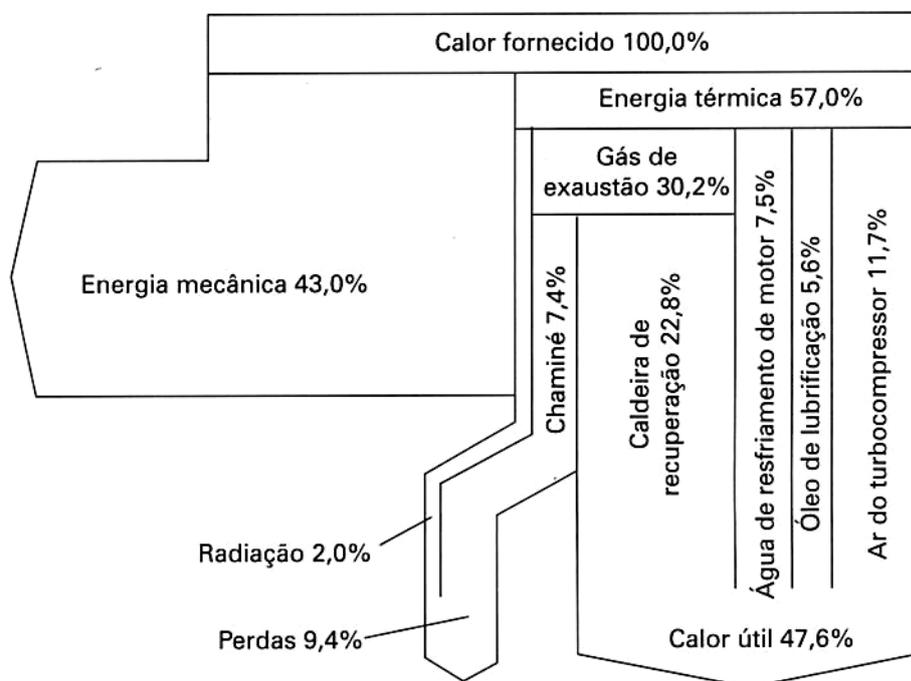


Figura 2.2 - Distribuição de energia primária em um *dual-fuel* V32/40DF fabricado pela MAN B&W (ADDAD e LORA, 2006).

A Figura 2.2 mostra que, apesar de 57% de todo o combustível consumido pelo motor em questão ser convertido em energia térmica, cerca de 80% desse calor cogenerado pode ser

recuperado. A esse calor passível de recuperação e utilização, dá-se o nome de calor útil. O calor dos gases de escape pode ser aproveitado através de uma caldeira de recuperação, sendo permitido o resfriamento até temperaturas mínimas de aproximadamente 120°C, a depender da tecnologia e do combustível utilizado. O calor proveniente do circuito de refrigeração do bloco do motor pode ser recuperado em uma temperatura de 80°C a 90°C, já o calor do circuito do óleo lubrificante poderá ser recuperado a um nível de temperatura de 60°C a 70°C (ADDAD e LORA, 2006).

A essa técnica de aproveitamento do calor expelido no processo de geração de energia devido à característica inerente à tecnologia utilizada, dá-se o nome de cogeração, ou aproveitamento da energia cogerada. O uso da cogeração permite o aumento da eficiência global do sistema e dessa forma colabora para a redução do nível emissão de poluentes por unidade de energia produzida (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Quanto ao desempenho ambiental, os MACI possuem um dos maiores níveis de emissão dentre as tecnologias de geração de energia elétrica, principalmente se alimentados a *diesel*. Por isso, é essencial o uso de dispositivos de controle de emissão nos MACI. De acordo com Addad & Lora (2006), os três tipos básicos para controle de emissão pós combustão incluem:

- Sistemas com catalizadores de três vias – reduzem NO_x (óxidos de nitrogênio⁴), CO (monóxido de carbono) e hidrocarbonetos em até 90%. São amplamente utilizados em aplicações automotivas;
- Redução seletiva catalítica – normalmente utilizados em motores com mais de 2 MW. Nesse sistema, um agente redutor de NO_x, como amônia por exemplo, é injetado no gás de exaustão quente, antes de passar no reator catalítico, alcançando eficiência de remoção entre 80-95%;
- Oxidação Catalítica – promovem a oxidação do CO e de hidrocarbonetos não queimados em CO₂ e água. Possuem eficiências de conversão de CO de 95% ou superior.

Uso de Biocombustíveis em motogeradores:

Recentemente, a Vale Soluções em Energia (VSE) iniciou a produção de motogeradores de até 1 MW, de alto desempenho, alimentados por combustíveis renováveis e ambientalmente sustentáveis, como o etanol hidratado sem aditivos. A Tabela 2.1 apresenta

⁴ Óxidos de nitrogênio: São compostos nitrogenados formados a partir da queima de combustíveis em alta temperatura. Podem causar problemas respiratórios e chuvas ácidas (LORA e NASCIMENTO, 2004).

um comparativo de desempenho dos motogeradores a etanol da VSE com geradores a *diesel* (VSE, 2011).

Tabela 2.1- Comparativo entre grupos motogeradores a *diesel* e a etanol (VSE, 2011).
* média de motores de mesma faixa de potência.

Dados	Unidade	GMG Etanol VSE	GMG Diesel*
Consumo volumétrico	l/h	157,4	88,2
Poder calorífico	MJ/kg	25,5	42,74
Densidade	kg/m ³	809,3	839,5
Potência consumida pelo ventilador	kW	11	11
Eficiência do gerador	%	93	93
Potência elétrica do GMG	kWe	336	332
Eficiência do GMG	%	37,2%	37,8%

Apesar do motogerador a etanol apresentado na Tabela 2.1 demonstrar eficiência semelhante ao modelo à *diesel*, observa-se que o volume de etanol consumido é 1,78 vezes superior ao consumo médio de *diesel*. Esse fato é observado, principalmente, devido ao menor poder calorífico do etanol em relação ao do óleo *diesel*. Dessa forma, será necessária uma maior capacidade de armazenamento local e ou maior frequência de abastecimento, quando comparado ao uso de motogeradores movidos à *diesel*.

Um biocombustível que tem se mostrado atrativo, tanto do ponto de vista ambiental quanto em desempenho, é o biodiesel. Esse biocombustível pode ser de origem vegetal ou animal e apresenta poder calorífico em média apenas 7,9% menor que o óleo *diesel*, quando de origem vegetal e 10,6% menor quando a origem é animal (EPA, 2002).

O biodiesel pode ser utilizado puro ou em proporções, misturados ao *diesel* de origem fóssil. Uma mistura B20, por exemplo, refere-se a um combustível com 20% de biodiesel e 80% de *diesel*. Apesar do esperado aumento no consumo de combustível com o uso do biodiesel comparativamente ao *diesel* puro, Ferrari *et al.* (2005) obteve resultados que demonstraram redução do consumo nos casos de utilização de biodiesel B5, B10 e B20 em um gerador de pequeno porte (4,5 cv). A Figura 2.3 apresenta a variação no consumo de combustível obtida por Ferrari *et al.* (2005), em um gerador movido por um motor marca Yanmar do Brasil S.A, modelo NSB50 (motor *diesel*, monocilindro horizontal, 331cc, 4,5cv @ 1800rpm, 4 tempos, com injeção indireta), mantido sob as mesmas condições de operação, para as alimentações por *diesel* puro, por misturas a 5, 10, 20, 40, 60 e 80% de biodiesel e com biodiesel puro.

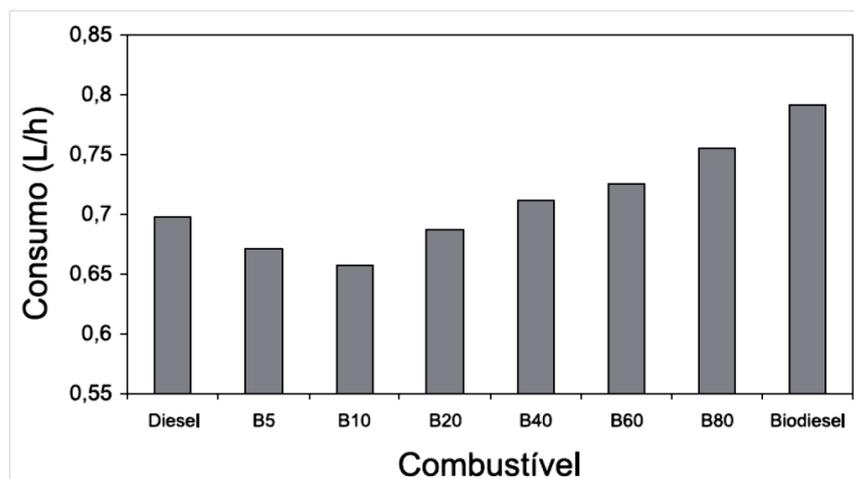


Figura 2.3 - Consumo de combustível em um motogerador Yanmar NSB50, alimentado a *diesel* e para diferentes proporções de biodiesel (FERRARI, OLIVEIRA e SCABIO, 2005).

2.3. Fundamentos Para Aplicação de Painéis Fotovoltaicos

A radiação solar recebida pela Terra pode ser considerada um recurso renovável elementar e inesgotável, responsável por promover a vida no planeta. No entanto, sua oferta apresenta variações cíclicas diárias e sazonais para cada específica posição geográfica sobre a esfera terrestre. Esse comportamento ocorre devido à inclinação do eixo terrestre e dos movimentos de translação e rotação do planeta, que criam a percepção de uma movimentação aparente do sol em relação à Terra (ALTENER-GREENPRO, 2004).

A posição angular de incidência solar em relação ao plano do Equador é chamada de declinação solar (δ) e varia do verão para o inverno entre $-23,45^\circ$ a $23,45^\circ$, conforme ilustra a Figura 2.4. A declinação solar pode ser calculada pela Equação (2.1), onde n equivale ao dia do ano em que se deseja calcular a declinação ($1 < n < 365$). A soma da declinação com a latitude do local determinará a trajetória aparente do sol durante o ano (CRESESB-GTES, 2004).

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Diariamente, devido ao movimento de rotação da terra em torno de seu próprio eixo, também ocorre a variação da posição (direção) solar, apreciada do nascer ao pôr do sol. Este ângulo é chamado de azimute (α), pode variar entre -180° e 180° , e indica a direção em que o sol se encontra a uma dada hora do dia em relação ao ponto de observação (o azimute avança 15° a cada hora) (ALTENER-GREENPRO, 2004).

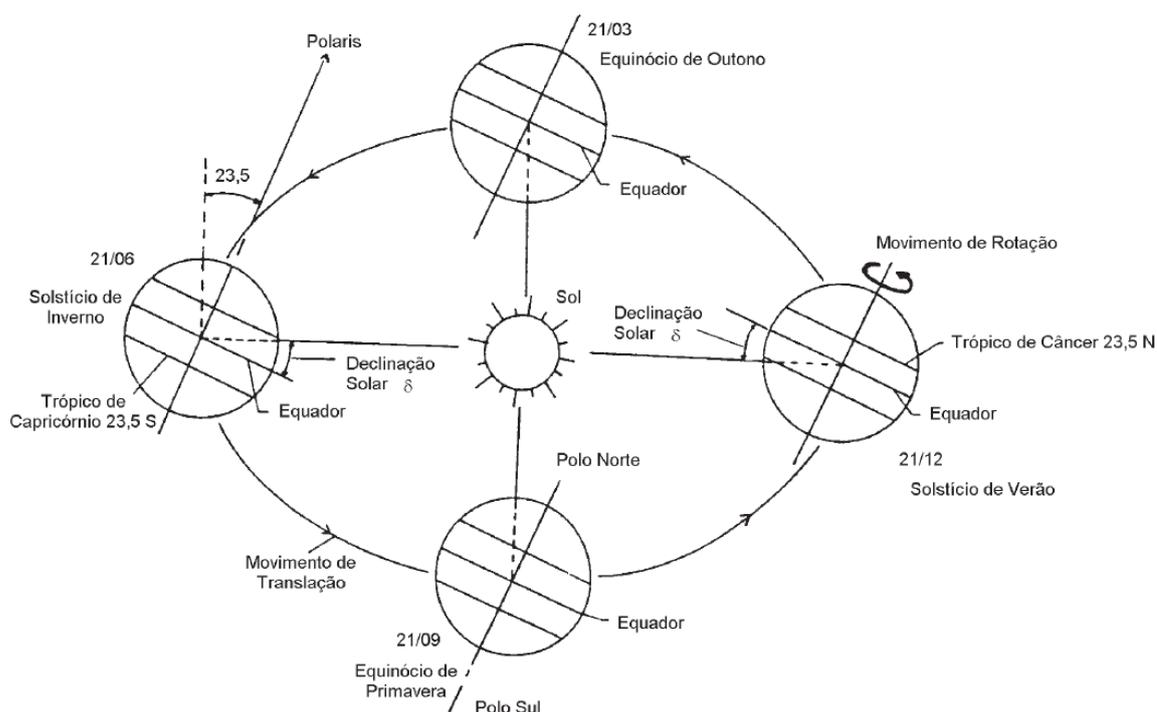


Figura 2.4 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5° (CRESESB-GTES, 2004).

De acordo com dados da Organização Meteorológica Mundial a radiação solar incidente no topo da atmosfera é em média 1367 W/m^2 (WMO, 2012; CRESESB-GTES, 2004). No entanto, apenas uma fração da radiação solar extraterrestre atinge a superfície terrestre devido à reflexão e absorção dos raios solares na atmosfera. Esta fração que atinge o solo é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. Caso a superfície receptora esteja inclinada em relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de albedo ou refletividade do solo (CRESESB-GTES, 2004). A soma dessas três parcelas de radiação sobre um plano horizontal é chamada de radiação global horizontal ou radiação solar total. A Figura 2.5 ilustra as radiações direta, difusa e refletida (NREL, 2012).

A relação entre a radiação global e a radiação no topo da atmosfera é chamada de índice de claridade. Esse índice varia de acordo com as condições meteorológicas locais e do posicionamento solar em relação à região. De forma geral, os valores do índice de claridade situam-se em torno de 0,75 para um mês ensolarado, e 0,25, para um mês nublado (NREL, 2012). Em condições atmosféricas ótimas, céu claro e sem nuvens, a iluminação máxima observada ao meio dia num local situado ao nível do mar é cerca de 1.000 kW/m^2 (REIS, 2003).

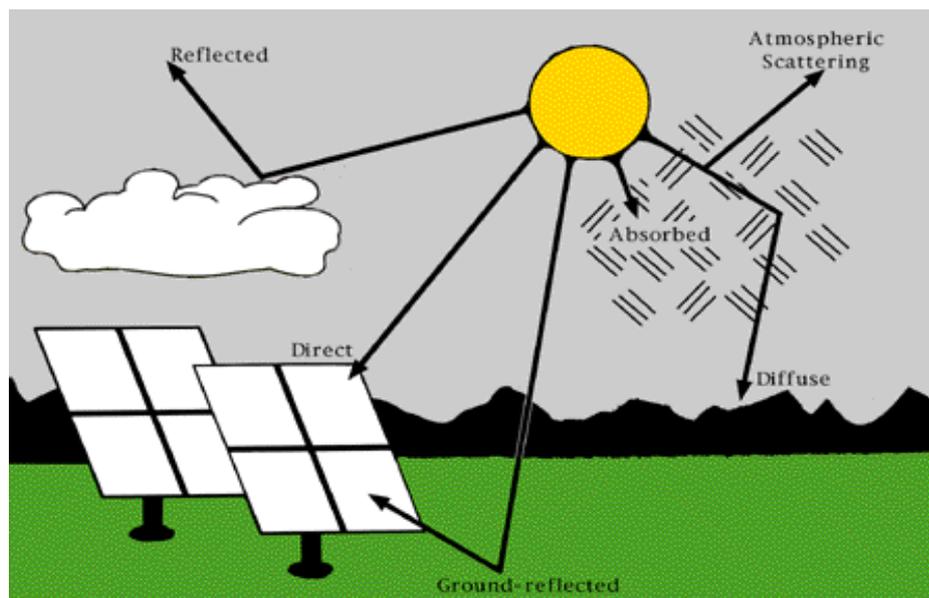


Figura 2.5 - Ilustração das componentes da radiação solar direta, difusa e refletida (NREL, 2012).

Dentre os sistemas baseados no uso de energia solar para geração de eletricidade, destacam-se os sistemas fotovoltaicos, que efetuam a transformação da energia solar diretamente em energia elétrica através de células fotossensíveis. Estas células são componentes optoeletrônicos, constituídas de materiais semicondutores sobrepostos, de forma a propiciar um efeito fotoelétrico de liberação da energia do fóton diretamente em eletricidade (REIS, 2003; CRESESB-GTES, 2004).

Atualmente existem diversas pesquisas no sentido elevar a eficiência das células fotovoltaicas, principalmente através da utilização de novos materiais e técnicas de sobreposição de múltiplas junções, de forma a propiciar o maior aproveitamento do espectro da radiação solar. No entanto, na atualidade as células multijunções são prioritariamente utilizadas diretamente em módulos aeroespaciais ou acopladas a lentes concentradoras para uso terrestre. A Figura 2.6 apresenta o gráfico de evolução das eficiências das tecnologias de células fotovoltaicas, desde 1975 a 2011. A eficiência de uma célula é a relação entre a potência elétrica gerada e a potência luminosa incidente na célula fotovoltaica (NREL, 2012).

Na prática, as células são conectadas em arranjos (série e/ou paralelo) de forma a produzir tensão e corrente adequadas para a utilização da energia, esses arranjos são chamados de painéis ou módulos fotovoltaicos. Em geral, o que realmente se deseja de um módulo é que o mesmo carregue uma bateria o mais rapidamente possível. Essa rapidez está relacionada com a potência que o módulo pode gerar sob diferentes condições. Assim sendo, os parâmetros ou características elétricas de um painel precisam ser conhecidos para que se possa selecionar o tipo e quantidade de módulos apropriados para cada sistema em particular (CRESESB-GTES, 2004).

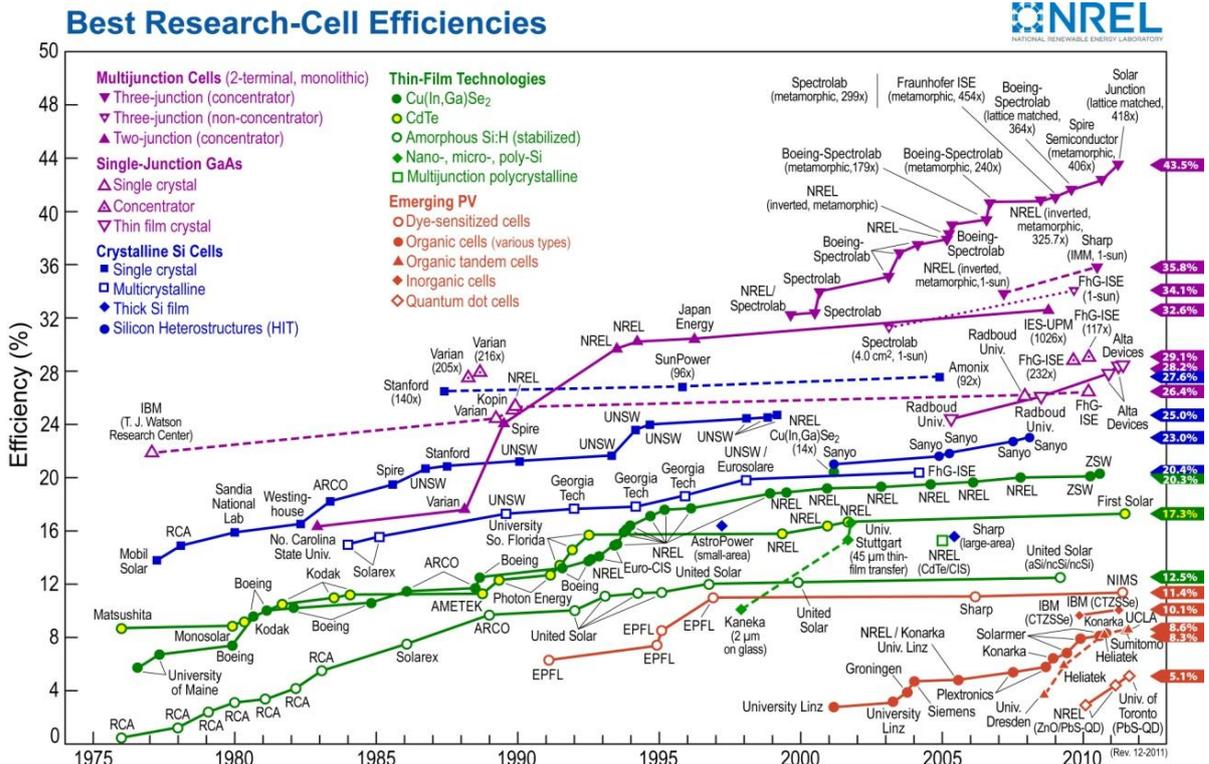


Figura 2.6 - Evolução das tecnologias de células fotovoltaicas, quanto à eficiência (1975 a 2011) (NREL, 2012).

Quando um equipamento consumidor de energia é conectada ao painel, as medidas de corrente e tensão podem ser plotadas em um gráfico de corrente *versus* tensão ($I \times V$). Para cada ponto do gráfico $I \times V$, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A Figura 2.7 apresenta as curvas $I \times V$ e de potência para uma célula fotovoltaica e, conseqüentemente, para o módulo, destacando o ponto de potência máxima. O ponto de máxima potência (P_{mp}) corresponde ao produto da tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}). Para cada curva $I \times V$, existirá somente uma tensão e corrente para a qual a potência máxima pode ser extraída (CRESESB-GTES, 2004).

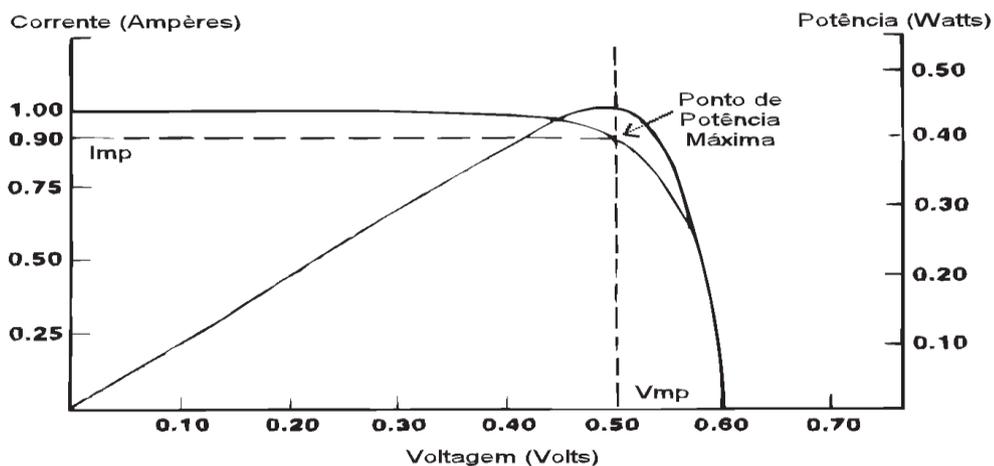


Figura 2.7 – Curvas típicas de potência e $I \times V$ de uma célula fotovoltaica padrão (CRESESB-GTES, 2004).

Cada painel solar, de acordo com tecnologias e materiais envolvidos em sua fabricação, possuem comportamentos característicos de tensão e corrente elétricas em função das condições de insolação e da temperatura de operação. Para extração da máxima potência do painel fotovoltaico é necessário que sua operação seja realizada sobre os pontos de tensão e corrente de máxima potência, V_{mp} e I_{mp} , respectivamente. A Figura 2.8 ilustra o comportamento das curvas $I \times V$ em função da variação da radiação solar (100 W/m^2 a 1000 W/m^2) e em função da temperatura de operação ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$). A variação da radiação solar incidente afeta diretamente a corrente máxima do módulo, enquanto a variação temperatura afeta mais significativamente a tensão máxima do módulo. Quanto menor a radiação incidente e maiores as temperaturas, pior será o desempenho do painel (CRESESB-GTES, 2004).

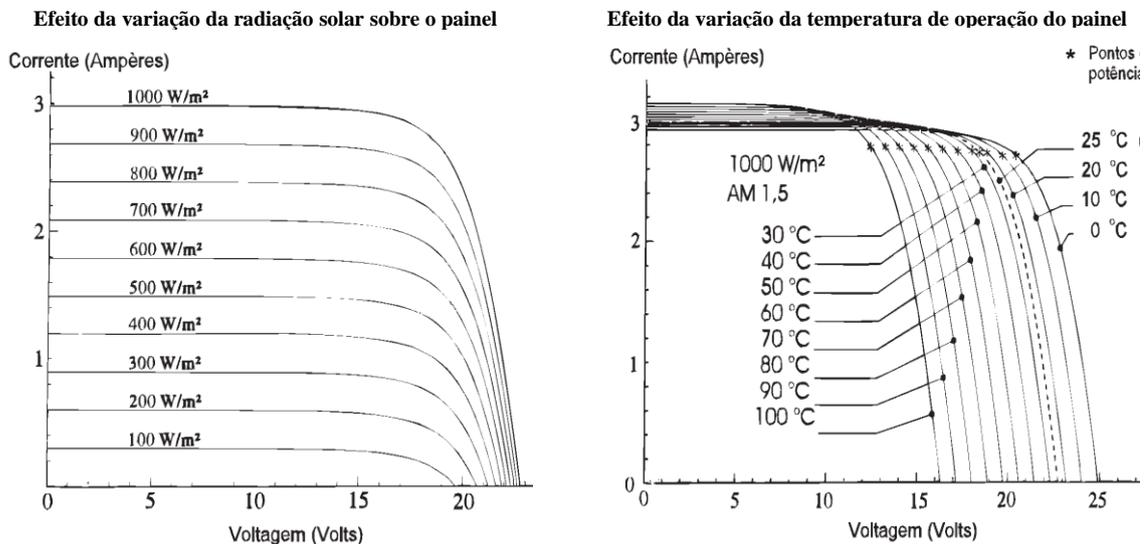
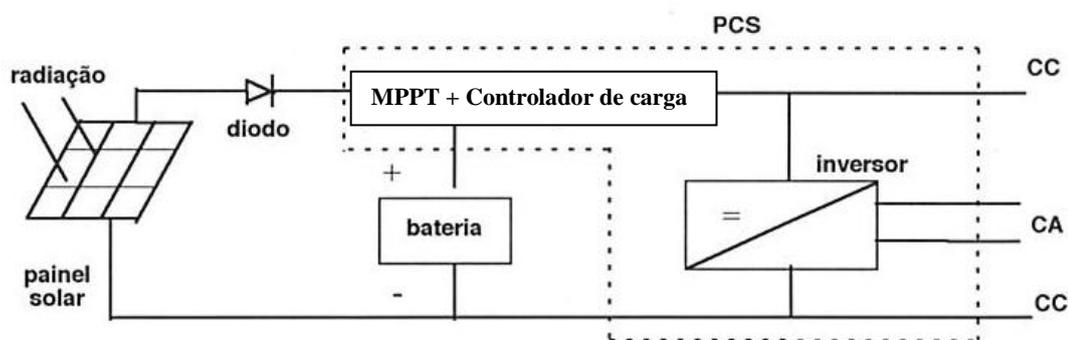


Figura 2.8 - Comportamento da curva característica $I \times V$ em função da radiação solar incidente e da temperatura de operação (CRESESB-GTES, 2004).

Dessa forma, os valores máxima potência ou potência de pico (P_{mp}), tensão de máxima potência (V_{mp}), corrente de máxima potência (I_{mp}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto circuito (I_{sc}) são os cinco parâmetros que especificam o painel sob dadas condições de radiação e temperatura de operação (CRESESB-GTES, 2004).

Para maximizar o aproveitamento da capacidade de geração dos módulos e adequar os níveis de tensão e corrente às condições de uso, existe o subsistema de condicionamento de potência, que compreende: seguidor do ponto de máxima potência (MPPT- *Maximum Power Point Tracking*), controlador de carga para recarga e proteção das baterias, e circuito inversor de frequência para conversão da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Este subsistema controla a energia enviada às baterias e aos pontos de consumo e permite que o painel seja operado sempre em seu ponto de máxima potência. A Figura 2.9 apresenta o

diagrama de blocos simplificado de um subsistema de condicionamento de potência (REIS, 2003).



PCS = subsistema condicionador de potência (*power conditioning subsystem*);

CC = corrente contínua;

CA = corrente alternada.

Figura 2.9 - Diagrama de blocos de um sistema solar fotovoltaico (REIS, 2003).

Quanto ao posicionamento dos painéis, os mesmos devem estar orientados de modo a melhor receber os raios solares durante o ano ou período de interesse. Dessa forma, para um posicionamento fixo, o painel deverá ser colocado inclinado com relação à horizontal de um ângulo próximo ao da latitude do lugar e sempre direcionado para o polo oposto ao do hemisfério em que encontra, ou seja, no hemisfério sul, o painel deverá estar posicionado em direção ao norte geográfico. Há, entretanto, outras formas de orientação de painéis solares com auxílio de sistemas de captação que seguem o Sol, tais como: conjunto seguidor de 1 eixo Norte-Sul (ajusta a inclinação do painel), de 1 eixo leste-oeste (ajusta o azimute do painel) e de 2 eixos ou altazimutal. (CRESESB-GTES, 2004).

2.4.Fundamentos para Aplicação de Aerogeradores

O vento, movimento do ar na atmosfera terrestre, é gerado principalmente pelo maior aquecimento das superfícies próximas ao equador (zona de maior incidência solar) do que perto dos polos (zona de menor incidência solar). O ar quente por ser menos denso tende a se elevar na atmosfera, o que induz a uma circulação de ar das zonas mais frias (Polos) em direção as mais aquecidas (Trópicos), conforme ilustra a Figura 2.10 (DELEITO, 1984; REIS, 2003). Essas circulações também são influenciadas pelos movimentos de rotação da terra, pela topografia e, ainda, por comportamentos característicos em áreas montanhosas e costeiras, dado o maior ou menor aquecimento de cada superfície, que reflete em diferentes sentidos de convecção das massas de ar. Por isso, para o melhor aproveitamento e transformação da energia do vento, é necessário coletar informações do perfil eólico o mais próximo possível da região de interesse. A Figura 2.11 ilustra o comportamento característico

dos ventos nas regiões costeiras e montanhosas, em função das alternâncias de insolação entre dia e noite.

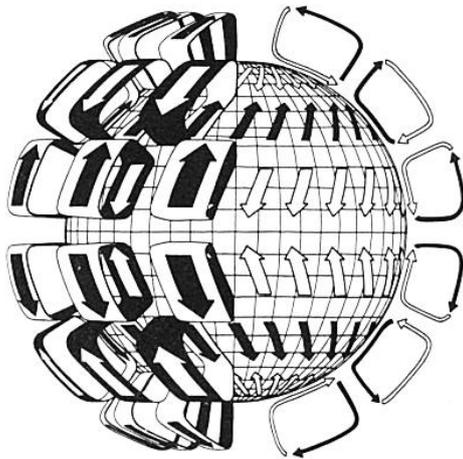


Figura 2.10 - Esquema de circulação de ar a escala planetária em um sistema rotacional, em que se produzem três circuitos independentes por hemisfério (DELEITO, 1984).

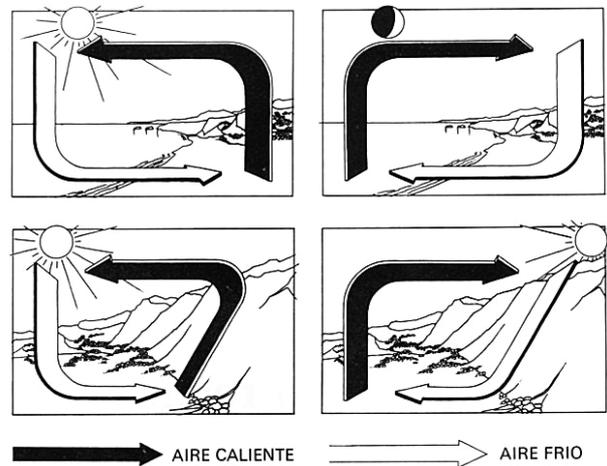


Figura 2.11 - Esquema das circulações do ar, produzidas pelas diferentes insolações recebidas em regiões costeiras e em regiões montanhosas (DELEITO, 1984).

Na avaliação do recurso eólico, uma das curvas mais importantes, a partir da qual a maior parte das análises pode ser realizada, é a curva de frequência das velocidades, que fornece o período de tempo, em termos percentuais, em que uma velocidade foi observada (REIS, 2003). Essa curva pode ser obtida através da escolha da curva de distribuição de Weibull que melhor contorne o histograma de frequências das velocidades. Essa técnica possibilita a caracterização do perfil eólico através de apenas duas constantes, os parâmetros “c” e “k” de Weibull, que se relacionam respectivamente com a velocidade média do recurso eólico e a concentração do recurso em torno do valor médio. A Figura 2.12 apresenta alguns dos diferentes contornos ou formatos de distribuições, que podem ser obtidos em função dos valores das constantes “c” e “k” da distribuição de Weibull (PATEL, 1999).

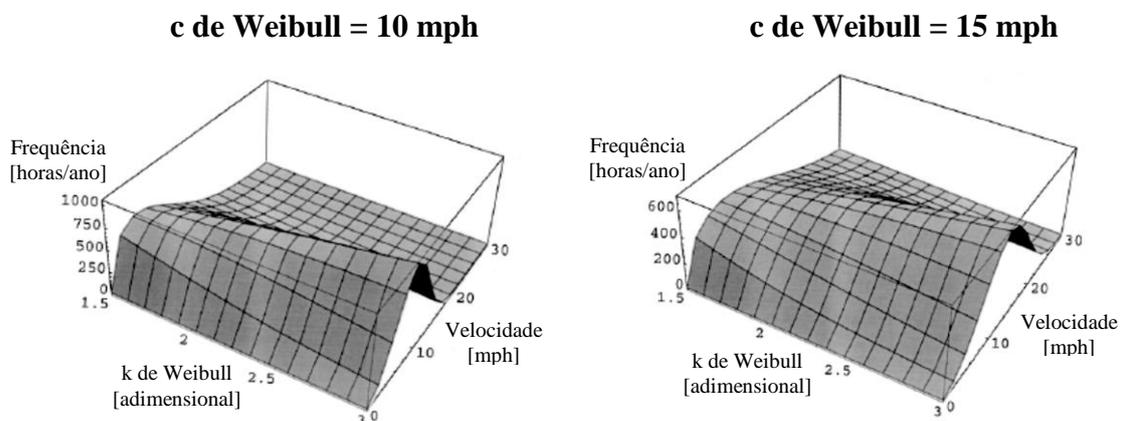


Figura 2.12 - Plotagem tridimensional da distribuição de Weibull para "c" igual a 10 mph e 15 mph, e "k" variando de 1,5 a 3 (PATEL, 1999).

Na prática, a parcela da potência do vento que poderá ser realmente extraída será sempre inferior a 59,3%, dado que esse é o máximo rendimento aerodinâmico possível de ser alcançado, conforme prova o teorema de Betz presente no ANEXO B (DELEITO, 1984).

Além do rendimento aerodinâmico (η_a), atuam também no processo de captação do recurso eólico os rendimentos mecânico (η_m) e elétrico (η_e). O produto desses rendimentos determina o coeficiente de potência do aerogerador (C_p) e relaciona o quanto da potência do vento conseguirá ser captada pelo aerogerador (PATEL, 1999).

Para a análise do potencial eólico disponível em uma dada região, utiliza-se comumente o cálculo da potência do vento por metro quadrado da área interceptada (W/m^2). A potência eólica pode ser expressa de forma simplificada pelas seguintes equações (PATEL, 1999):

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.2)$$

$$P_{útil} = P_{vento} \cdot \eta_a \cdot \eta_m \cdot \eta_e \quad (2.3)$$

$$P_{útil} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (2.4)$$

Onde:

P_{vento} = potência do vento incidente (W)	$P_{útil}$ = potência efetivamente entregue pela turbina (W)
ρ = densidade do ar (kg/m^3)	η_a = rendimento aerodinâmico do aerogerador
A = Área do Rotor (m^2)	η_e = rendimento elétrico
V = velocidade do vento (m/s)	η_m = rendimento mecânico
	C_p = coeficiente de potência do aerogerador

Cada turbina tipo de eólica possui uma curva característica de rendimento aerodinâmico relativo do comportamento específico das hélices em função da velocidade do vento incidente. A relação entre a velocidade de deslocamento da ponta da hélice (*tip speed* – velocidade de ponta), pela velocidade do vento incidente na turbina, é chamada de velocidade típica (TSR – *tip speed ratio* – relação de velocidade de ponta) (PATEL, 1999). A Figura 2.13 apresenta as curvas de rendimento, ou de coeficiente de potência, de diferentes tipos de rotores em função de suas velocidades típicas de operação. Observa-se que para cada formato de rotor existem valores específicos de TSR para se operar nos pontos de rendimento máximos. No ANEXO B, são apresentados 24 diferentes tipos de rotores eólicos, sendo 12 de eixo horizontal e 12 de eixo vertical.

Atualmente as pesquisas de *design* de rotores tem avançado no sentido de promover otimizações aerodinâmicas nas hélices, com o objetivo de alcançarem os rendimentos

aerodinâmicos mais próximos aos máximos teóricos de cada tipo de rotor e de permitir o aproveitamento de ventos nas mais extremas condições de velocidades e de distribuição (JAMIESON, 2011). No entanto, essas otimizações não são consideradas como novos tipos de rotores e sim variações em relação aos modelos clássicos, já conhecidos e divulgados a mais de 20 anos por autores como Deleito (1984).

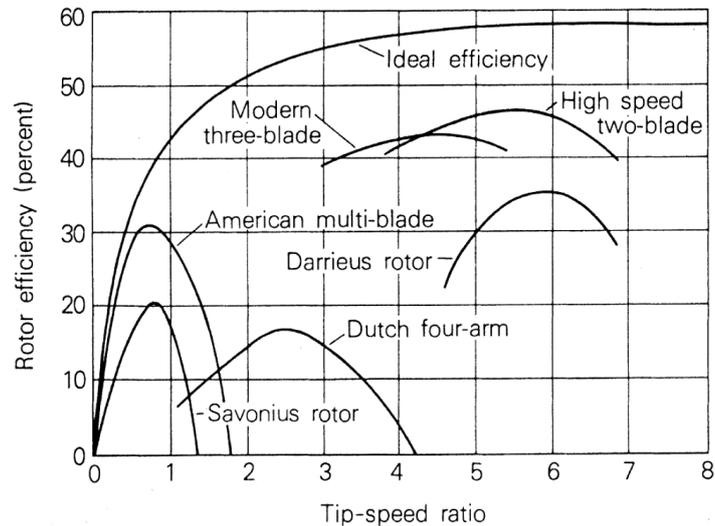


Figura 2.13 - Comparação das curvas teóricas de rendimento aerodinâmico de diferentes tecnologias de turbinas eólicas em função das velocidades típicas dos rotores (PATEL, 1999).

O conhecimento do C_p da turbina eólica permite, por meio da aplicação da Equação (2.4), a obtenção da curva característica de potência do aerogerador, que indica a potência elétrica gerada em função da velocidade do vento incidente. A Figura 2.14 ilustra as curvas do coeficiente de potência e de potência elétrica gerada em função do vento incidente de uma turbina ENERCON E-33, de 33 kW e mecanismo de controle aerodinâmico ativo. No ANEXO B, os mecanismos de controle aerodinâmicos, ativos e passivos, são detalhados.

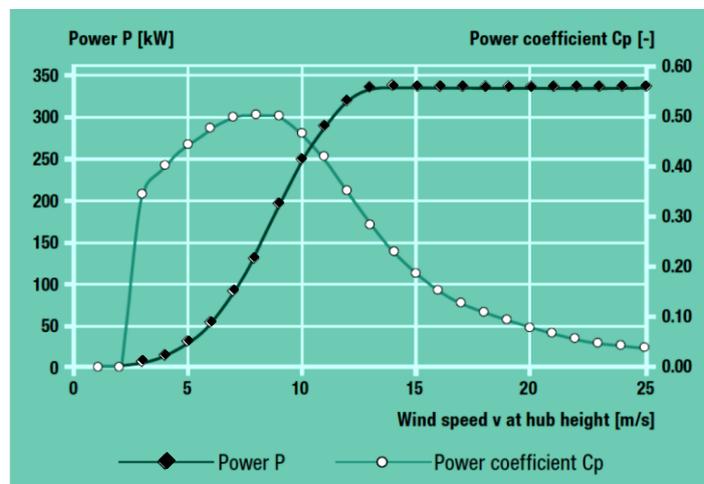


Figura 2.14 - Curvas do coeficiente de potência e da potência de saída de um aerogerador ENERCON E-33 (330 kW), para densidade do ar igual a $1,225 \text{ Kg/m}^3$ (ENERCON, 2012)

Tendo-se os parâmetros “c” e “k” de Weibull na altura do rotor do aerogerador, a densidade do ar e a curva de potência da turbina eólica, é possível estimar a quantidade de energia que será entregue pelo aerogerador, em um determinado período de tempo. Caso os dados de ventos tenham sido coletados em uma altura diferente da altura do rotor do aerogerador selecionado, os registros de velocidades podem ser estimados com base no conhecimento da rugosidade característica da superfície e na aplicação da Equação (2.5) (PATEL, 1999).

$$V_{rotor} = V_a \cdot \frac{\ln (H_{rotor}/R_{terreno})}{\ln (H_a/R_{terreno})} \quad (2.5)$$

em que:

V_{rotor} = velocidade do vento na altura do rotor (ou na altura desejada) [m/s]

V_a = velocidade do vento na altura conhecida (ou na altura do anemômetro) [m/s]

H_{rotor} = altura do rotor do aerogerador (ou altura desejada) [m]

H_a = altura do vento conhecido (ou altura do anemômetro) [m]

$R_{terreno}$ = rugosidade do terreno (consultar Tabela 2.2) [m]

Tabela 2.2 - Comprimentos das rugosidades típicas de diversos terrenos (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).

Descrição do terreno	$R_{terreno}$
Muito suave, gelo ou lama	0.00001 m
Mar calmo/aberto	0.0002 m
Mar revolto	0.0005 m
Superfície com neve	0.003 m
Gramado	0.008 m
Pasto áspero	0.010 m
Campo de pouso	0.03 m
Culturas	0.05 m
Poucas árvores	0.10 m
Muitas árvores, poucas construções	0.25 m
Florestas e bosques	0.5 m
Subúrbios	1.5 m
Centro da cidade, construções altas	3.0 m

Além da análise das curvas características de potência, na escolha dos aerogeradores deve ser avaliada também a capacidade de suportar as condições específicas de ventos da região. Para isso, a norma IEC61400-1 define quatro classes de turbinas eólicas de acordo com suas características de velocidades de operação e de sobrevivência. A Figura 2.15 apresenta as classes de turbinas eólicas segundo a IEC61400-1 em função das velocidades de

referência dos ventos (U_{ref}). A velocidade de referência do vento de uma turbina eólica indica que a mesma foi desenhada para resistir a um perfil eólico em que as médias das velocidades extremas dos ventos a cada 10 minutos, sejam menores ou inferiores ao valor U_{ref} , considerando um período de recorrência de 50 anos (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001).

Parameters	Class I	Class II	Class III	Class IV
Reference wind speed, U_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	30
Annual average wind speed, U_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	6
50 year return gust speed, $1.4 U_{ref}$ (m/s)	70	59.5	52.5	42
1 year return gust speed, $1.05 U_{ref}$ (m/s)	52.5	44.6	39.4	31.5

Figura 2.15 - Parâmetros de velocidade dos ventos em função da classificação das turbinas eólicas segundo a IEC61400-1(BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001).

Para os casos de perfis eólicos que não se enquadrem nas quatro classificações apresentadas pela Figura 2.15, é previsto uma quinta classe onde os parâmetros básicos são definidos pelo fabricante (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001).

2.5. Uso de Resíduos Sólidos para Geração de Energia

Esta seção apresenta uma fundamentação teórica nos conceitos básicos relacionados ao processamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) pelas tecnologias de incineração com recuperação de calor e de Digestão Anaeróbia (DA).

2.5.1. Cogeração em Incineradores

De acordo com Menezes *et al.* (2000),

[...] Seguindo e ampliando a conceituação apresentada por Lima, 1991, podemos dizer que: ‘Incineração é um processo de redução do peso, volume e das características de periculosidade dos resíduos, com a consequente eliminação da matéria orgânica e características de patogenicidade, através da combustão controlada’. Hoje devemos expandir ainda mais esta conceituação, afirmando que a incineração é também um processo de reciclagem da energia liberada na queima dos materiais, visando a produção de energia elétrica e de vapor, que pode ser imediatamente convertido em frio (cogeração).

Nos processos de incineração, a redução de volume é geralmente superior a 90% e em peso superior a 75%. No entanto, para que tais taxas sejam alcançadas a combustão no incinerador tem que ser continuamente controlada, uma vez que o combustível, resíduo a ser queimado, varia ao longo do tempo em sua composição, em umidade, em peso específico e em poder calorífico. Por isso, os sistemas modernos de incineração de lixo são dotados de sistemas computadorizados de controle contínuo das variáveis de combustão, tanto na câmara

primária quanto na de pós-combustão, bem como nas demais etapas de depuração de gases e geração de energia (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000).

Segundo Menezes *et al.* (2000), pode-se afirmar que em números aproximados, 1 tonelada de Resíduo Sólido Urbano (RSU) equivale a 200 kg de carvão ou 30 toneladas de água quente ou ainda 500 kWh de energia elétrica. Essa energia quando recuperada de um sistema de tratamento de RSU pode ser utilizada para:

- Gerar água quente para o próprio processo e distribuição a sistemas de calefação;
- Gerar vapor para uso em processos;
- Gerar energia elétrica para uso na planta e distribuição local;
- Gerar frio convertido a partir do vapor, para condicionamento de ar

Atualmente a tecnologia disponível para projeto de incineradores pode prever a geração de até 0,95 kWh/t processada, sendo que a grande maioria dos sistemas instalados gera de 0,4 a 0,95 kWh/t de capacidade. Todavia, esta geração dependerá fortemente do poder calorífico do RSU processado (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000).

A Figura 2.16 apresenta um fluxograma típico de uma planta de incineração de RSU acoplado a um sistema de recuperação de calor (cogeração). Nela são ilustradas as possibilidades de aproveitamento de calor tanto para geração de energia elétrica quanto para produção de água quente para processos industriais e de condicionamento de ar.

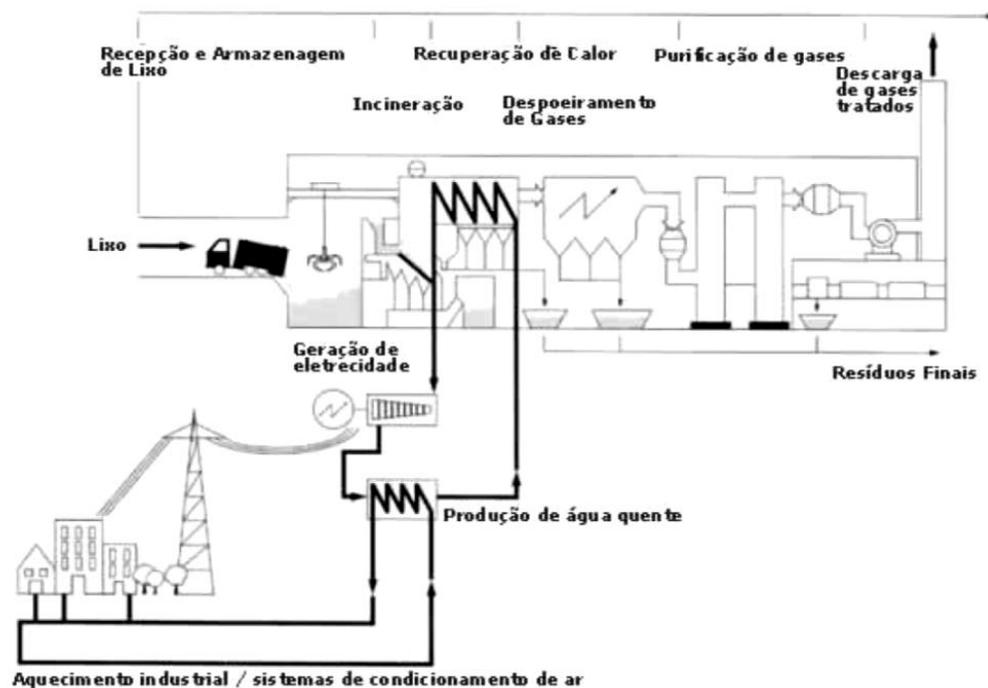


Figura 2.16 - Fluxograma típico de uma planta de incineração com cogeração (MENEZES, GERLACH e MENEZES, 2000).

2.5.2. Digestão Anaeróbia

Segundo Reichert (2005, p. 1, 2) a Digestão Anaeróbia (DA) pode ser entendida como “[...] um processo de conversão de matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio livre, [...] primeiro ocorre a conversão de orgânicos complexos em materiais como ácidos voláteis; e depois a conversão destes ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, o metano e o gás carbônico [...]”.

De maneira geral, um processo de DA pode ser subdividida em quatro etapas: pré-tratamento do resíduo, digestão, recuperação do biogás e o tratamento dos resíduos. O pré-processamento envolve a separação ou triagem dos materiais não biodegradáveis seguido por uma trituração. Dentro do digestor, a massa de resíduos é diluída de forma a obter-se o conteúdo de sólidos desejado e permanece no reator por um determinado tempo de retenção. Para a diluição da massa, pode ser utilizado água da torneira, lodo de esgoto, esgoto doméstico, ou a recirculação do líquido efluente do próprio reator. Um trocador de calor é usualmente utilizado para manter a temperatura desejada. O biogás produzido pela DA é purificado e armazenado em gasômetros. Caso o efluente do biodigestor esteja com umidade muito elevada, é necessário a secagem do mesmo, nesse caso o efluente líquido é utilizado para recirculação ou enviado para tratamento (REICHERT, 2005).

De acordo com Reichert (2005, p. 1, 2), “[...] Os principais parâmetros de controle do processo da DA são: a composição dos resíduos, em especial os sólidos voláteis; a taxa de alimentação; pH; temperatura (sistemas mesofílicos⁵ e termofílicos⁶); relação C/N; tempo de residência da massa no reator; a mistura no interior do reator”.

Dentre as diversas tecnologias para digestão anaeróbia abordadas por Reichert (2005, p. 6, 14) apresenta-se aqui a tecnologia DRANCO (Dry Anaerobic Composting – Compostagem Anaeróbica Seca), Figura 2.17, a qual consiste em

[...] um sistema de DA com estágio único e alto teor de sólidos (seco). Pode tratar os mais diferentes tipos de resíduos. Opera numa temperatura de 50 a 58°C com tempo de retenção de 20 dias. A alimentação é feita continuamente pelo topo do reator e o material digerido é retirado pelo fundo, também continuamente. Também tem sistema de retirada do excesso de água e compostagem final por um período de duas semanas.

No diagrama de blocos apresentado na Figura 2.17, além das etapas da digestão anaeróbia na tecnologia DRANCO são também apresentados os blocos referentes à geração de eletricidade e calor a partir do biogás.

⁵ A faixa mesofílica está entre 20°C – 40°C e a temperatura ótima está entre 30°C – 35°C. Os sistemas mesofílicos são muito sensíveis à variação da temperatura ambiente, podendo parar a geração de biogás no período de inverno em climas mais frios (REICHERT, 2005).

⁶ A temperatura termofílica fica entre 50° – 60°C (REICHERT, 2005).

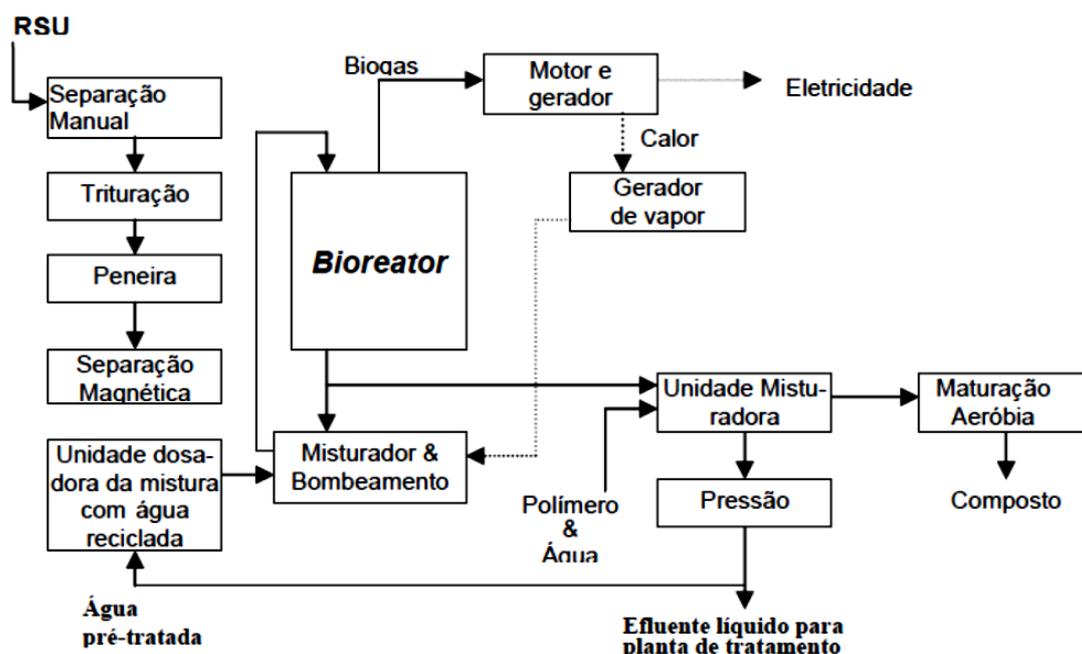


Figura 2.17 - Diagrama do processo de digestão anaeróbia da tecnologia DRANCO (REICHERT, 2005).

De acordo com a pesquisa realizada por Reichert (2005, p. 15), “[...] O tempo médio de retenção da biomassa no interior do reator para todas as tecnologias avaliadas é da ordem de 3 semanas; e a produção média de biogás é de 120 Nm³/t de resíduo alimentado (com variação de 80 a 200 Nm³/t)”. A unidade Nm³, ou normal metro cúbico, refere-se ao volume ocupado pelo gás sobre condições de 1 atm, 0 °C e 0% de umidade relativa.

Apesar dos sistemas de DA para produção de eletricidade e calor apenas sejam atrativos para aplicações de grande porte, é possível aplicar a DA em pequenas comunidades de forma sustentável. Hessami *et al.* (1996) descrevem um digestor anaeróbio projetado para uma comunidade de 500 pessoas, com um volume de 9,0 m³ e capacidade para 260 kg/dia (resíduo orgânico com densidade de 900 kg/m³). A produção de biogás esperada é de 8,0 m³/dia com um poder calorífico de 20 MJ/m³ e geração de energia de 160 MJ/dia (ou 45 kWh/d).

2.6. Smart Grid e a Qualidade de Energia

O uso de múltiplas fontes energéticas em uma mesma planta de geração de energia pode ser entendido como uma matriz energética híbrida. Esta configuração é desejável, pois permite, entre outras vantagens, que no caso de escassez de uma das fontes, outras poderão suprir às necessidades dos consumidores. No entanto, a adoção de matrizes energéticas híbridas impõe novos desafios para o funcionamento estável e seguro da rede, uma vez que

variações na oferta energética de cada fonte, aliadas a variações na demanda energética, podem ocasionar problemas de qualidade de energia e de instabilidade da rede.

A qualidade de energia é fundamental para o bom desempenho elétrico de uma instalação e seus equipamentos sendo um item que deve ser averiguado e monitorado obedecendo a normas específicas. Distúrbios nos níveis, forma de onda e frequência de tensões e correntes que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema elétrico pode ser caracterizado como um problema de qualidade de energia. A baixa qualidade de energia afeta os motores aumentando as perdas, diminuindo o torque e o rendimento, aumenta as perdas nos condutores elétricos, além de reduzir a vida útil das lâmpadas e equipamentos. A partir desta definição, a análise contínua da qualidade de energia é necessária uma vez que esta energia é fornecida à uma rede dinâmica e de consumidores com aparelhagens sensíveis à qualidade da energia que os alimenta (MARTINS e HADDAD, 2001).

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pela regulamentação dos indicadores de qualidade de energia que as empresas transmissoras ou distribuidoras de energia elétrica devem obedecer. Além disso, os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) complementam os índices aplicados à rede de distribuição (ANEEL, 2012).

Para que se garanta máxima eficiência, confiabilidade e segurança da matriz energética híbrida, uma vez escolhidas as formas de geração e conhecidas as cargas que serão atendidas, é necessária a implementação de um sistema de supervisão e controle incorporado à rede de energia, capaz de gerenciar e otimizar os fluxos de potência entre os diversos pontos produtores e consumidores. Essa rede inteligente é conhecida como *Smart Grid* e pode, além de gerenciar os fluxos de potência da rede elétrica, promover o consumo racional de energia (DOE, 2012). A *Smart Grid* pode identificar as demandas e as ofertas energéticas instantâneas de uma determinada planta elétrica e gerenciar de forma inteligente, de acordo com a prioridade, urgência de uso de equipamentos e possibilidade de agendamento de funcionamento para horários em que a rede elétrica esteja em condição de elevada oferta e ou energia de menor custo (DOE, 2012).

O funcionamento da *Smart Grid* torna-se possível a partir da implementação de uma infraestrutura de comunicação entre os diversos pontos geradores e consumidores de energia, e os centros de controle de transmissão e distribuição. A Figura 2.18 apresenta, lado a lado, os diagramas da infraestrutura elétrica do presente e do futuro, a *Smart Grid*.

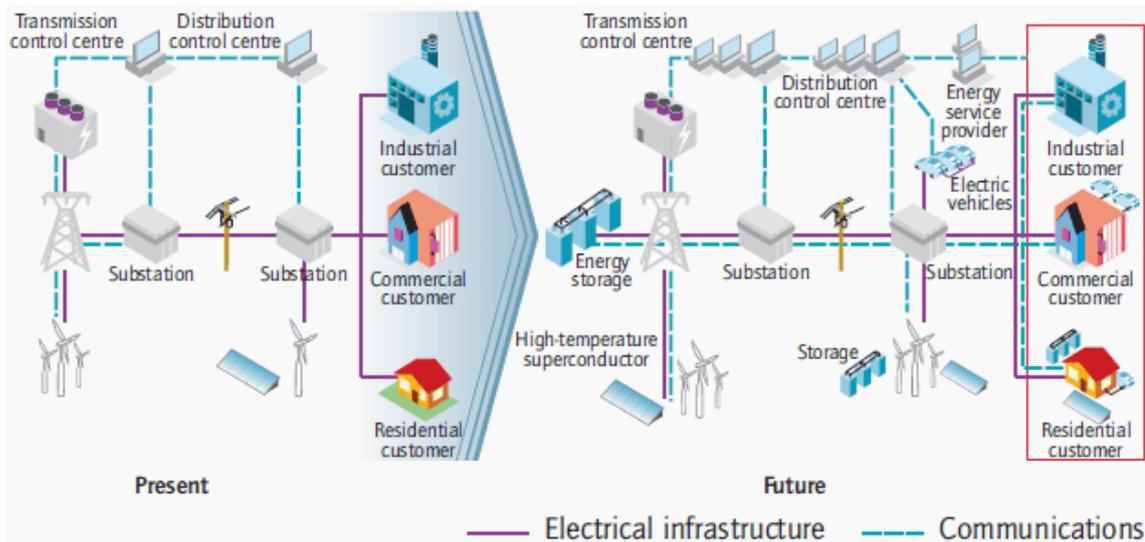


Figura 2.18 - Comparação entre as redes elétricas do presente e a do futuro, a *Smart Grid* (EEP, 2012).

2.7. Efeitos do clima sobre equipamentos e processos

A temperatura, a pressão atmosférica e a umidade relativa do ar podem influenciar no funcionamento de alguns equipamentos, afetando tanto o rendimento quanto a vida útil, sendo em alguns casos necessária a aplicação de tecnologias específicas para que seja garantido o funcionamento dentro dos padrões de eficiência e durabilidade desejados. Dessa forma, são expostas algumas características relacionadas aos efeitos que o clima pode provocar em motores a combustão interna, painéis fotovoltaicos, aerogeradores, redes de água e esgoto e sistemas de iluminação.

Motores a combustão interna:

As condições de desempenho de motores são referidas a altitudes (elevação acima do nível do mar) em torno de 500 metros e uma temperatura de 25 °C. Para cada 300 m acima desta condição de referência, o motor pode apresentar uma queda de potência de 2 a 3%. Já para a variação da temperatura, a cada 5 °C de aumento acima da referência leva a uma perda de potência de 1 a 2%. De forma semelhante, a redução da temperatura e o aumento da pressão atmosférica têm influência positiva no ganho de potência (ADDAD e LORA, 2006), (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Painéis fotovoltaicos:

Os painéis fotovoltaicos, conforme já descrito, também sofrem depreciação de sua eficiência com a elevação da temperatura de operação. Já em climas frios, aprecia-se um aumento na eficiência. Estudos mostram que, para módulos de silício cristalino, a variação da

Máxima Potência (P_{mp}) do painel em função da temperatura varia na faixa de -0,37 a -0,52%/°C (ALTENER-GREENPRO, 2004).

Aerogeradores:

Conforme apresentado na Equação (2.2), a potência do vento está diretamente relacionada com a densidade do ar, que por sua vez é afetada pelas condições de temperatura, pressão e umidade do ar. Dessa forma, para uma mesma velocidade do vento é possível que sejam observadas diferentes intensidades de potência do vento. Menores temperaturas e maiores pressões elevam a densidade do ar e conseqüentemente a energia cinética do vento. Porém, em condições de baixas temperaturas pode ocorrer a formação de gelo nas hélices, provocando desbalanceamento do rotor, diminuição do rendimento aerodinâmico e depreciação da vida útil dos componentes mecânicos. Em alguns casos, fabricantes de aerogeradores identificaram a necessidade de vedações especiais na nacelle⁷ e de uso de graxas e ligas metálicas específicas (PATEL, 1999; POLARPOWER.ORG, 2011).

Redes de água e esgoto:

Em climas frios, ocorre o risco de congelamento das redes de água e esgoto. Dessa forma, faz-se necessário o uso de sistemas de isolamento e de aquecimento das tubulações. Uma das alternativas é o uso de cabos aquecedores autorreguláveis que, através de um núcleo de polímero condutivo sensível à temperatura, ajustam adequadamente o aquecimento ao longo de todo o comprimento. Os cabos aquecedores (*Heating cables*) são, no Brasil, também chamados de cabos térmicos ou cintas térmicas. Esses cabos térmicos são sobrepostos e fixadas sobre as tubulações e em geral recobertas por um material isolante. Os cabos térmicos transformam a energia elétrica em térmica por efeito Joule e possuem característica resistiva predominante. A Figura 2.19 apresenta a estrutura interna de uma cinta térmica autorregulável sobre diferentes condições de temperatura, detalhando o princípio de funcionamento e as partes constituintes (RAYCHEM, 2011). Na parte superior da Figura 2.19, apresenta-se a cinta sobre três diferentes condições de operação: cano quente (*warm pipe*), cano fresco (*cool pipe*) e cano gelado (*cold pipe*). Quanto mais frio estiver o cano, mais calor será produzido pelo cabo térmico. Já a parte inferior da Figura 2.19, é apresentado da esquerda para a direita respectivamente as seguintes partes constituintes do cabo: circuito paralelo de eletricidade, núcleo condutor autorregulável, isolamento elétrico, trança de cobre estanhado, revestimento a prova d'água.

⁷ Nacelle é o compartimento que aloja os componentes de uma turbina eólica, incluindo o gerador elétrico, caixa de transmissão, conjunto de freio, etc. Ela fica instalada no topo da turbina, logo após o rotor.

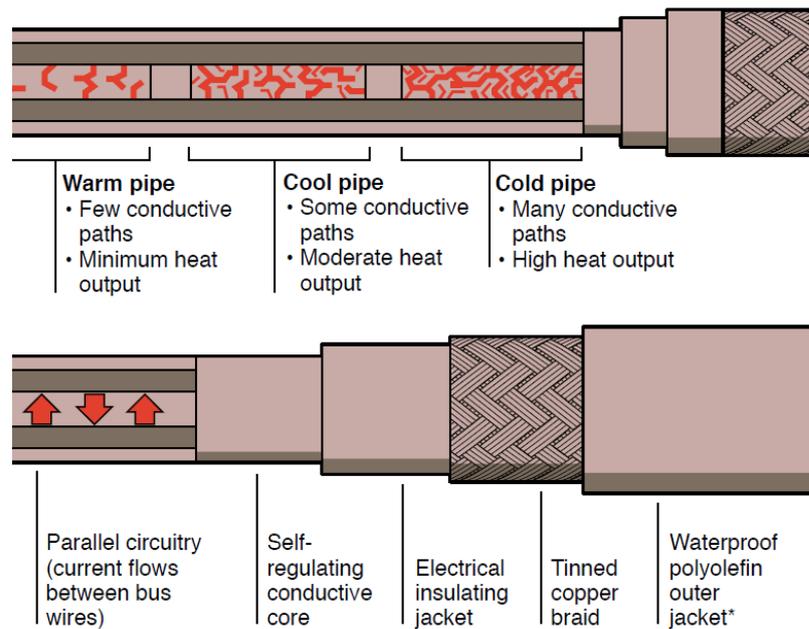


Figura 2.19 - Detalhes construtivos e de funcionamento de um cabo térmico autorregulável (RAYCHEM, 2011).

Outra técnica também utilizada para aquecimento de redes hidrossanitárias é instalação de dutos trocadores de calor em contato com as tubulações que se deseja aquecer. Nessa técnica, é em geral utilizado o calor proveniente de um sistema de cogeração para a manutenção da temperatura do fluido recirculante.

Sistemas de iluminação

Os sistemas de iluminação também são afetados pelas condições do ambiente. As lâmpadas fluorescentes tubulares tradicionais, por exemplo, podem apresentar reduções consideráveis na eficiência quando operadas em ambientes com temperaturas abaixo de 20 °C ou acima de 60 °C. Nessas condições, as lâmpadas operam fora da faixa de temperatura de projeto, que se situa em torno de 25 °C, o que modifica os vapores internos ao tubo e afeta a eficiência da lâmpada (OSRAM, 2011).

Para esses casos, é indicado o uso de lâmpadas especiais em luminárias reflexivas fechadas que garantam a operação dentro da faixa de temperatura de projeto da lâmpada. A Figura 2.20 apresenta as curvas de eficiência em função da temperatura para duas lâmpadas fluorescentes tubulares, sendo uma das lâmpadas tradicional, modelo Osram T5 tradicional, e outra especialmente desenvolvida para operar em ambientes de elevada amplitude térmica, modelo Osram HO CONSTANT. Essas lâmpadas especiais operam com eficiências acima de 90%, em uma faixa de temperaturas de 5 °C à 70 °C (OSRAM, 2011).

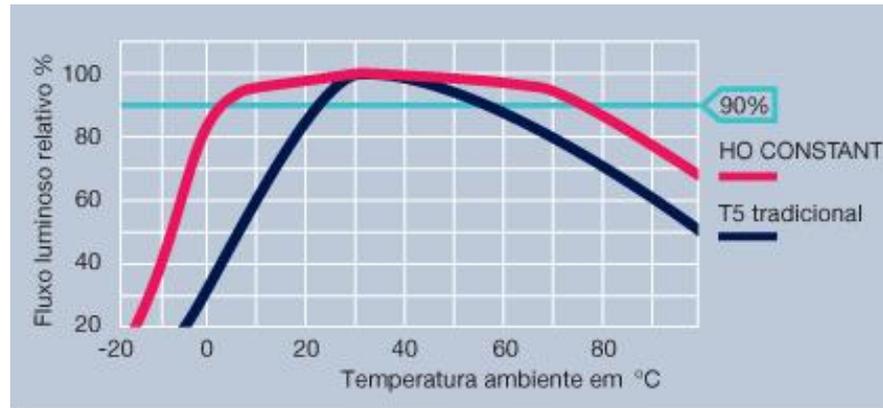


Figura 2.20- Comportamento do fluxo luminoso em função da temperatura do ambiente em lâmpadas fluorescentes tubulares tradicionais e especiais para ambientes de elevada amplitude térmica (OSRAM, 2011).

Em climas frios uma tecnologia que apresenta-se particularmente interessante é a iluminação por LEDs. Os LEDs apresentam a elevação de sua eficiência quando operados em baixas temperaturas. A taxa de variação do fluxo luminoso em função da temperatura aproxima-se de $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$. A Figura 2.21 apresenta a curva de fluxo luminoso em função da temperatura da junção, para uma corrente de teste fixa (PHILIPSLUMILEDS, 2009).

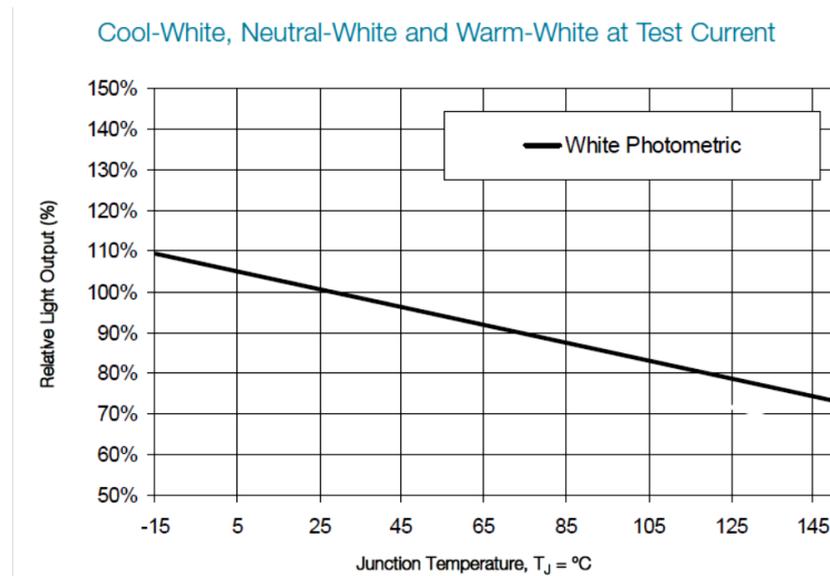


Figura 2.21 - Comportamento do fluxo luminoso do LED branco em função da temperatura da junção, para uma corrente de teste fixa (PHILIPSLUMILEDS, 2009).

2.8. Conclusão

Este capítulo apresentou os conceitos fundamentais relacionados a problemática do uso de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica e relacionou os principais instrumentos de prevenção contra degradação ambiental no Brasil e na Antártica, seja pelo AIA brasileiro ou orientado pelo Protocolo de Madri.

Quanto ao uso de motogeradores, foi visto que a recuperação do calor gerado pelos MACI pode duplicar a eficiência global do processo, reduzir o consumo de combustível e consequentemente as emissões. O uso de biocombustíveis também pode colaborar para a redução das emissões de CO₂ de ciclo aberto. Do ponto de vista de logística e armazenamento do combustível, o biodiesel apresenta-se mais atrativo do que o etanol, dado o maior poder calorífico

O uso de fontes renováveis de energia, pela aplicação de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos, também foi revisado. Atualmente já existem células fotovoltaicas com eficiências superiores a 40%, porém, é necessário o uso de módulos MPPT e adequado posicionamento para o aproveitamento máximo do painel. Para a aplicação de aerogeradores, a complexidade é maior, sendo necessário a cuidadosa avaliação do recurso local.

Quanto ao uso de resíduos sólidos para geração de energia, destaca-se o processo de DA, sendo em média necessário um tempo de retenção de 3 semanas e alcançado em média uma produção de 120 Nm³/t de resíduo.

A inserção de todas essas soluções em uma mesma matriz é chamada de matriz energética híbrida, ou diversificada. Porém, para realizar a gestão segura e eficiente de todas essas fontes é necessária uma *Smart Grid*.

A influência do clima sobre equipamentos e processos também devem ser considerados na Antártica. Projetos específicos de aerogeradores, sistemas de aquecimento da rede hidrossanitária e de iluminação, são necessários. Em estudos eólicos, deverá considerar as variações de temperatura e pressão locais. Quanto à iluminação, a mesma deve ser preferencialmente do tipo LED.

A seguir será apresentada uma revisão das matrizes energéticas em destaque na Antártica, no que diz respeito a desempenho, versatilidade e complexidade.

Capítulo 3: Matrizes energéticas em Estações Antárticas

Na Antártica, diversos países têm desenvolvido projetos a fim de estudar a viabilidade e exequibilidade da inserção de fontes renováveis de energia em suas matrizes energéticas. Neste capítulo, são citadas as principais características dos sistemas de geração de energia utilizados nas estações da Bélgica, Austrália, Estados Unidos e Nova Zelândia. Essas estações apresentam alguns dos casos de matrizes energéticas de maior sucesso e complexidade atualmente implantadas em continente antártico.

3.1. Estação Antártica da Bélgica – Princess Elizabeth

A Estação Antártica Princess Elizabeth foi inaugurada oficialmente em fevereiro de 2009 como a primeira Estação de emissão zero. Situa-se nas coordenadas 71° 57' S - 23° 20' E, a 190 quilômetros da costa, e utiliza um sistema híbrido de geração elétrica constituído por um sistema eólico com 9 turbinas eólicas, 379,5 m² de painéis fotovoltaicos, 22 m² de coletores solares e dois geradores de emergência alimentados a *diesel*. Um banco de baterias é utilizado para armazenamento da energia gerada. Caso o nível de energia das baterias atinja valor inferior a 40%, os geradores a *diesel* entram em operação para a recarga (PEA, 2009). A Figura 3.1 mostra uma foto da Estação belga e destaca dados de consumo energético durante o ano. A Tabela 3.1 apresenta a capacidade de geração de energia elétrica das diversas tecnologias utilizadas para produção de energia na Estação Princess Elisabeth.

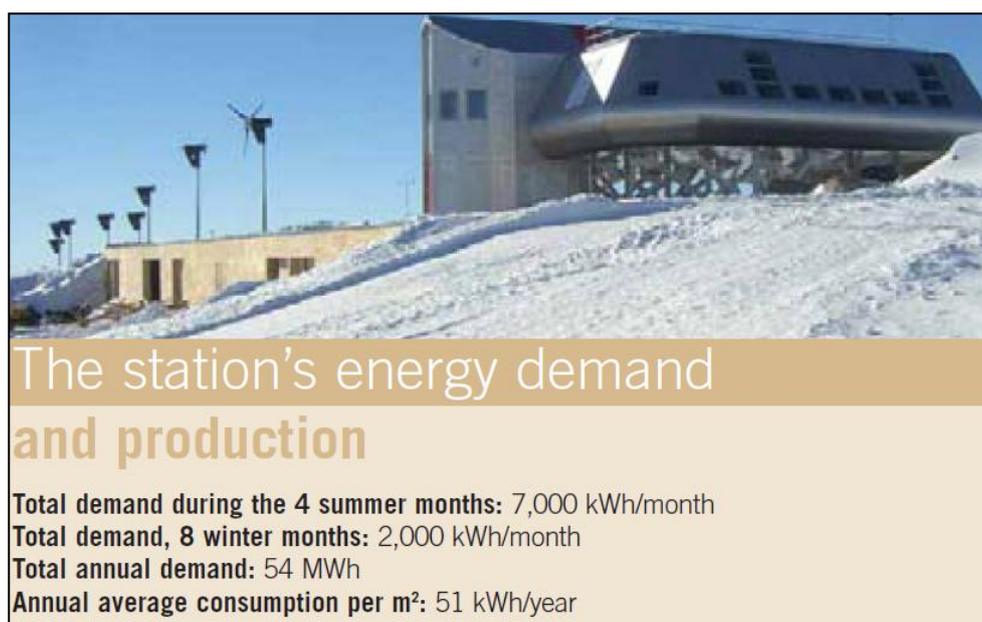


Figura 3.1 - Foto da Estação da Bélgica e dados do consumo de energia durante o ano (PEA, 2009).

Tabela 3.1 - Tecnologias de geração de energia elétrica e suas respectivas potências, na Estação da Bélgica (PEA, 2009). A unidade kWp expressa a maior potência que o sistema produzirá sobre condições ótimas de operação.

TECNOLOGIA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	POTÊNCIA
Eólica	9 x 6 kWp = 54 kWp
Solar	50.6 kWp
Motogeradores	2 x 44 kW = 88 kW

A Estação Princess Elisabeth utiliza um sistema de gerenciamento de energia projetado em parceria com as empresas *LABORELEC*, *GDF SUEZ* e *Schneider Electric* tendo como gerente de projeto *Sven Kerremans*. Este sistema se diferencia pelo seu novo algoritmo mais eficiente que possibilita uma taxa de 1:10 entre produção e cargas elétricas. Para isso, foi desenvolvida uma *Smart Grid* capaz de gerenciar 35.000 variáveis controlando a geração e demanda, usando um sistema hierarquizado de atendimento à carga (PEA, 2009). Nesse projeto um novo conceito de atendimento à demanda foi considerado: o conceito que a demanda de energia está sujeita às condições de geração e não que a geração deve atender indiscriminadamente à demanda. Dessa maneira, os seguintes níveis de prioridade são analisados pelo sistema:

1. Segurança humana, produção de água e ventilação;
2. Sistemas gerais da Estação como o controle de temperatura e umidade;
3. Armazenamento e manutenção dos registros científicos;
4. Cozinha, banheiros e semelhantes;
5. Equipamentos não essenciais como *laptops* e *DVD players*.

A Figura 3.2 apresenta de forma gráfica os níveis de prioridade analisados pelo sistema de gerenciamento energético da Estação Belga.

Para a captação da energia dos ventos, são utilizados aerogeradores do tipo rotor de vela, marca *ProvenEnergy*, com hélices fabricadas de material termoplástico flexível. Seu geradores elétricos são síncronos a ímãs permanentes e sua manutenção só é necessária uma vez por ano. As turbinas estão instaladas em postes de 9 metros de altura e são capazes de suportar ventos de até 250 Km/h.

Para resistir aos ventos fortes, inicialmente o rotor limita a velocidade de giro das lâminas para minimizar o risco de dano e em seguida as lâminas se dobras umas contra as outras proporcionalmente à força do vento, reduzindo assim a quantidade de energia que capturam. Nos rotores de vela, a regulação é feita pela curvatura da vela e não pelo ângulo da pá (DELEITO, 1984). A Figura 3.3 foi retirada de uma animação instrutiva sobre o sistema e exemplifica a curvatura alcançada pelas pás em uma situação de fortes ventos.

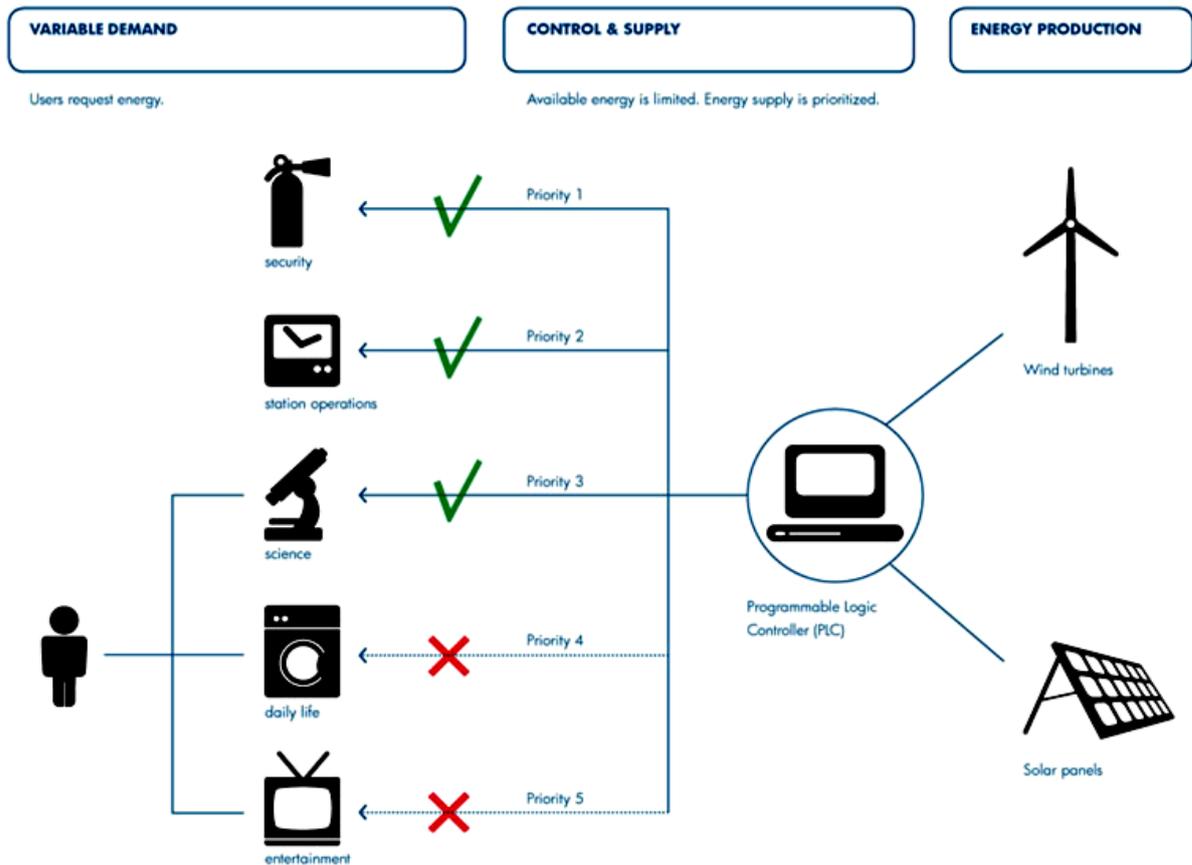


Figura 3.2 - Níveis de prioridades analisados pelo sistema de gerenciamento energético da Estação Princess Elisabeth (SCIENCEPOLES, 2010).



Figura 3.3 - Detalhe do sistema de proteção dos aerogeradores. Curvatura das pás em função da intensidade dos ventos (PEA, 2009).

A Figura 3.4 mostra uma foto dos aerogeradores, podendo ser observado seu sistema de molas para controle de curvatura da pá.

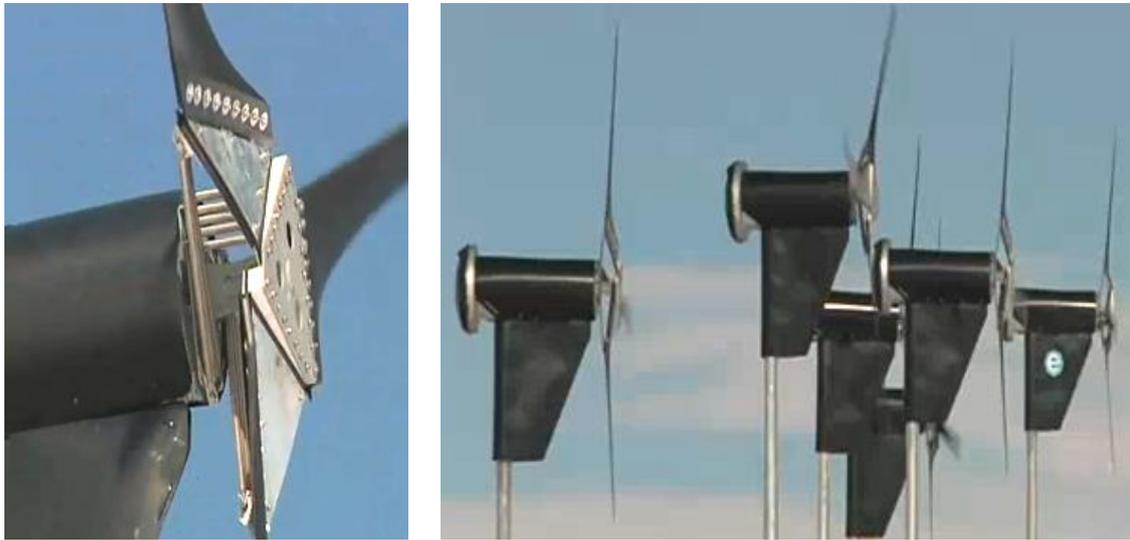


Figura 3.4 - Fotos dos aerogeradores utilizados na Estação Princess Elisabeth e seus sistemas de molas (PEA, 2009).

Para produção de energia elétrica a partir do sol, a Estação Princess Elisabeth faz uso de 408 painéis solares fotovoltaicos, sendo 109,5 m² (120 painéis) instalados nas paredes da Estação em várias direções e 270 m² (288 painéis) instalados nas garagens apontados em direção ao norte. Cada painel tem uma eficiência de 16% e são compostos por 36 células solares de silício. Para o armazenamento da energia elétrica, foram instaladas cerca de 15 toneladas de baterias totalizando uma capacidade de 6000 Ah. A Figura 3.5 apresenta uma foto frontal da Estação belga, contemplando a vista dos painéis fotovoltaicos (POLAR FOUNDATION, 2009).



Figura 3.5 - Fotos dos painéis solares da Estação Princess Elisabeth (POLAR FOUNDATION, 2009).

O aquecimento da Estação é realizado tanto de forma passiva quanto ativa, respectivamente, pelo uso de janelas criteriosamente dimensionadas e posicionadas e pelo uso de coletores solares a vácuo. Um inovador sistema de reaproveitamento do calor do ar interno da Estação também foi implementado. Nesse sistema, o ar externo a ser admitido (ar fresco), é pré-aquecido com o calor do ar que será expelido (ar interno poluído), através de um trocador de calor. Esse trocador de calor recupera de 75% a 95% da energia térmica da massa de ar a ser expelido, reduzindo assim a parcela de energia gasta para manutenção térmica da Estação. Para a operação dos tanques de derretimento de neve e de aquecimento de água reciclada, foram instalados 25 m² de coletores solares à vácuo direcionados para o norte (SCIENCEPOLES, 2010).

No gráfico da Figura 3.6, é apresentada a participação de cada um dos diversos sistemas de produção de energia elétrica e o consumo total em cada mês do ano na Estação Princess Elisabeth. Pode-se observar que a participação do sistema de geração eólica é superior ao consumo total em todos os meses e que a necessidade de utilização dos *diesel*-geradores se reduziu a apenas 4 meses do ano.

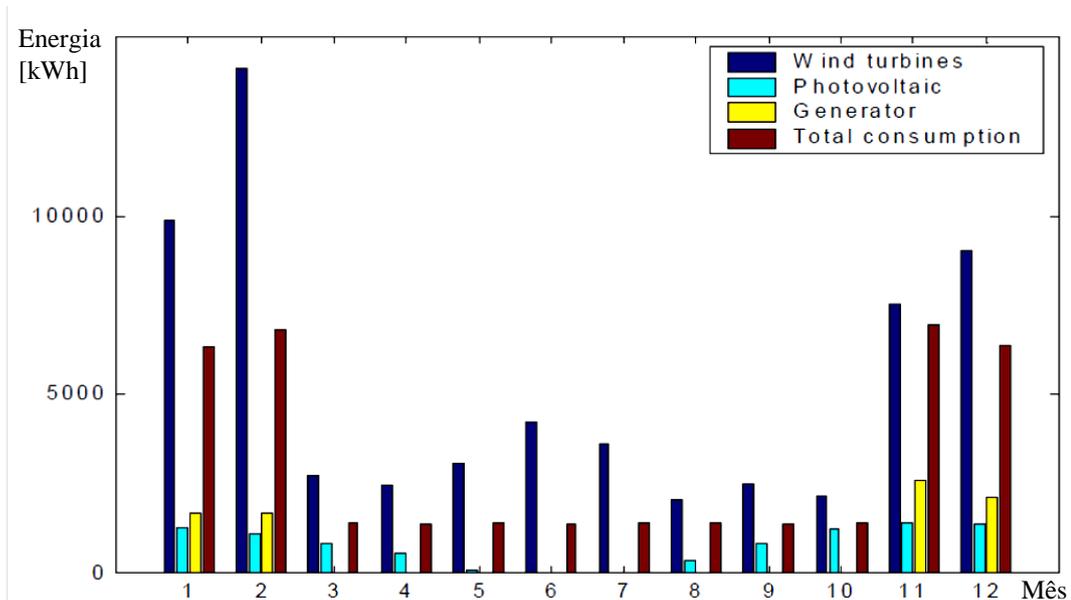


Figura 3.6 - Gráfico em kWh da participação de cada sistema de geração e do consumo total na Estação Princess Elisabeth durante 12 meses (POLAR FOUNDATION, 2009).

De forma diferente, a geração por células fotovoltaicas apresentou participação sempre menor que a dos *diesel*-geradores quando estes dois sistemas trabalharam em conjunto. Outra observação é que a geração solar operou apenas 9 meses. Segundo o estudo apresentado pela *Polar Foundation* (2009), a fração de energia vinda de fontes renováveis foi de 95% e o consumo de *diesel* inferior a 2500 litros, no período avaliado.

3.2. Estações Antártica Australianas

A Divisão Antártica Australiana (AAD – *Australian Antarctic Division*) mantém três estações de pesquisas na Antártica e uma em região subantártica. As três estações instaladas na Antártica são Mawson, Davis e Casey, e a subantártica é Macquarie Island. Estas estações estão localizadas conforme apresenta a Figura 3.7. Na sequência serão apresentadas as principais características levantadas sobre as matrizes energéticas dessas edificações.

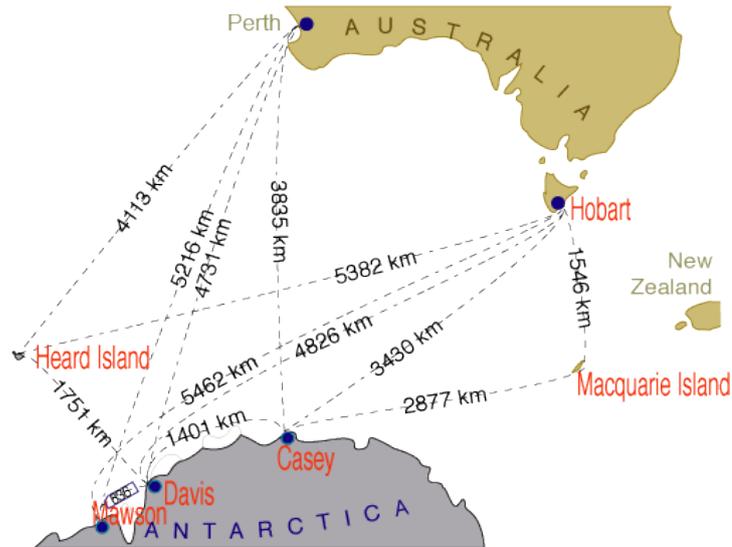


Figura 3.7 - Localização das estações antárticas mantidas pela Austrália (AAD, 2011).

3.2.1. Estação Mawson – Operada pela Austrália

A Estação Mawson situa-se nas coordenadas $67^{\circ} 36' 09.7''$ S - $62^{\circ} 52' 25.7''$ E e utiliza um sistema híbrido de geração por *diesel* e eólica. A Figura 3.8 mostra a foto da Estação australiana e suas duas turbinas eólicas, que são capazes de suprir até 95% do consumo de energia (AAD, 2009).



Figura 3.8 - Foto de uma das turbinas eólicas da Estação Mawson (POLARPOWER.ORG, 2011).

A penetração da energia eólica anual (percentual de energia da Estação fornecida pelo vento) durante os primeiros quatro anos de operação (2003 a 2007) foi de 34% em média e a economia mensal de combustível tem sido tão alta quanto 58%, em comparação com os meses correspondentes de 2002. A Tabela 3.2 apresenta os dados de desempenho da matriz energética, divulgados pela AAD (POLARPOWER.ORG, 2011).

Tabela 3.2 - Estatísticas de operação das turbinas eólicas de Mawson. Dados medidos entre março 2003 e março de 2007 em relação ao ano de 2002 (POLARPOWER.ORG, 2011).

INDICADORES AVALIADOS	VALORES OBTIDOS
Penetração eólica media na carga da Estação	34%
Máxima média de penetração eólica mensal	60.5% (Abril 2006)
Mínima média de penetração eólica mensal	15.2% (Junho 2004)
Média anual de combustível economizado (comparado a 2002)	29%
Máxima média mensal de combustível economizado (comparado ao mesmo mês em 2002)	58.1% (Abril 2006)
Mínima média mensal de combustível economizado (comparado ao mesmo mês em 2002)	8.1% (Janeiro 2006)
Máxima média mensal de velocidade do vento na altura do rotor	20 m/s
Mínima média mensal de velocidade do vento na altura do rotor	9.6 m/s
Disponibilidade das turbinas (excluindo paradas por baixas ou altas velocidades de vento)	93%
Toneladas de CO ₂ evitadas	1762

As turbinas eólicas da Estação Mawson foram modificadas a partir do modelo padrão E-30, da companhia Enercon (POLARPOWER.ORG, 2011). As principais modificações para atender as condições antárticas foram:

- Aço de baixa temperatura em todas as seções das torres e componentes estruturais;
- Revestimento do aço com um material isolante;
- Torre menor (34m em vez de 50m) devido aos fortes ventos;
- Isolamento extra e uso de aquecedores na nacelle;
- Modificação do programa de controle para tratar com ventos de 25m/s a 34m/s.

A utilização de aços de baixa temperatura para todas as seções da torre, componentes estruturais e componentes fundidos tem a função de reduzir as chances de fadiga do metal. O revestimento de material isolante visa aumentar a vida útil dos componentes metálicos.

O *software* de controle modificado para regular a potência gerada também é capaz de lidar com as grandes flutuações na velocidade do vento e apropriadamente controlar a potência mesmo em condições meteorológicas mais adversas. Este sistema de controle de alta

tecnologia também prevê uso de tecnologias de proteção contra interferências nas frequências de rádio e nos instrumentos científicos (ANTARCTICENERGYSOLUTIONS, 2011).

Para completar e assegurar a geração de energia elétrica e térmica, existem 4 motores turbo *diesel* Caterpillar 3306, cada um com capacidade de 125 kW, acoplados a alternadores da marca Stamford. Para aproveitamento do calor emitido pelos motores, os mesmos estão interligados a sistema de aquecimento de água. A Figura 3.9 mostra a foto dos 4 motogeradores da praça de máquinas da Estação Mawson.



Figura 3.9 - Foto da sala principal dos geradores a *diesel* da Estação Mawson (AAD, 2009).

A Figura 3.10 apresenta a foto da sala do gerador de emergência, um motor Caterpillar V12 turbo de 384 kW, também acoplado a um alternador da marca Stamford.



Figura 3.10 - Foto da sala do gerador de emergência da Estação Mawson (AAD, 2009).

Em 1999 a Estação Mawson foi contemplada com um sistema de controle e monitoramento de cargas que permitiu redução no consumo total de energia e facilitou as operações locais. O sistema é dotado de 120 controladores que controlam serviços em 63

construções ao longo das três estações Australianas, sendo possível o acesso ao sistema a partir de qualquer um dos computadores ligados à rede das estações.

Mawson conta ainda com tecnologias de monitoramento remoto de seus geradores, redes de aquecimento de água e de condicionamento de ar. O sistema pode ainda ser monitorado, controlado ou programado direto da sala AAD em Kingston, localizado na Tasmânia, território Australiano. Na Figura 3.11, é mostrada a tela do monitoramento remoto do sistema de geração elétrica da Estação Australiana. Na tela, é possível observar as velocidades das duas turbinas, as respectivas potências das turbinas e do gerador a *diesel*, velocidade do vento e os dados de produção de energia, economia de consumo de combustível e da redução das emissões de gás carbônico.

Um fato observado no período de pesquisa foi o comportamento dos sistemas para diferentes condições de ventos. A Figura 3.11 apresenta um momento no qual a velocidade do vento atingiu 131 km/h, nessa condição as turbinas permaneceram inativas. Na Figura 3.12 e Figura 3.13, pode ser observado o comportamento do sistema elétrico para diferentes condições de ventos. A Figura 3.12 mostra uma situação com ventos a 80 km/h, nesse caso apenas uma turbina operou, mantendo-se em aproximadamente 65% de sua capacidade. Já a Figura 3.13 mostra a situação de ventos a 50 km/h, nesse caso as duas turbinas operaram com aproximadamente 40% de suas capacidades.

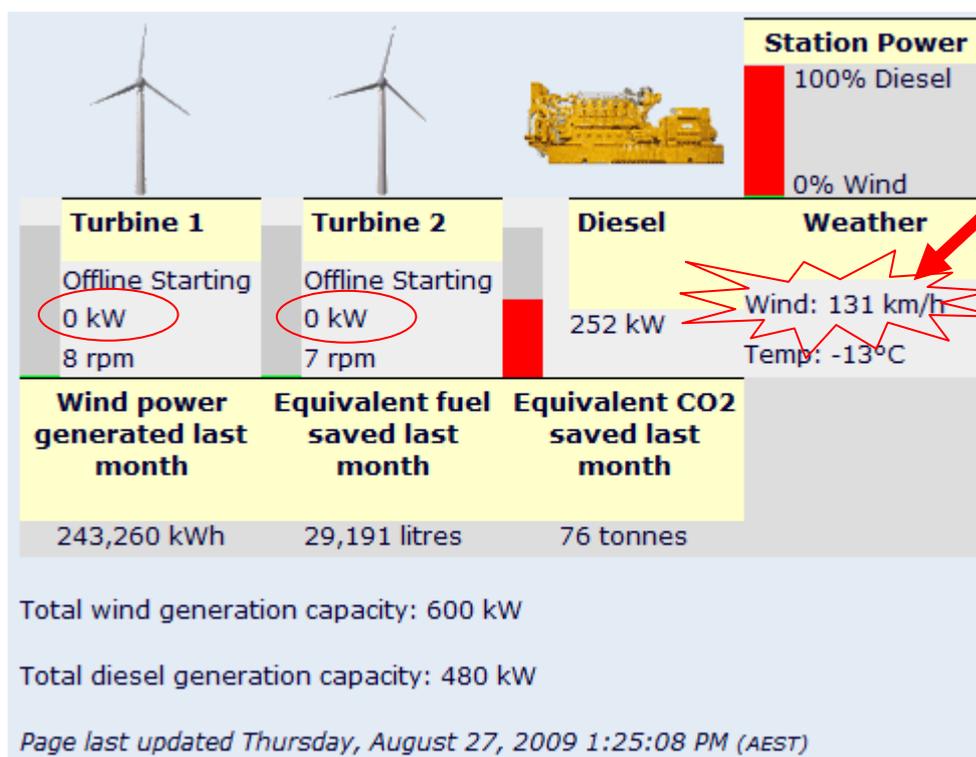


Figura 3.11 - Tela de monitoramento dos sistemas de geração elétrica da Estação Mawson numa situação de vento a 131Km/h (AAD, 2009).

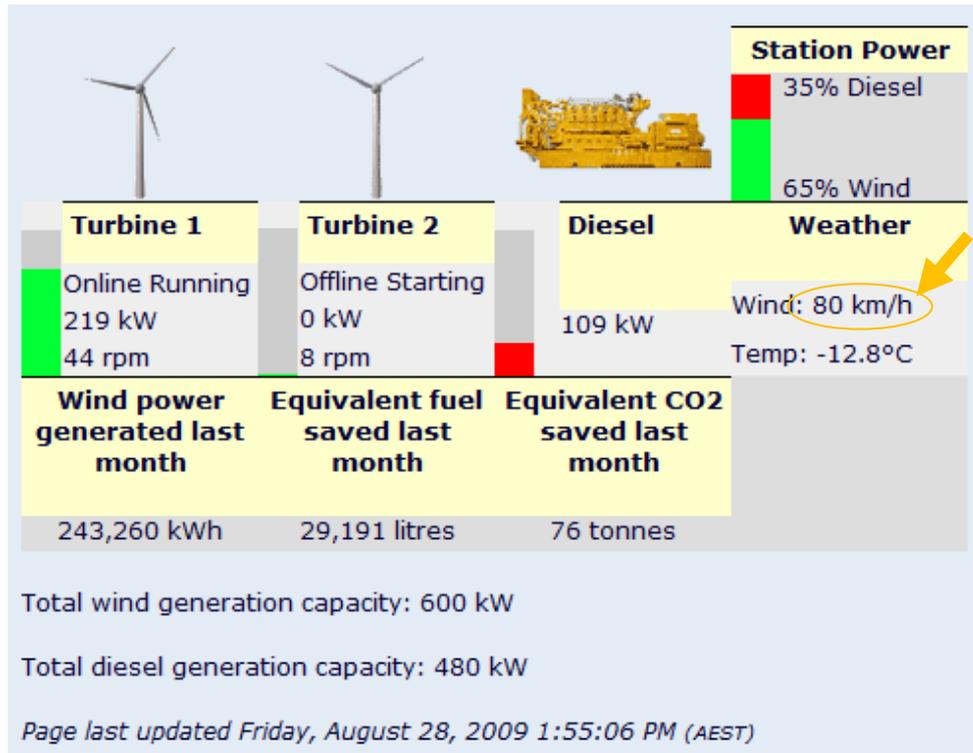


Figura 3.12 - Tela de monitoramento dos sistemas de geração elétrica da Estação Mawson numa situação de vento a 80Km/h (AAD, 2009).

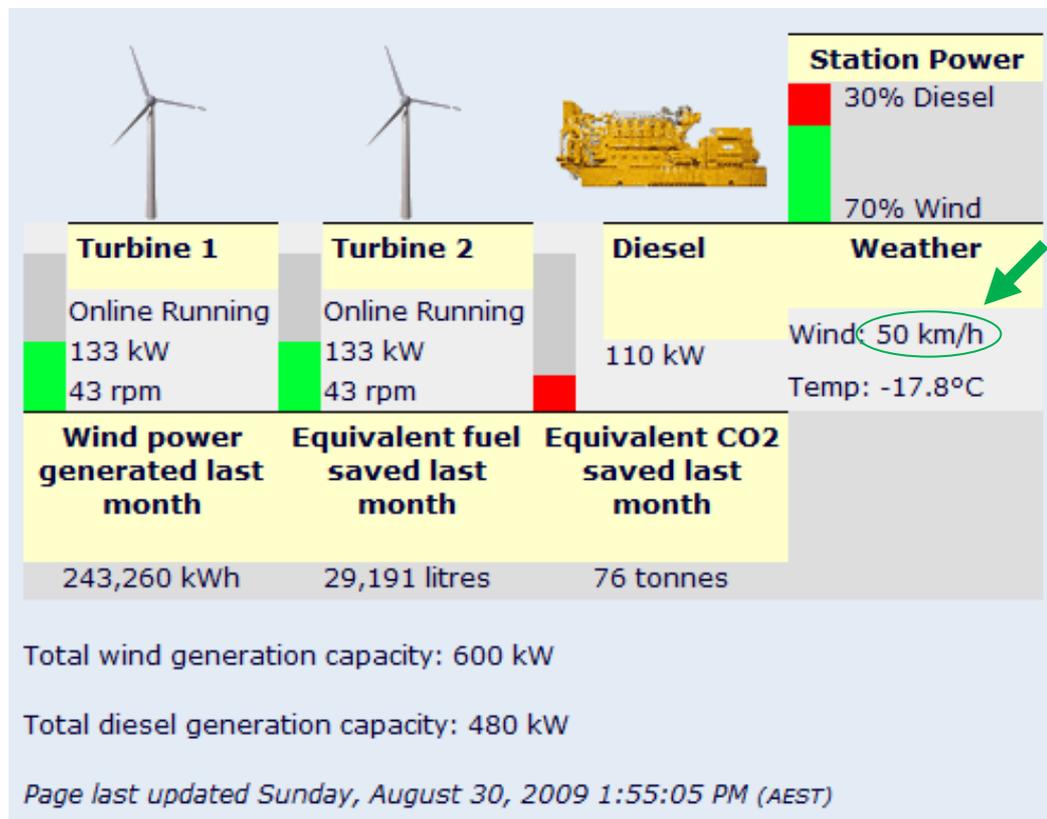


Figura 3.13 - Tela de monitoramento dos sistemas de geração elétrica da Estação Mawson numa situação de vento a 50Km/h (AAD, 2009).

Durante o projeto do sistema de potência da Estação Mawson, foi detectado a necessidade de utilização de um equipamento de armazenamento de energia que fosse capaz de amortecer o impacto de rajadas de ventos e de promover uma maior penetração da geração eólica no sistema elétrico. Para isto, a empresa PowerCorp implementou um sistema de Interface Caldeira Rede (BGI – *Boiler Grid Interface*), capaz de responder em milissegundos a variações entre geração e consumo elétrico. O BGI utiliza os excedentes gerados pela planta eólica, para aquecimento através de caldeiras elétricas.

A Figura 3.14 apresenta a tela para o sistema de aquecimento de água, podendo ser aquecida tanto pela caldeira elétrica quanto pela caldeira a *diesel*. Esse sistema é interligado aos motogeradores, sendo capaz de aproveitar o calor cogerado no processo de geração de energia elétrica.

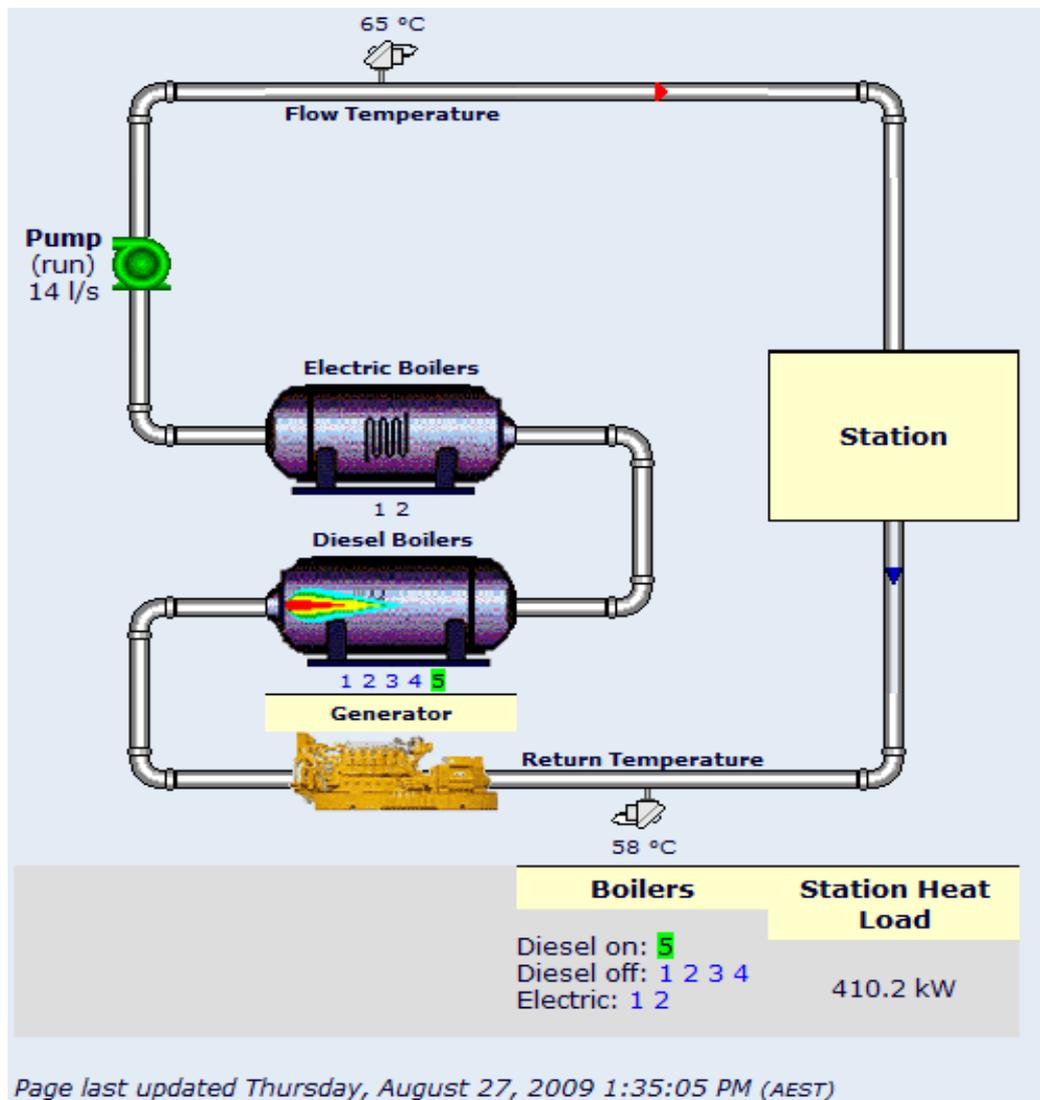


Figura 3.14 - Tela de monitoramento do sistema de aquecimento de água elétrico e *diesel* (AAD, 2009).

A Figura 3.15 apresenta a tela do supervisor do sistema de captação de água da Estação Mawson. Observa-se pela Figura 3.15 que a Estação Mawson utiliza um sistema de recirculação de água aquecida para o lago a fim de evitar o congelamento e que mantém uma reserva de água potável suficiente para aproximadamente 3 meses de operação.

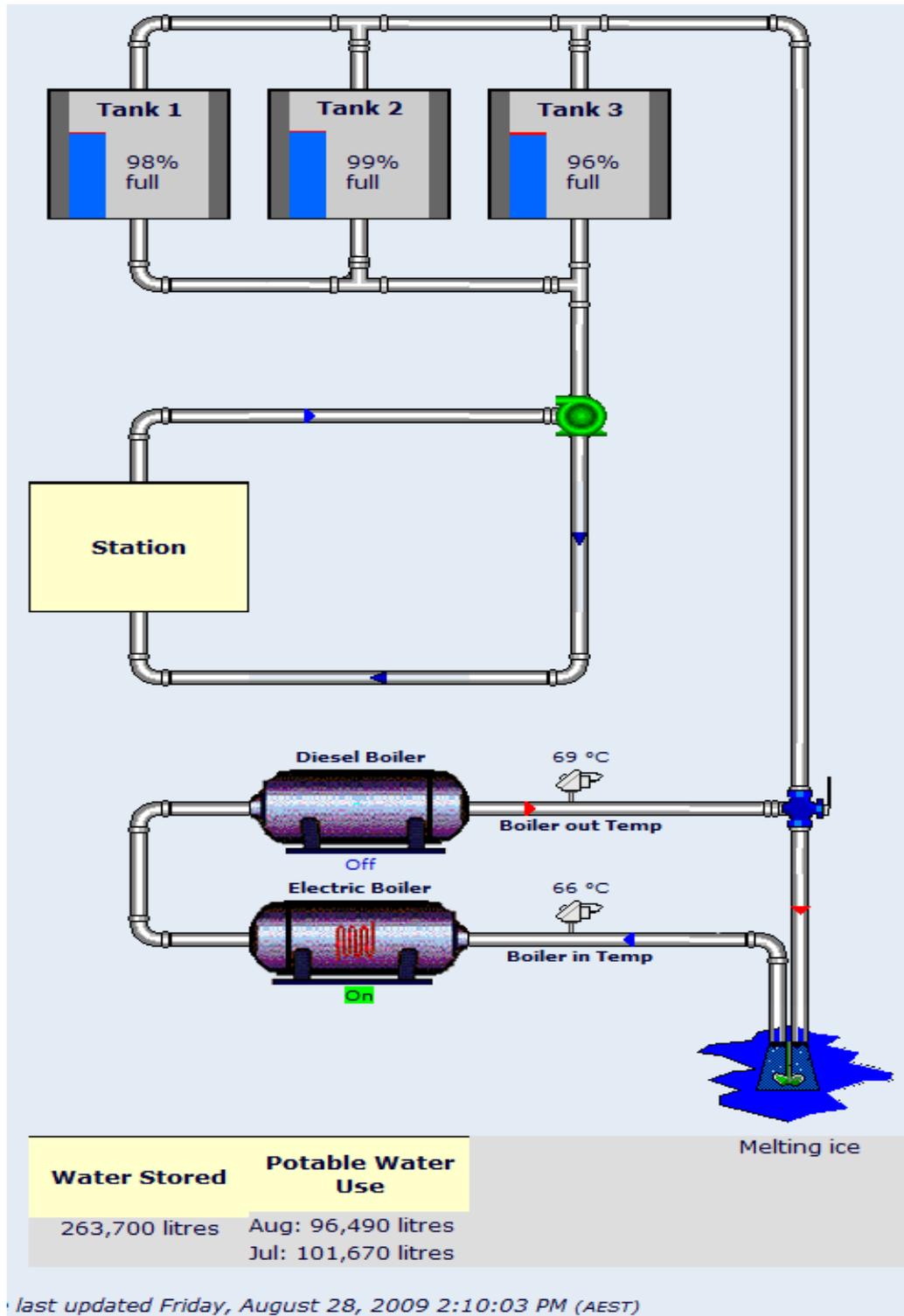


Figura 3.15 - Tela de monitoramento do sistema de obtenção e armazenamento de água da Estação Mawson (AAD, 2009).

Em 2004, foi iniciado um estudo da utilização de energia eólica para produção e armazenamento de hidrogênio, com intuito de utilizá-lo como combustível de veículos, em fogões ou para reversão posterior em energia elétrica. A energia elétrica alimenta um eletrolisador⁸, o hidrogênio produzido é comprimido e armazenado a uma pressão de 200 bar. Essa alternativa possibilita o abastecimento de estações remotas pelo transporte de reservatórios sobre esquis. A Figura 3.16 e a Figura 3.17 ilustram as situações descritas.

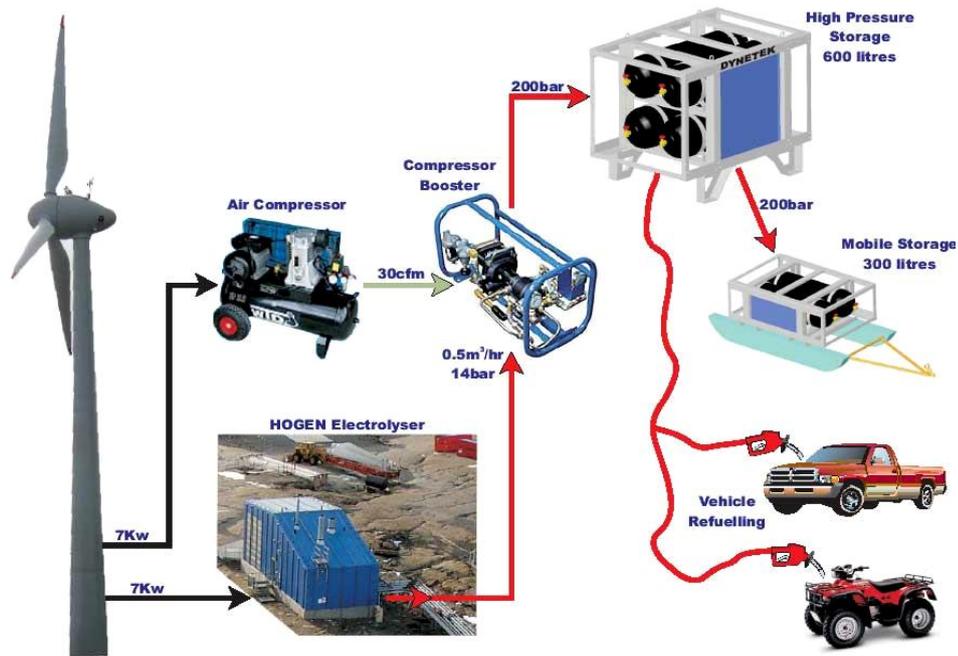


Figura 3.16 - Diagrama da produção, armazenamento e uso do hidrogênio em Mawson (AAD, 2009).

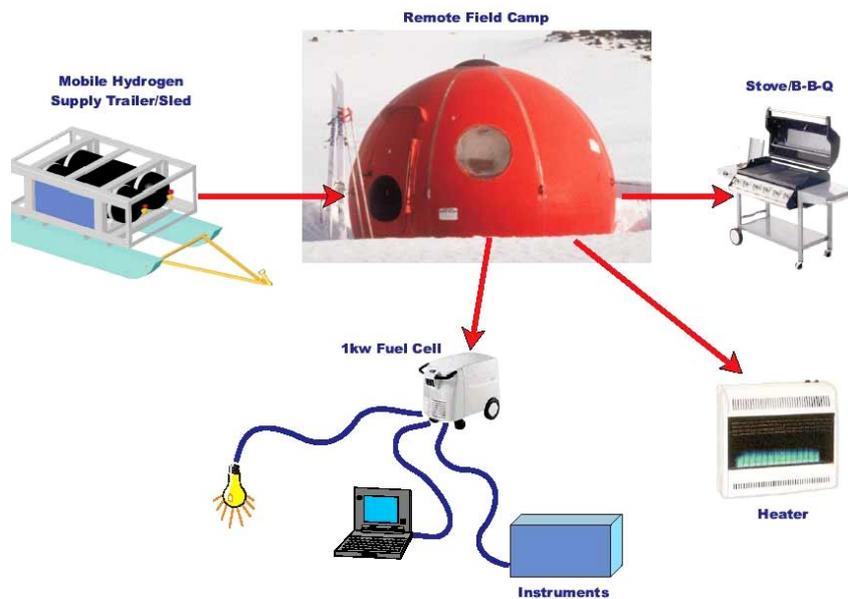


Figura 3.17 - Diagrama do uso de hidrogênio em campo na Estação Mawson (AAD, 2009).

⁸ Eletrolisador: equipamento utilizado para a separação da molécula da água (H_2O), em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O), por ação da circulação de uma corrente elétrica.

As fotos da Figura 3.18 apresentam a infraestrutura implementada em 2006. São mostrados o posto de abastecimento, cilindros móveis, células a combustível de 2 kW e a queima do hidrogênio para preparo de alimentos.



Figura 3.18 – Uso de hidrogênio na Estação Mawson. (a) Sistema de abastecimento local e móvel e turbina ao fundo; (b) sistema células de combustível de 2 kW; (c) sistema de abastecimento; (d) queima do hidrogênio para preparo de alimentos (AAD, 2009).

3.2.2. Davis, Casey e Macquarie Island – Operadas pela Austrália

Em Casey, Davis e Mawson, as Casas de Máquinas Principais (CMP) possuem a mesma configuração. São quatro motores marca Caterpillar, modelo 3306, turbo alimentados e com capacidade de 125 kW cada. A Estação Macquarie Island, por ser menor, é alimentada por apenas dois geradores Caterpillar. Todos os grupos geradores utilizam alternadores da marca Stamford e, dependendo das necessidades, os geradores podem operar de forma individual ou simultânea.

Nas Casas de Máquinas de Emergência (CME), os suprimentos de energia variam de estação para estação. Em Casey, a CME está equipada com 2 geradores Caterpillar 3412 turbo *diesel*, cada um de 385 kW de capacidade. Em Davis, na CME existem dois geradores Caterpillar 3306 turbo *diesel*, cada um de 125 kW de capacidade, como no CMP. Na Estação de Macquarie Island, por outro lado, existem dois Caterpillar D333C, *diesel* aspirados, cada um de 60 kW de potência. Ambos são necessários para operar a Estação.

Estação Australiana Davis:

A Estação Davis está localizada nas coordenadas $68^{\circ} 34' 35.8''$ S - $77^{\circ} 58' 02.6''$ E , abrigando em torno de 120 expedicionários durante o verão e 18 durante os meses de inverno. Em Davis o suprimento de água é limitado durante o verão, os banhos são restritos em 1 a cada 3 dias e por um tempo máximo de 3 minutos. A Figura 3.19 apresenta a vista aérea da Estação Davis.



Figura 3.19 - Vista aérea da Estação australiana Davis (AAD, 2011).

Em 1999 foi iniciado um estudo da exequibilidade da utilização de coletores solares para aquecimento de água. A Figura 3.20 apresenta duas fotos do sistema de coletores instalados, uma das fotos retrata um dia com neve e a outra foto, um dia sem neve. Em Davis, o calor do sol é atualmente utilizado para fornecer 100% da água quente para os lavatórios pessoais e de roupas durante o verão.



Figura 3.20 - Projeto piloto de utilização de coletores solares para aquecimento de água, na Estação Davis em 1998/1999 (POLARPOWER.ORG, 2011).

Estação Australiana Casey – Operada pela Austrália

A Estação Australiana Casey situa-se nas coordenadas 66° 16' 54.5" S - 110° 31' 39.4" E. Sua ocupação varia de 150 a 160 expedicionários, incluindo a equipe de terra do aeródromo, durante o verão. No inverno, a população da Estação situa-se entre 16 a 20 expedicionários. A Figura 3.21 apresenta a foto aérea da Estação Casey.

Em 1993, um projeto de pesquisa conjunta entre França e Austrália foi criado para investigar as opções de energia alternativa para estações da Antártica. Em 1994, iniciou-se a coleta dos dados de vento e, em 1995, uma turbina eólica de 10 kW foi instalada em Casey para investigar os aspectos operacionais do uso de turbinas eólicas na Antártida. Em 1996, o projeto de pesquisa concluiu que há recurso eólico disponível em todas as estações, em maior ou menor potencial de aproveitamento. Esse projeto integrou os estudos que, em 2003, culminaram na instalação dos dois aerogeradores Enercon E-30 em Mawson. A Figura 3.22 apresenta um esquema do sistema de monitoramento Eólico e Solar da Estação Casey, explicitando os componentes utilizados, disposição e altura das torres.



Figura 3.21 - Vista aérea da Estação Casey (AAD, 2009).

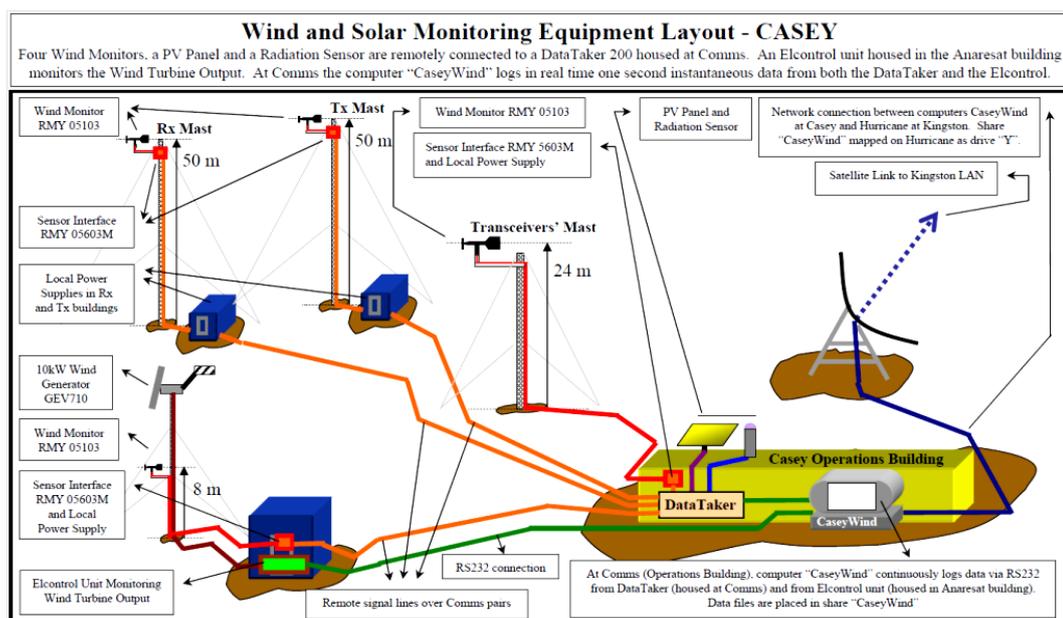


Figura 3.22 - Desenho esquemático do sistema de monitoramento eólico e solar na Estação Casey (POLARPOWER.ORG, 2011).

Estação Macquarie Island – Operada pela Austrália

Em Macquarie Island, Figura 3.23, um sistema de abastecimento de energia modular promete gerar energia para os refúgios, de uma maneira mais segura e amigável ao ambiente. Esses sistemas são chamados de RAPS (*Remote Area Power Supplies*), ou sistemas de suprimento de potência para áreas remotas.



Figura 3.23 - Vista aérea da Estação Macquarie Island (AAD, 2009).

Os RAPS são pequenos módulos com capacidade de geração solar e eólica para facilitar e minimizar o uso de combustíveis em áreas remotas. Eles podem incorporar baterias, motogeradores a gasolina, reservatórios de combustível, bombas de reabastecimento, painéis solares, aerogerador com mastro desmontável e instrumentação para monitoramento da condição da bateria com proteção contra descarga excessiva. Os RAPS podem ser transportados por helicópteros quando necessário e uma unidade idêntica é mantida na Estação para treinamento e como sobressalente. Na instalação, os módulos são nivelados usando pés ajustáveis e são ancorados, o mastro é levantado e cabos lançados até o ponto de consumo. A Figura 3.24 apresenta duas fotos de unidades RAPS, retratando aspectos construtivos e de instalação. A foto da Figura 3.24 (a) apresenta a vista do compartimento de combustível, painel fotovoltaico e turbina eólica. A foto da Figura 3.24 (b) apresenta a instalação de um RAPS próximo a um refúgio em Macquarie Island.



(a)



(b)

Figura 3.24 – Módulo de potência para áreas remotas (RAPS). (a) Vista do aerogerador, painel solar e reservatório de combustível do RAPS. (b) RAPS sendo instalado em um refúgio de Macquarie Island (AAD, 2009).

3.3. Estação McMurdo e Estação Scott – Operadas pelos Estados Unidos e Nova Zelândia

O Programa Antártico dos Estados Unidos (USAP - *United States Antartic Program*) e o Programa Antártico da Nova Zelândia (ANZ - *Antartica New Zealand*) desenvolvem colaborativamente um projeto para quantificar o potencial da energia eólica na Antártica e construir a fazenda eólica mais ao sul do planeta, em Crater Hill na ilha Ross, para atender tanto a McMurdo quanto a Estação Scott (THE ANTARCTIC SUN, 2008). O projeto inicial visava a instalação de três aerogeradores cada um com uma capacidade de 330 kW interligados eletricamente às estações McMurdo (operada pelo Estados Unidos) e Scott Base (operada pela Nova Zelândia), com o intuito de reduzir o consumo de *diesel* em cerca de 463.000 litros por ano, 11% do total, e uma redução anual de 1242 toneladas de CO₂ (OTAGO DAILY TIMES ONLINE, 2009; MERIDIAN ENERGY, 2011; NREL, 2010).

Os trabalhos de implementação começaram em novembro de 2008. No primeiro estágio, foram instaladas as fundações das turbinas. Pela falta de água e pelas temperaturas abaixo de zero, as fundações foram pré-fabricadas na Nova Zelândia e em seguida montadas no local, a fim de reduzir os riscos do projeto. A fundação de cada turbina foi composta por oito blocos pré-moldados de concreto, com 13 toneladas cada, dispostos em círculo e de modo que os topos dos blocos estivessem nivelados ao solo. Uma estrutura de aço foi então aparafusada sobre os blocos de concreto e a torre da turbina eólica foi então anexada. Uma vez que foram instaladas as fundações, os engenheiros instalaram a rede elétrica para ambas as estações. A Figura 3.25 apresenta o desenho estrutural das fundações e também uma foto dos blocos de concreto utilizados (MERIDIAN ENERGY, 2011).

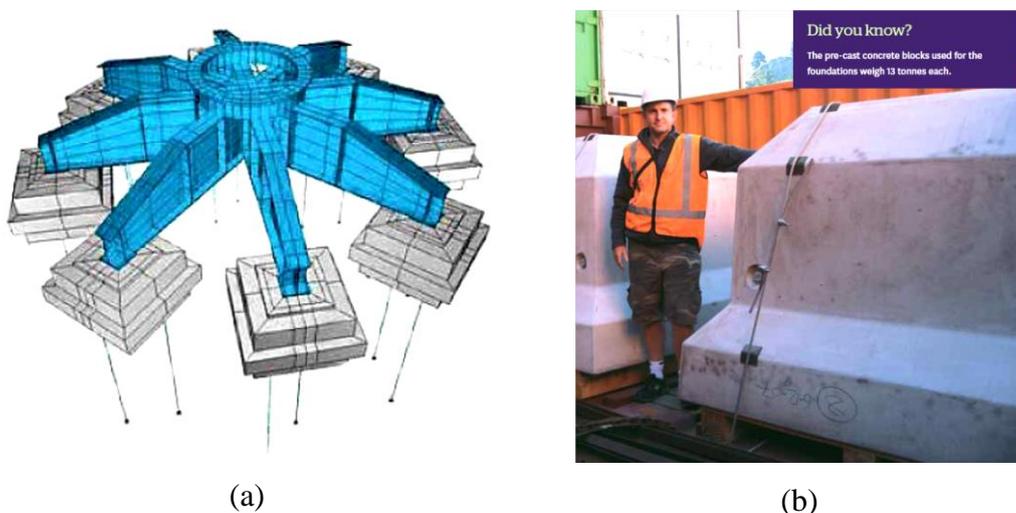


Figura 3.25 - Características das fundações das turbinas eólicas. (a) Desenho em três dimensões dos blocos de concreto e estrutura metálica. (b) Foto o bloco de concreto já pronto (MERIDIAN ENERGY, 2011).

Os aerogeradores utilizados nesse projeto foram desenvolvidos para a operação em baixas temperaturas e não utilizam caixa de engrenagens, estando o eixo do rotor diretamente acoplado ao gerador. Isso permite uma redução das perdas mecânicas e minimiza problemas associados com os óleos e graxas. O exclusivo projeto dessas turbinas permite que a manutenção seja necessária apenas uma vez por ano, a qual é prevista para acontecer durante o período menos frio do verão (MERIDIAN ENERGY, 2011). A Figura 3.26 apresenta graficamente os detalhes construtivos e especificações dos aerogeradores Enercon E33, que utilizam geradores conectados diretamente ao rotor das hélices.

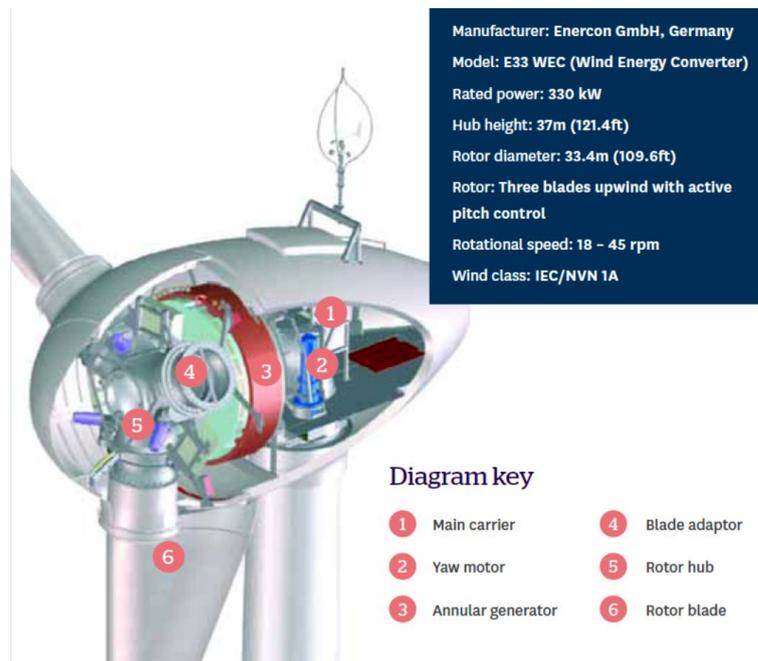


Figura 3.26 - Esquema construtivo e especificações gerais dos aerogeradores utilizados na fazenda eólica de McMurdo e Scott Base (MERIDIAN ENERGY, 2011).

A Figura 3.27 mostra a foto de um caminhão realizando o transporte das hélices, saindo do píer da Estação McMurdo em direção à fazenda eólica. Pela foto, pode-se avaliar o tamanho de cada uma das três turbinas.



Figura 3.27 – Hélices das turbinas de vento sendo transportadas por caminhão, do píer da Estação McMurdo para a fazenda eólica na ilha Ross (OTAGO DAILY TIMES ONLINE, 2009).

O segundo estágio do projeto foi instalar as turbinas e prepará-las para operação. A eletricidade gerada pela fazenda eólica alimenta diretamente McMurdo e cabos alimentadores com 4.160 Volts permitem à Estação Scott receber a eletricidade tanto das turbinas eólicas quanto dos geradores a *diesel* da Estação McMurdo. As redes elétricas das duas estações funcionam em frequências diferentes, sendo a Estação MacMurdo operada em 60Hz e a Estação Scott em 50Hz. Para compatibilização entre as frequências das redes elétricas de McMurdo e Scott, foi desenvolvido pela empresa PowerCorp um sistema com transformador de alta tensão, painel SCADA (Supervisão Controle e Aquisição de Dados) e módulo inversor 1.500 kVA de potência. A Figura 3.28 apresenta a foto dos painéis dos módulos inversores (POWERCORP, 2011). A fim de melhorar a qualidade da energia e manter a estabilidade do sistema elétrico, na planta existe ainda um volante de inércia PowerStore500, capaz de fornecer até 500 kW por 30 segundos, em caso de mudanças súbitas de vento. A Figura 3.29 apresenta a foto do volante de inércia descrito (POWERCORP, 2011).



Figura 3.28 – Módulo inversor com 1.500 kVA de potência (POWERCORP, 2011).



Figura 3.29 – Volante de inércia da Estação McMurdo. PowerStore 500 Flywheel System (POWERCORP, 2011).

A Figura 3.30 apresenta a foto das três turbinas eólicas Enercon E33 especiais já instaladas. A demanda das duas estações juntas é superior a 1,7 MW, o máximo percentual de penetração até a data foi de 70% e o fator de capacidade médio é de 35%, superior à média global, de 25% (COMNAP, 2011). O fator de capacidade relaciona a capacidade máxima de produção do equipamento com a produção efetivamente obtida.



Figura 3.30 - Fazenda eólica das estações MacMurdo e Scott Base. Turbinas Enercon E33 certificadas pela NREL (NREL, 2010).

3.4. Conclusão

Neste capítulo, foram apresentadas as soluções energéticas das edificações antárticas da Bélgica, Austrália, Estados Unidos e Nova Zelândia, ressaltando características técnicas de cada uma.

A Estação Princess Elisabeth apresenta uma matriz energética Diesel-Eólica-Solar modelo e destaca-se pelo conceito global de sustentabilidade utilizado no projeto. O projeto passou por etapas desde estudo de materiais e técnicas construtivas avançadas, posicionamento ótimo de janelas, painéis e coletores solares, e pela escolha de aerogeradores de simples construção e elevado desempenho, capazes de suportar ventos de 250 Km/h. Aliada a essas soluções foi ainda implementada uma complexa *Smart Grid*, capaz de gerenciar 35.000 variáveis. A Estação belga é a primeira classificada como Estação “emissão zero”, na Antártica.

As estações australianas diferenciam-se pelos projetos integrados de matrizes Diesel-Eólicas, pelo uso de aerogeradores modificados para suportar condições extremas, pelo uso de cogeração, pelos projetos de armazenamento de energia com hidrogênio líquido e também pelo desenvolvimento de módulos portáteis para provimento de energia em áreas remotas, RAPS. Para o amortecimento dos fluxos de potência da planta eólica, foi desenvolvido um sistema integrado a uma rede de resistências elétricas internas às caldeiras da Estação.

As Estações MacMurdo e Scott, operadas, respectivamente, pelos Estados Unidos e Nova Zelândia, desenvolvem de forma conjunta uma matriz energética Diesel-Eólica, com 1 MW de potência eólica instalada, tornando-se detentores da maior planta eólica da Antártica. Para o amortecimento dos fluxos de potência da planta eólica, foi instalado um volante de inércia capaz de fornecer até 500 kW durante um tempo de até 30 segundos.

A seguir será apresentada uma revisão da infraestrutura energética da Estação Antártica Brasileira.

Capítulo 4: Infraestrutura energética da EACF

Neste capítulo será abordada a infraestrutura de energia da EACF, com base em uma expedição científica à Estação, realizada no verão de 2010/2011, cerca de um ano antes do episódio do incêndio.

A EACF pode ser avaliada do ponto de vista energético ambiental pela análise de três elementos diretamente inter-relacionados: combustíveis, processos consumidores e emissões consequentes. A Figura 4.1 apresenta um organograma relacionando os elementos envolvidos na análise energética realizada.



Figura 4.1 - Organização dos elementos envolvidos na avaliação energética da EACF.

Apesar de serem citados na Figura 4.1, alguns itens como a gasolina e a queima de combustíveis nas viaturas e embarcações não serão detalhados nesse estudo, uma vez que o foco da presente pesquisa são os processos envolvidos na geração e consumo de energia elétrica e térmica.

A seguir, são descritas as características das infraestruturas de armazenamento de combustíveis, geradores de energia elétrica, caldeiras, incineradores e seus respectivos pontos de emissões.

4.1. Armazenamento de Combustíveis

A EACF conta com 10 tanques em aço inox e parede dupla, com uma capacidade para 30.000 litros de *diesel* cada. Esse óleo *diesel* pode ser transferido tanto para alimentação dos geradores, caldeira, incinerador ou para abastecimento de viaturas e embarcações.

Compondo esses sistemas existem dois tanques (5.000 litros cada) na praça de máquinas para alimentação dos geradores e dois outros tanques (1.750 litros cada) na área externa para abastecimento de viaturas e embarcações a *diesel*. Para armazenar a gasolina, existe também um tanque na área externa, com capacidade para 5.000 litros. Acoplado a esse

tanque estão as bombas para abastecimento de viaturas e embarcações a gasolina. A Figura 4.2 apresenta a foto dos reservatórios de combustíveis externos a EACF.



Figura 4.2 - Tanques e bombas de combustíveis externos à Estação. Foto do autor, 2011.

Os combustíveis fornecidos ao PROANTAR pela Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS) são especialmente desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) e suportam até 40 graus negativos sem sofrer alterações. A partir de 2008, com a obrigatoriedade de adição de biodiesel ao *diesel* utilizado no território nacional, a PETROBRAS passou a adicionar o biodiesel também ao óleo *diesel* Ártico utilizado na Estação (CARDOSO, 2008).

Os combustíveis chegam a EACF por navio e a transferência para os tanques é realizada com auxílio de duas chatas de transporte de óleo, uma com capacidade de 12.000 litros e outra de 14.000 litros. A Figura 4.3 apresenta a foto da chata de 12.000 litros de capacidade, em procedimento de transferência de combustível.



Figura 4.3 - Chata para transporte de combustíveis com capacidade para 12.000 litros durante um desembarque de óleo. Ao fundo Navio Almirante Maximiano H-41. Foto do autor, 2011.

Por medida de segurança, um dos tanques fica sempre vazio para armazenar o produto em caso de algum acidente, de forma a evitar vazamentos e contaminações da área.

4.2. Sistema de geração e distribuição de energia elétrica

Para geração de energia elétrica a EACF, a partir de 2008 foram instalados quatro motogeradores da marca Cummins, modelo C200-D6-4. Cada grupo era composto de motor *diesel* modelo 6CTAA-G1-8.3 (motor turbodiesel, 6 cilindros de 8,3 litros) e um alternador Stamford UCI274H1 (4 polos) com potência de 255 kVA/204 kW, controlados por um módulo PowerComand PCC 3100. A potência de cada um desses grupos motogeradores no modo *Prime*⁹ é de 240 kVA/192 kW e no modo *Standby*¹⁰ é de 260 kVA/208 kW (CUMMINSPOWER, 2008).

Denominados de Grupo Motor Gerador 1, 2, 3 e 4 (G1, G2, G3 e G4), os motogeradores estavam instalados da seguinte forma:

- Três grupos na praça de máquinas (G1, G2 e G3);
- Um grupo no compartimento gerador de emergência (G4);

Na época, o funcionamento de apenas um destes geradores era suficiente para suprir as necessidades cotidianas da Estação (sem atividades de manutenção ou expansão), mas caso houvesse necessidade, os grupos geradores eram capazes de funcionar em paralelo e de realizar transferência automática de carga. A cada 250h de operação, o motogerador em linha era parado para manutenção de rotina e a cada 1000 horas para manutenção detalhada (MB, 2010). Para minimizar a poluição sonora, cada grupo era envolvido por uma carenagem acústica de 75 dB(A) fabricada pela IMB. A Figura 4.4 apresenta fotos dos grupos instalados na praça de máquinas, destacando as vistas interna e externa das carenagens acústicas, e painel de controle PCC 3100 com o gerador em funcionamento.

A interconexão das bobinas dos alternadores era estrela paralela com neutro isolado e os geradores funcionavam a 1.800 rpm, resultando em uma rede trifásica com tensão de linha 220V/60 Hz. A Figura 4.5 apresenta o esquema de ligação estrela paralela, utilizado nos geradores da Estação(CUMMINSPOWER, 2008). O esquemático da interligação entre os quadros e os geradores de acordo com o diagrama de conexões dos sistemas de distribuição de força de 13/10/10 é apresentado no ANEXO C. Ressalta-se que não havia o condutor neutro nas instalações, quando era necessária ligação de aparelhos em 127 V, eram utilizados transformadores portáteis.

⁹ Modo *Prime*: Fornecimento normal de energia elétrica para cargas por tempo ilimitado ou limitado.

¹⁰ Modo *Standby*: Aplicações de emergência onde a energia é fornecida durante a interrupção da energia normal.



Figura 4.4 - Fotos dos grupos motogeradores a *diesel* e suas proteções acústicas, presentes na praça de máquinas. Fotos do autor, 2011.

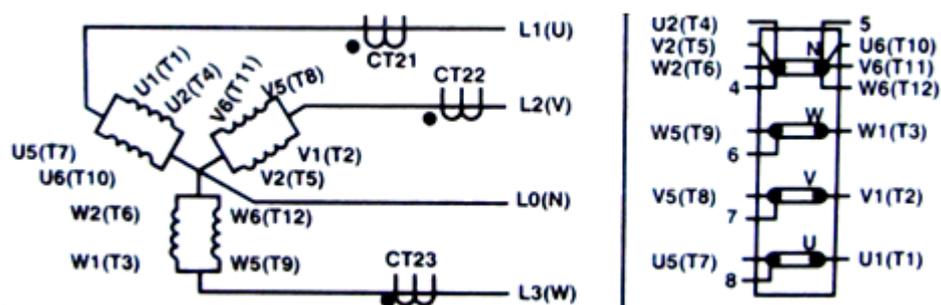


Figura 4.5 - Esquema de conexão entre as bobinas dos alternadores Stamford UCI274H1 da EACF. Representação da topologia estrela paralela, conforme fixado no alternador.

Em conjunto com esses grupos, existiam os quadros de controle, sinalização e distribuição de energia. Os quadros de distribuição se dividiam em: Quadro Elétrico Principal (QEP), Quadro Elétrico de Emergência (QEE), Painel Principal de Força (PPF 2F-01), Painel de Cargas Vitais (PCV) e Quadro de Sinalização Remota (QSR).

Na Praça de Máquinas estava instalado o Quadro Elétrico Principal (QEP). O QEP possuía quatro módulos, sendo dois de controle e dois de distribuição de energia. A Figura 4.6 apresenta a foto frontal do QEP.



Figura 4.6 - Foto do quadro elétrico principal na praça de máquinas. Foto do autor, 2011.

No primeiro módulo, estavam instalados os disjuntores principais dos geradores G1 e G2, os disjuntores do comando e da multimedição e os respectivos bornes de controle e automação. Na porta existiam dois multimedidores digitais PowerLogic PM210 (para medição de tensão, corrente, potência e frequência de G1 e G2), as chaves comando e as sinaleiras de alarme do G1 e do G2.

No segundo módulo, estavam instalados, na parte superior, o disjuntor principal do gerador G3, a chave de interligação entre QEP/QEE e os disjuntores de comando e da multimedição. Na parte inferior do módulo, ficavam os bornes de controle e automação do G3 e os bornes controle e automatismo da interligação do QEP com o QEE (o qual abrigava os circuitos do G4), na porta existia um indicador digital PowerLogic PM210 (para medição de tensão, corrente, potência e frequência de G3) e as chaves comando e as sinaleiras de alarme do G3.

No terceiro módulo, estavam instalados os disjuntores de distribuição de energia e na porta existia um indicador digital PowerLogic PM210 (para medição de tensão, corrente, potência e frequência do barramento do quadro) e existia também um indicador analógico de corrente com chave seletora para medição das correntes de linha do Painel Principal de Força (PPF 2F-01).

No quarto módulo, estavam instalados o restante dos disjuntores de distribuição de energia.

A Figura 4.7 apresenta a foto da vista interna da parte traseira dos painéis da Praça de Máquinas, aberta na ocasião para a conexão do analisador de energia aos barramentos. Nos 1º módulos, 1 e 2, podem ser vistos na sequência a chegada dos cabos dos geradores (cabos azuis), a passagem pelos transformadores de corrente (TC) utilizados para medição, passagem pelos disjuntores e conexão aos barramentos principais.



Figura 4.7 – Vista dos barramentos do quadro elétrico principal. Foto do autor, 2011.

4.3. Sistema de calefação: Caldeiras a *diesel*

Para calefação e aquecimento de água na Estação, foram instaladas, no ano de 1996, duas caldeiras a *diesel* fabricadas pela Giacomet, cada uma com a capacidade de produzir uma potência térmica de 120.000 kcal/h. No verão de 2010/2011, as caldeiras operavam a uma

temperatura que variava entre 50°C a 55°C, com pressão de saída de 1bar a 2bar e pressão de retorno de 0,5bar a 1bar. O sistema de caldeiras era redundante, sendo operada uma caldeira por vez com alternância mensal. No interior das caldeiras, circulava uma mistura metade água, metade anticongelante. Essa mistura circulava no sistema de calefação e no intercambiador responsável pela troca de calor com a rede de água quente. A Figura 4.8 mostra a foto da caldeira Alfa em operação, sendo apresentada pelo encarregado responsável pela manutenção das caldeiras no verão de 2010/2011.



Figura 4.8 - Foto da caldeira Alfa em operação. Foto do autor, 2011.

4.4. Incinerador a *diesel*

Para eliminação dos resíduos sólidos orgânicos, a Estação contava com um sistema compacto de incineração, composto por um módulo semiautomático, com autocontrole e automonitoramento. O incinerador Reator de Gaseificação Luftech (RGL) funciona segundo o sistema de Gaseificação e Combustão Combinadas. O modelo RGL-200S foi desenvolvido pela empresa Luftech e possui uma capacidade de queima de 30 Kg/h e eficiência de 98% (LUFTECH, 2007). No RGL, o material a ser incinerado é sucessivamente secado, decomposto e gaseificado. Os gases combustíveis formados nessas fases (cerca de 70% CO e 30% CH_x), são incinerados nas fases subsequentes, atingindo temperaturas elevadas no ciclone (acima de 1.000 graus centígrados), inibindo a geração de gases nocivos.

Após a queima, restam cerca de 2% a 5% de cinzas em relação ao volume original de resíduo (LUFTECH, 2007) no cinzeiro, que por sua vez era esvaziado e o material embalado para retorno ao Brasil. As Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram, respectivamente, as fotos do incinerador e do painel de comando indicando corrente, tensão e temperaturas.



Figura 4.9 – Foto do incinerador RGL200S em operação. Foto do autor, 2011.



Figura 4.10 – Foto do painel de comando do incinerador RGL200S. Foto do autor, 2011.

4.5. Pontos de emissões e poluentes na EACF

Os processos de geração de energia elétrica, aquecimento e incineração na Estação utilizavam-se da queima de combustíveis para operação e consequentemente eram responsáveis por emissões de poluentes. Na EACF, as chaminés e escapamentos dos processos podiam ser observados no teto da Estação, totalizando sete pontos de emissão de poluentes. As descargas das caldeiras, incinerador e geradores são apresentadas nas fotos da Figura 4.11.

Descargas das caldeiras



Descarga do incinerador



Descargas dos geradores



Figura 4.11 - Fotos das descargas das presentes no teto da EACF. Fotos do autor, 2011.

Os poluentes emitidos podem ser diferentemente nocivos à saúde e ao meio ambiente a depender de suas concentrações por volume de ar. A Tabela 4.1 apresenta uma relação de

poluentes emitidos nos processos de queima de combustíveis e descreve os principais efeitos nocivos.

Tabela 4.1 – Poluentes e alguns dos seus efeitos nocivos (LORA e NASCIMENTO, 2004; NREL, 2010).

POLUENTE	DESCRIÇÃO
Dióxido de carbono (CO ₂)	Gás de efeito estufa não tóxico.
Monóxido de carbono (CO)	Gás venenoso produzido pela combustão incompleta de carbono nos combustíveis. Impede entrega de oxigênio para os órgãos do corpo e tecidos, causando dores de cabeça, tontura e comprometimento da percepção visual, destreza manual e capacidade de aprendizagem.
Óxido de nitrogênio (NO _x)	Compostos nitrogenados como o dióxido de nitrogênio (NO ₂) e óxido nítrico (NO). Formados quando qualquer combustível é queimado em alta temperatura. Estes compostos podem levar a problemas respiratórios, a poluição atmosférica e a chuva ácida.
Hidrocarbonetos não queimados na combustão (UHC - <i>Unburned Hydrocarbons</i>)	Produtos da combustão incompleta do combustível hidrocarboneto, incluindo formaldeído e alcenos. Leva a reações atmosféricas que causam nevoeiro fotoquímico.
Particulados (PM - <i>Particulate Matter</i>)	Uma mistura de fumaça, fuligem, e gotículas de líquido que podem causar problemas respiratórios e formar névoa atmosférica.

Para minimizar as emissões, os motogeradores da EACF possuíam na saída da descarga dos gases filtros oxidocatalisadores capazes de reduzir em até 95% o monóxido de carbono, 90% a fuligem, 85% os formaldeídos e até 10% dos óxidos de nitrogênio (COSTA, 2009).

Kassoy (2009) define os coeficientes de emissões para grupos geradores de 50 kW a 450 kW, em função do percentual de potência de saída dos motores. Estes indicadores são apresentados nos gráficos da Figura 4.12. Para a estimativa das emissões provocadas pelos motogeradores da EACF sugere-se considerar, nos gráficos da Figura 4.12, uma operação a 75% da potência nominal e fatores de redução característicos do filtro oxidocatalizador.

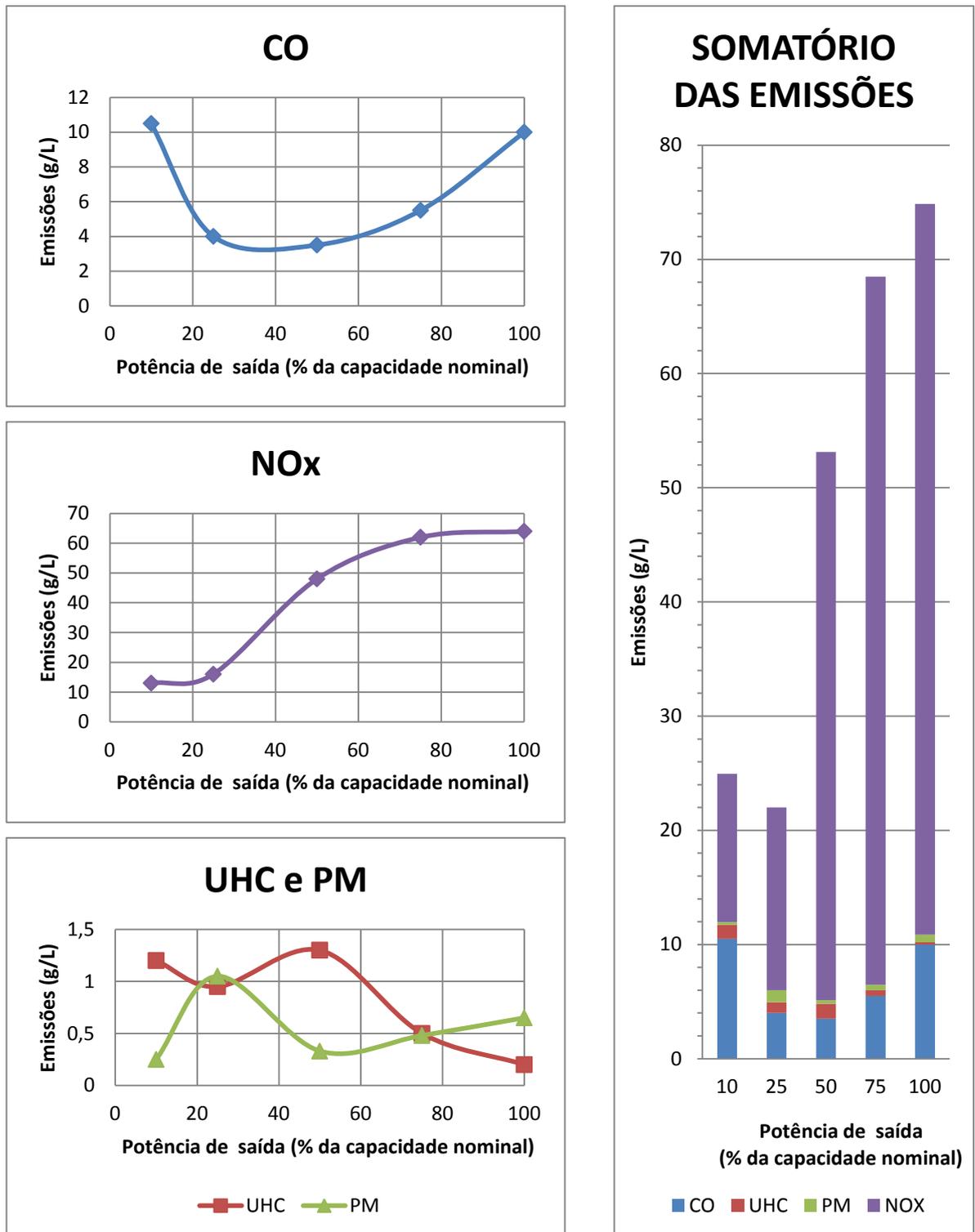


Figura 4.12 - Fatores de emissão para grupos motogeradores de 50kW a 450kW, gráficos elaborados com base nos estudos de Kassoy (2009).

Os carbonos presentes no combustível que não forem emitidos em forma de monóxido de carbono ou hidrocarbonetos não queimados são emitidos em forma de dióxido de carbono. Todavia, em função dos respectivos pesos moleculares, cada 12 toneladas de carbono, quando agregados a átomos de oxigênio, forma 44 toneladas CO_2 .

Dessa forma a emissão de CO₂ pode ser expressa por:

$$E_{CO_2} = E_C \cdot \frac{44}{12} \quad (4.1)$$

onde,

E_{CO_2} = Emissão de dióxido de carbono (CO₂);

E_C = Emissão de carbono (C).

O nível de monóxido de carbono (CO) emitido pelas caldeiras, de acordo com uma carta da empresa Giacomet enviada a Marinha do Brasil em 10 de novembro de 1997, era de 168 ppm durante a partida, caindo para 45 ppm após 5 minutos de operação (GIACOMET, 2011). A carta completa pode ser vista no ANEXO C.

O incinerador também possuía um projeto diferenciado. Segundo análises feitas no Brasil e Alemanha, as emissões dos reatores Luftech atingem os padrões exigidos pela Norma Brasileira NBR11175 e pela Resolução 316 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (LUFTECH, 2007).

Considerando um óleo *diesel* com densidade de 0,82 Kg por litro e 88% de conteúdo de carbono, um consumo anual de 360 mil litros por ano, calcula-se que a emissão de CO₂ da antiga EACF situava-se em torno de 940 toneladas por ano.

4.6. Conclusão

Neste capítulo, foi vista a infraestrutura de energia da EACF referente a janeiro de 2011, cerca de um ano antes do incêndio. A matriz energética da Estação brasileira era exclusivamente dependente do óleo *diesel* transportado do Brasil para Antártica. A capacidade de armazenamento local é de 300.000 litros e o abastecimento dos tanques era feita por embarcações chatas, uma de 12.000 litros e outra de 14.000 litros.

Os 4 motogeradores de 240 kVA cada, marca Cummins, instalados a partir de 2008, eram novos e modernos. Na época, o funcionamento de apenas um motogerador era suficiente para suprir as cargas normais da Estação (sem atividades de manutenção e ou expansão). A ligação do gerador era estrela paralela com neutro isolado, o que resultava em uma rede elétrica era 220 V / 60 Hz em toda a Estação. Sem a disponibilidade do condutor neutro, eram utilizados transformadores portáteis quando havia a necessidade de atender equipamentos de 127 V.

Para a calefação e o aquecimento da água da Estação, eram utilizadas duas caldeiras à *diesel* marca Giacomet, cada uma com a potência 120.000 kcal/h. As caldeiras operavam uma

por vez, com alternância mensal. O fluido de trabalho operava a uma temperatura entre 50°C e 55°C.

Para a eliminação dos resíduos sólidos havia um incinerador a *diesel*, marca Luftech, modelo RGL-200S, com capacidade de queima de 30 Kg/h. Após a queima, restavam 2% a 5% de cinzas em relação ao volume original do resíduo.

Por ser exclusivamente dependente do combustível fóssil óleo *diesel*, as emissões da EACF eram significativas. Calcula-se que a emissão de CO₂ da Estação situava-se em torno de 940 toneladas por ano.

A seguir será apresentado o diagnóstico energético da EACF.

Capítulo 5: Diagnóstico energético da EACF

Conhecida a infraestrutura energética da Estação, inicia-se a etapa de diagnóstico energético. Para isso, foram investigados os principais consumidores de combustível e realizado o balanço energético da EACF. Foi quantificada a participação dos processos no consumo de óleo *diesel* e detalhadas as características do perfil de cargas elétricas. Concluindo o diagnóstico, são apresentadas análises da qualidade de energia realizadas na Estação no verão de 2010/2011.

5.1. Consumo de combustíveis

Para levantamento do perfil de consumo de combustíveis na EACF e identificação dos principais consumidores, foi analisada a planilha de acompanhamento de combustíveis, da Marinha do Brasil, que registra o óleo *diesel* consumido individualmente nos motogeradores, caldeiras, incinerador, viaturas e embarcações. A representação gráfica dos dados foi realizada e é apresentada na Figura 5.1 e Figura 5.2.

CONSUMO ÓLEO DIESEL NA EACF EM 2011 [LITROS/MÊS]

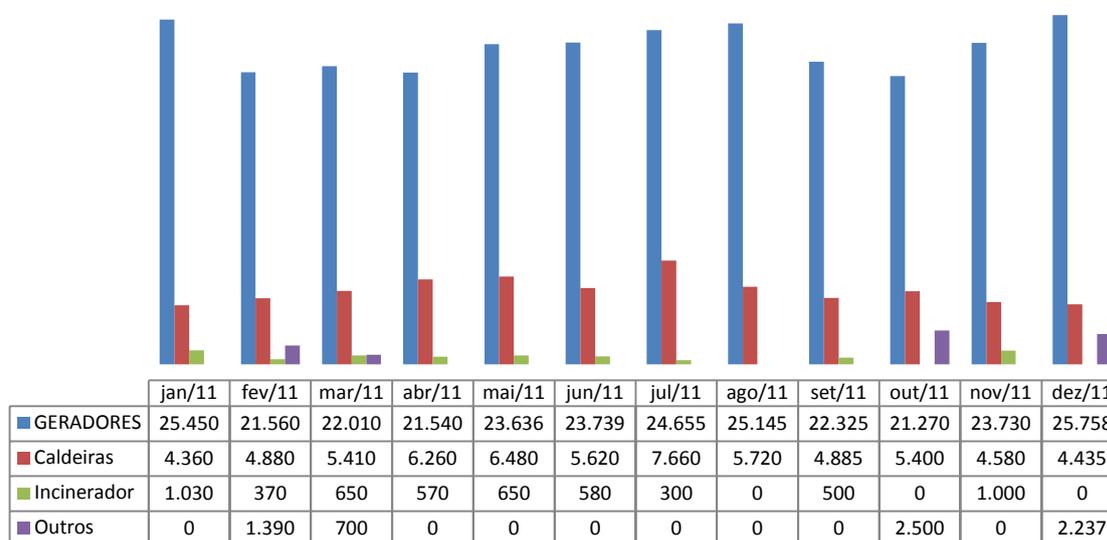


Figura 5.1 - Gráfico de consumo mensal de óleo *diesel* na EACF em 2011. A categoria “Outros” reúne o consumo das viaturas e embarcações. Elaborado com base nos dados da MB.

Pela análise do gráfico da Figura 5.1, constata-se que os maiores consumidores de *diesel* da Estação eram, respectivamente, os processos de geração de energia elétrica e térmica, e que existem variações sazonais no consumo de combustível nos dois casos. Foi também constatado que o consumo dos geradores era maior nos meses do verão e do inverno, quando ocorriam respectivamente maior atividade de pesquisa e maior necessidade de

aquecimento das tubulações de água e esgoto. Já o maior consumo de *diesel* pelas caldeiras, apresentou-se no período de inverno, quando a compensação térmica deve ser maior devido à redução das temperaturas externas.

O gráfico da Figura 5.2 apresenta o percentual de participação dos processos de geração de energia elétrica, calefação e aquecimento de água, incineração, viaturas e embarcações, no consumo de *diesel* da Estação. Observa-se que, em 2011, 96% do *diesel* foi consumido pelos sistemas de geração de energia elétrica e de aquecimento, sendo o consumo dos geradores 4,33 vezes superior ao das caldeiras.

PARTICIPAÇÃO DOS PROCESSOS NO CONSUMO ÓLEO DIESEL NA EACF (2011)

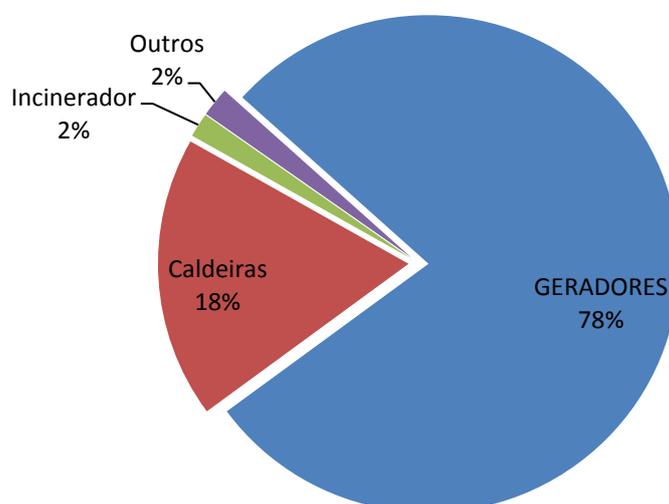


Figura 5.2 - Participação dos processos no consumo óleo *diesel* na EACF em 2011. Elaborado com base nos dados da MB.

Dessa forma, o estudo dos sistemas de geração de energia elétrica e térmica mostraram-se como os pontos principais de atenção na busca de possíveis melhorias.

5.2. Perfil de cargas elétricas da EACF

Conhecidos os processos consumidores de *diesel* na Estação e identificada a participação majoritária do processo de geração de energia elétrica, prossegue-se com o diagnóstico energético pelo levantamento do perfil de cargas elétricas da EACF. O levantamento foi realizado em duas expedições à Estação, sendo uma em 2008/2009 e outra em 2010/2011. A Figura 5.3 apresenta o perfil de cargas da EACF levantado durante a OPERANTAR XXIX (2010/2011).

PERFIL DE CARGAS ELÉTRICAS DA EACF (2010)

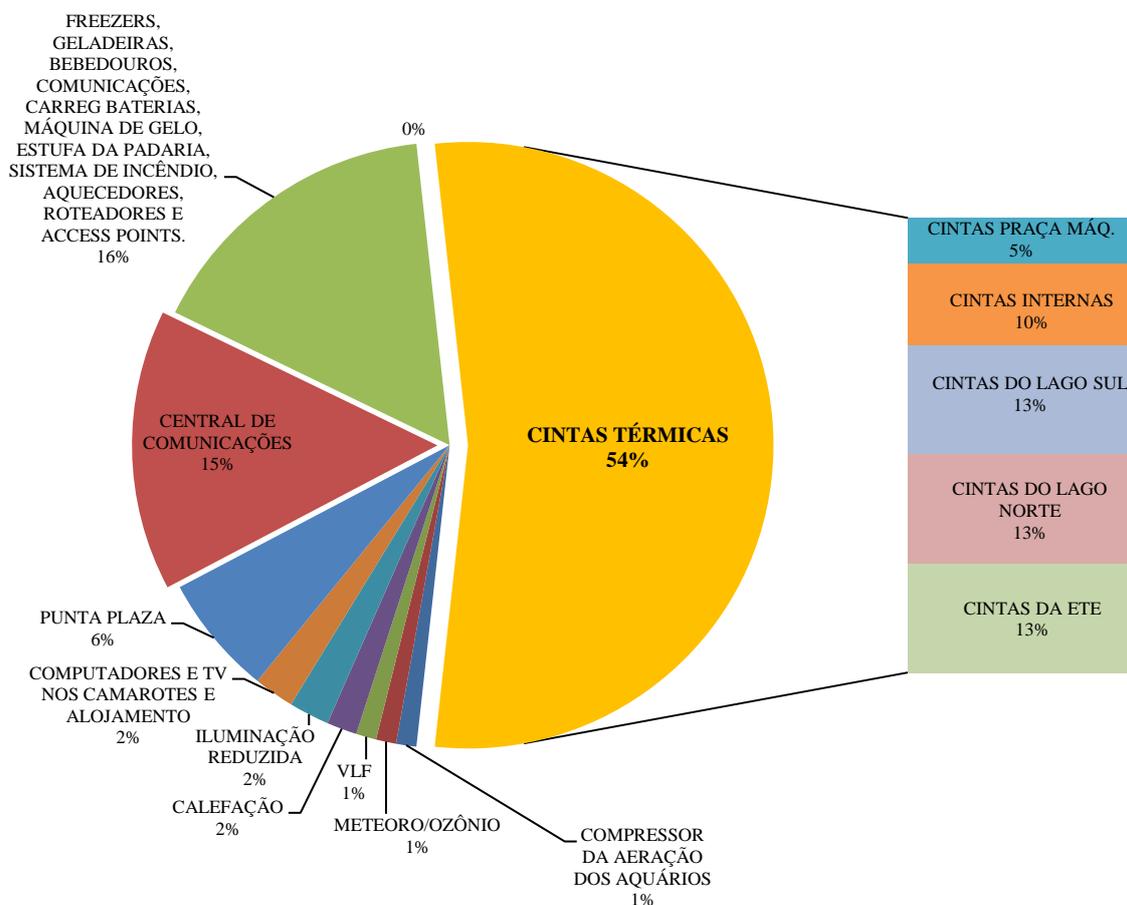


Figura 5.3 - Perfil de cargas elétricas da EACF. Elaborado com base nos dados de 2010 da MB.

Pelo levantamento, constatou-se que os maiores consumidores de energia elétrica da Estação eram os circuitos das cintas térmicas¹¹, que compunham os sistemas anticongelamento das redes de água e esgoto. Dessa forma, estima-se que o aquecimento das tubulações era responsável por cerca de 42% (ou 150.000 litros/ano) do consumo de óleo *diesel* na EACF.

Avaliação dos circuitos das cintas térmicas dos lagos:

Os circuitos hidráulicos dos lagos utilizavam tubulações de aço galvanizado de 1,5 polegadas, isoladas por espuma de poliuretano e protegidas com canos de PVC (*Polyvinyl Chloride*- Cloreto de Polivinil) de 150 milímetros. Entre a espuma isolante e a parede externa da tubulação ficavam instaladas as cintas térmicas. Para ilustrar a situação descrita, a Figura 5.4 apresenta a foto de uma tubulação exposta durante uma manutenção.

¹¹ As cintas térmicas são cabos chatos com redes de resistências internas, que são instaladas em torno das tubulações e reservatórios, para a manutenção térmica. A corrente elétrica ao percorrer essa rede de resistências é transformada em calor por efeito Joule (RAYCHEM, 2011).

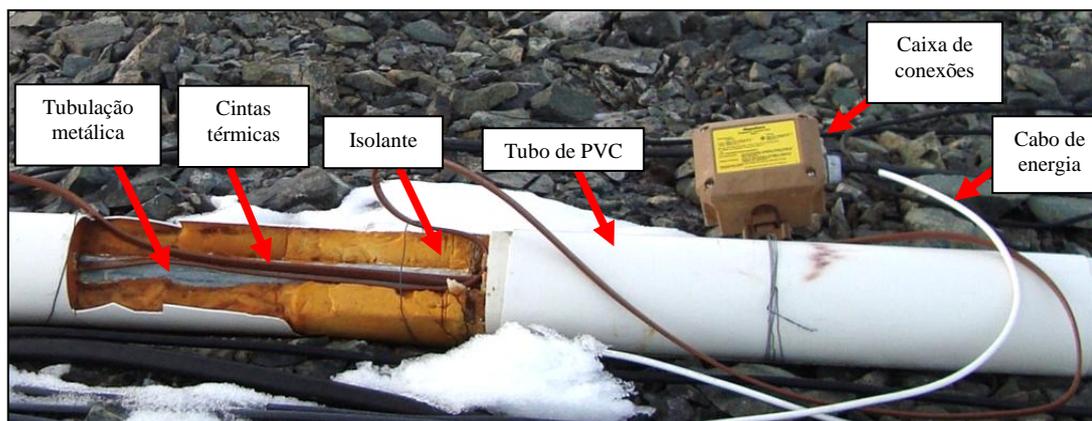


Figura 5.4 – Foto de cintas térmicas expostas, aguardando finalização da instalação. Foto do autor, 2011.

As cintas térmicas ou cabos térmicos (*heating cables*) utilizadas nos dutos dos lagos eram da marca *Raychem*, modelos QTVR2-CT. Essa família de cabos aquecedores são autorreguláveis e desenvolvidos para uso industrial, na manutenção de temperaturas até 110°C em tubulações e reservatórios, podendo ainda serem utilizados como cabos antig congelamento em sistemas com altas perdas de calor (RAYCHEM, 2011). A Figura 5.5 apresenta o esquema construtivo das cintas térmicas QTVR e três curvas característica de potência em função da temperatura da tubulação em cintas de diferentes capacidades.

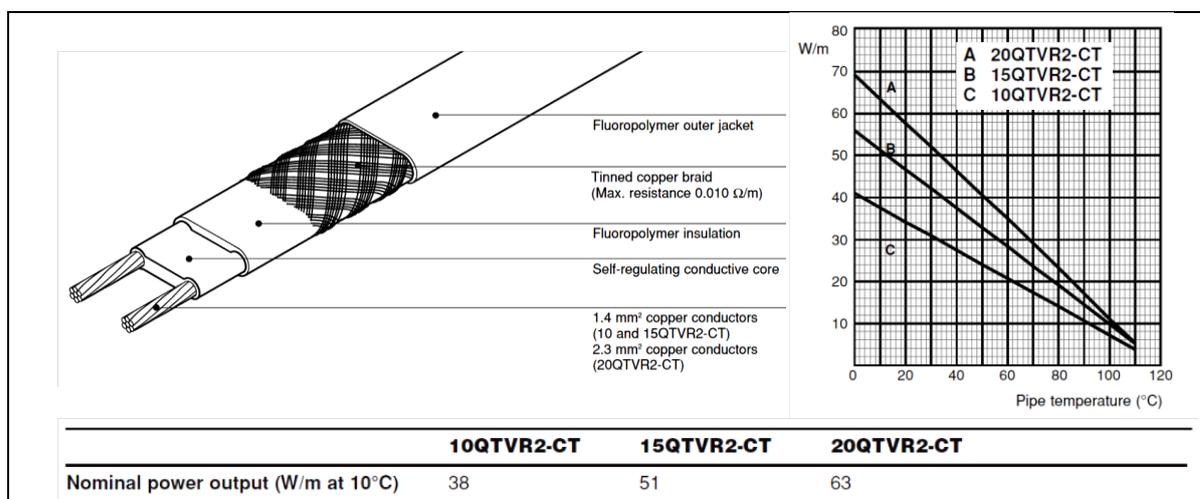


Figura 5.5 – Características das cintas térmicas utilizadas nas tubulações vindas dos lagos da EACF (RAYCHEM, 2011).

Para uma avaliação da temperatura de operação da cinta e da tubulação em ambientes externos, foi medida a temperatura no duto de coleta de água do Lago Sul. O duto encontrava-se com uma pequena parte descoberta, sendo assim, foram medidas as temperaturas da água do lago, temperatura da cinta exposta, temperatura da tubulação exposta e temperatura da tubulação com isolação rompida. A Figura 5.6 apresenta a foto do ponto de medição no Lago Sul e a indicação das temperaturas medidas com termômetro infravermelho tipo pistola, marca Fluke.

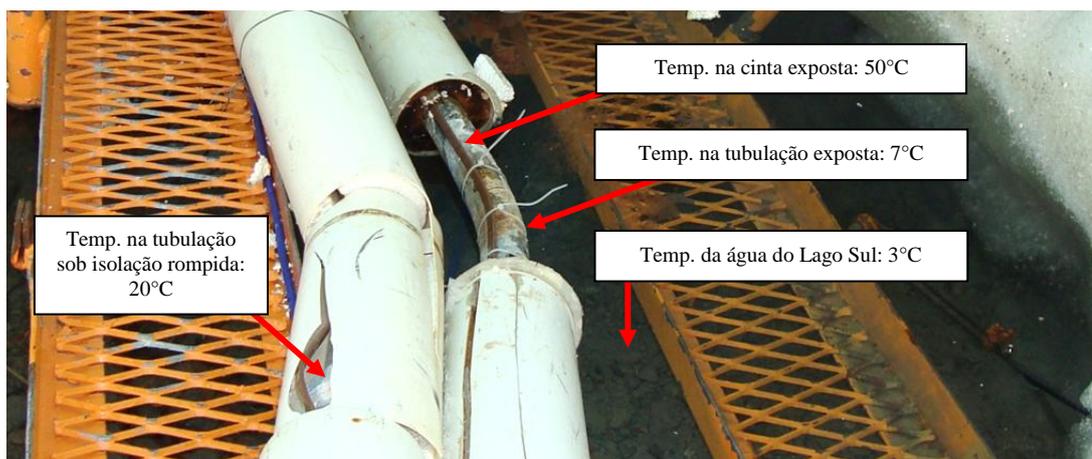


Figura 5.6 – Temperaturas da tubulação e cinta térmica, no lago sul. Foto do autor, 2011.

As temperaturas medidas indicam que as cintas térmicas eram capazes de aquecer os dutos mesmo em condições expostas ao tempo. Em condições normais de isolamento a temperatura indicou valores superiores de 20°C, o que sugere um gasto excessivo de energia uma vez que a função das mesmas é apenas de anticongelamento. A temperatura padrão para sistemas anticongelamento da *Raychem* é 4°C (RAYCHEM, 2011).

É certo que a adequação dos isolamentos e da especificação dos cabos térmicos, juntamente com um sistema de acionamento eletrônico automatizado que permita o controle e monitoramento, podem reduzir significativamente a parcela de energia elétrica consumida nesses tipos de circuitos.

Iluminação:

Em 2008, foi realizado na EACF, pela pesquisadora Dr^a. Jussara Fardin, da UFES, o levantamento da quantidade de lâmpadas por tipos, potências e ambientes. Da análise das tabelas foram construídos os gráficos da Figura 5.7 e Figura 5.8, que mostram respectivamente por tipo de lâmpada, a potência instalada e o quanto esses valores equivaliam percentualmente.

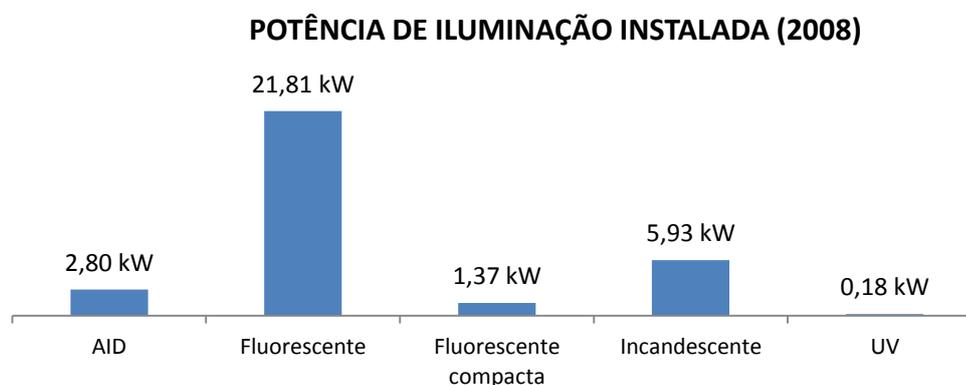


Figura 5.7 - Potencia de iluminação instalada na EACF por tipo de lâmpada. AID - Alta Intensidade de Descarga. Dados referentes a 2008/2009.

PARTICIPAÇÃO POR TIPO DE LÂMPADA NA POTÊNCIA INSTALADA DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO (2008)

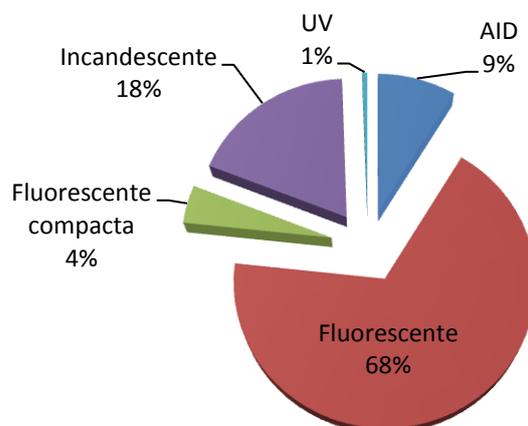


Figura 5.8 - Participação por tipo de lâmpada na potência instalada do sistema de Iluminação. AID - Alta Intensidade de Descarga. Dados referentes a 2008/2009.

Pelas Figura 5.7 e Figura 5.8, constata-se que, em 2008, os maiores consumidores de energia do sistema de iluminação eram as lâmpadas fluorescentes e incandescentes. Na expedição científica à Estação realizada em 2010/2011, foi visto que a maior parte das lâmpadas incandescentes já tinham sido substituídas por modelos fluorescentes. Dessa forma, as lâmpadas fluorescentes tornaram-se foco na avaliação do sistema de iluminação.

As lâmpadas fluorescentes são projetadas para operarem na sua máxima eficiência luminosa em uma determinada faixa de temperatura ideal, normalmente de 25°C a 45°C. A operação em ambientes com temperatura fora da faixa ideal pode reduzir significativamente a eficiência da lâmpada, uma vez que modifica o estado dos vapores internos ao tubo (OSRAM, 2011).

Na EACF foi verificada que a maior parte das lâmpadas fluorescentes tubulares, lâmpadas Osram, Universal 20 W Luz do dia Especial, estavam sendo utilizadas em luminárias abertas ou sem tampa instalada. A Figura 5.9 ilustra a situação descrita.



Figura 5.9 - Luminária da Praça de Máquinas, operando sem tampa de proteção. Foto do autor, 2011.

O uso de lâmpadas fluorescentes em ambientes de baixa temperatura requer a escolha de modelos específicos. Uma lâmpada fluorescente tubular tradicional operando abaixo de

10°C tem sua eficiência reduzida em mais 50% enquanto que uma lâmpada projetada para ambientes de elevada amplitude térmica consegue manter a eficiência acima de 90% mesmo operando em ambientes com temperaturas de 5 °C a 75 °C (OSRAM, 2011).

5.3. Análise de qualidade de energia da EACF

A qualidade de energia é fundamental para o bom desempenho elétrico de uma instalação e de seus equipamentos. Distúrbios nos níveis de tensão, que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema elétrico, podem ser caracterizados como um problema de Qualidade de Energia do sistema elétrico. A baixa qualidade de energia também afeta os motores, aumentando as perdas e diminuindo o torque e o rendimento e reduz a vida útil das lâmpadas (MARTINS e HADDAD, 2001). A partir desta definição, justifica-se a importância da análise periódica da qualidade de energia na EACF, uma vez que esta energia era fornecida para vários laboratórios equipados com aparelhagem sensível.

Para conhecimento das características das cargas e das condições da infraestrutura elétrica, de 15/12/2010 a 19/01/2011, durante a OPERANTAR XXIX, foram registrados dados de qualidade da energia elétrica em diversos pontos da EACF. Para os registros de qualidade de energia foi utilizado um analisador de energia elétrica marca EMBRASUL, modelo RE6000 e ponteiros de correntes modelo TI3000 e EB100. Para a análise, foram registradas nas três fases, tensões, correntes, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência, frequência e distorções harmônicas de tensão e corrente. O tempo de integração selecionado foi de 100 ms. Para visualização dos registros, foi utilizado o *software* de análise ANL6000 1.8, da empresa EMBRASUL.

Durante o período de 00 h 00 min do dia 11/01/2011 às 23 h 54 min do dia 17/01/2011 (uma semana), o analisador foi conectado na saída do Gerador 1 e foram registrados nas três fases: tensões, correntes, potências, distorções harmônicas e frequência. O relatório completo, referente a esse período de 7 dias supracitado, pode ser visto no APÊNDICE A.

A análise energética na saída do gerador mostrou que a Estação consumiu em média 3,2 MWh/dia de energia elétrica tendo uma potência ativa média de 133 kW, no período analisado. A Figura 5.10 mostra a energia diária consumida ao longo de uma semana (11 a 17 de janeiro de 2011) e a Figura 5.11 a energia total consumida por fase, para o mesmo período.

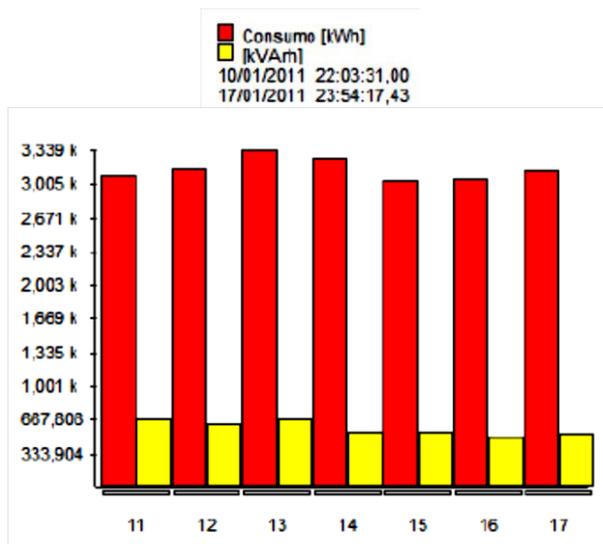


Figura 5.10 - Consumo diário de energia elétrica na EACF, no período de 11 a 17 de janeiro de 2011.

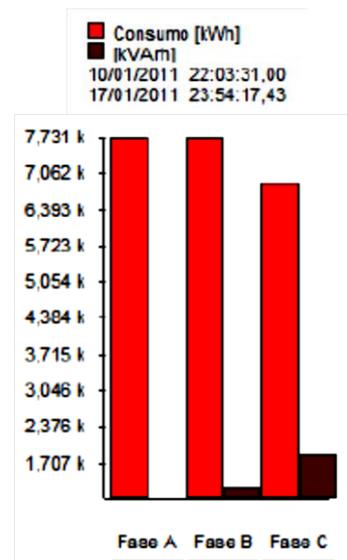


Figura 5.11 - Consumo de energia elétrica por fase, no período de 11 a 17 de janeiro de 2011.

O consumo de energia por fase apresentou desbalanceamento em relação às parcelas Ativas e Reativas. Dessa maneira, identificou-se que há possibilidade de melhoria no planejamento e execução da distribuição igualitária de cargas eletrônicas¹² e indutivas¹³, entre cada uma das três fases da rede. O desbalanceamento de tensão na saída do gerador foi inferior a 1% e a Distorção Harmônica Total (DHT), inferior a 3 %.

A Figura 5.12 apresenta as potências trifásicas ao longo do tempo, durante a mesma semana (11/01/2011 a 17/01/2011) na EACF. Foi observado que, nos primeiros quatro dias registrados (11, 12, 13 e 14 de janeiro), o consumo apresentou uma variação periódica diária de aproximadamente 50 kW entre os períodos de maior (10 h às 18 h) e menor (0 h às 5 h) consumo de eletricidade. Já nos três dias seguintes (15, 16 e 17 de janeiro), o consumo manteve uma maior constância em torno do valor médio. Esse fato ocorreu devido ao registro ter sido realizado englobando um período de atividade de pesquisa (primeiros quatro dias) e outro de finalização das atividades de pesquisa e espera para regresso ao Brasil (últimos três dias). Dessa forma, pode-se avaliar o perfil de consumo da Estação com pesquisadores em atividade e em espera.

¹² São exemplos de cargas eletrônicas encontradas na EACF: lâmpadas com reatores eletrônicos, computadores e fontes de alimentação ininterruptas do tipo inversor prioritário (UPS - *Uninterruptible power supply*).

¹³ São exemplos de cargas indutivas encontradas na EACF: compressores, transformadores, bombas e motores elétricos.

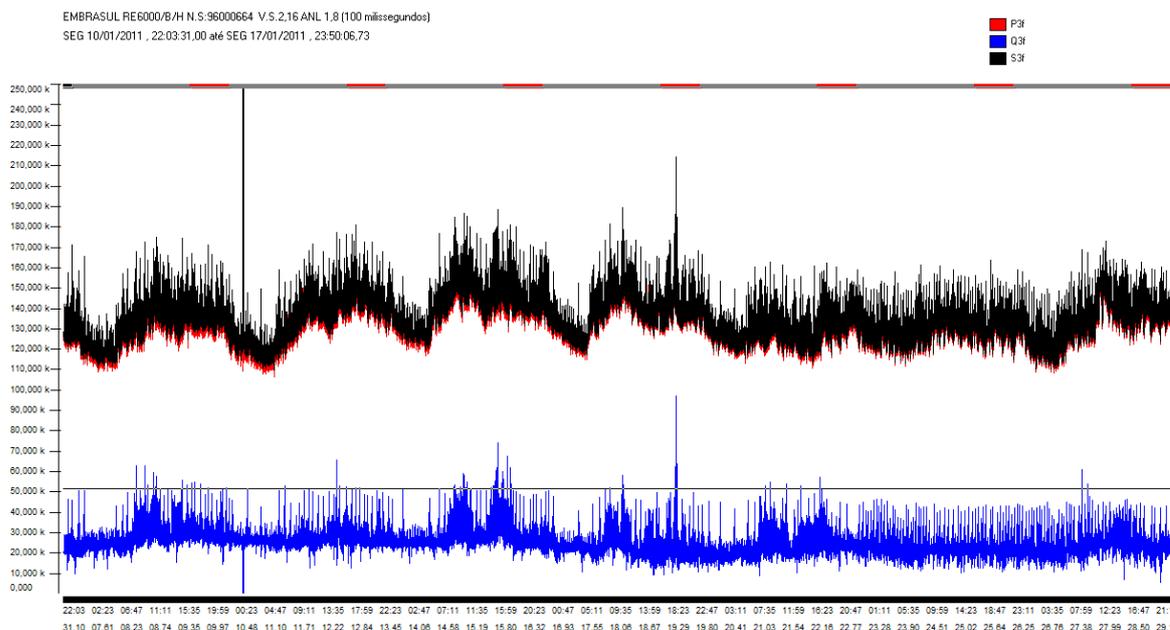


Figura 5.12 – Potências trifásicas, ativa (em vermelho), reativa (em azul) e aparente (em preto).

A Potência Reativa situou-se em torno de 26,6 kVAr e o Fator de Potência (FP) na saída do gerador se manteve em 0,98, superior ao mínimo exigido (0,92) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para unidades consumidoras alimentadas em baixa tensão. Este FP reflete a característica resistiva da carga global da Estação, tendo seu valor elevado em razão da significativa parcela de potência ativa consumida pelos circuitos de cintas térmicas. A Figura 5.13 apresenta a medida do FP no PCV com e sem um dos circuitos de cintas térmicas. Na ocasião, o circuito das cintas em questão estava em manutenção e ficou desligado desde as 9 horas da manhã até as 21 horas do primeiro dia de registro. Durante esse período em que as cintas térmicas permaneceram desligadas, foi observada uma redução de aproximadamente 5% no FP do PCV.

A distorção harmônica total de tensão (DHTu) na saída do gerador, situou-se em torno de 3%, dentro do limite de 5% recomendado pela norma IEEE 519(IEEE, 1992). No entanto, foi observada a ocorrência de um aumento repentino de 0,5% na DHTu. Após investigação, descobriu-se que a elevação da distorção foi causada pela entrada em funcionamento do segundo transmissor da Central de Comunicações. Esse transmissor é responsável pela comunicação via satélite e estava sendo alimentado por um *no-break* (UPS - *Uninterruptible Power Supplies* – Fonte de Potência Ininterrupta) bifásico de saída senoidal, marca SMS, modelo *uSS8000Si DOUBLE II* (8kVA/6,4kW, 60Hz, bifásico, sem filtro PFC - *Power Factor Correction*). A Figura 5.14 mostra a variação da DHTu destacando o aumento do conteúdo harmônico às 18h30min do dia 12/01/2011.

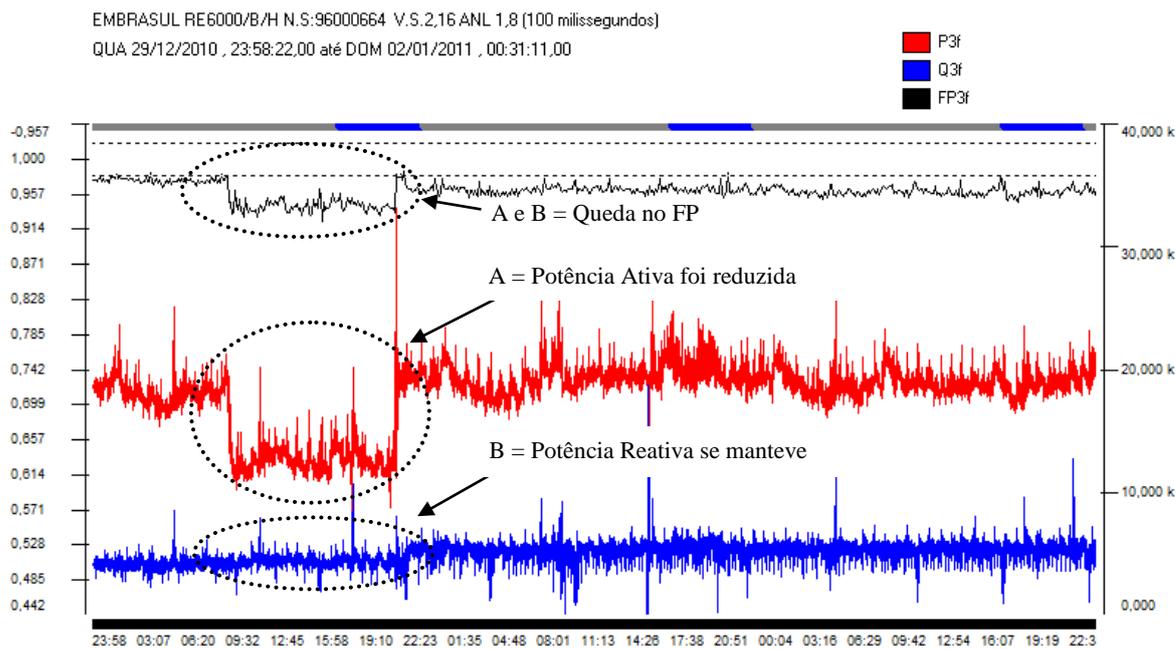


Figura 5.13 - Registros apresentados: potência ativa, potência reativa e fator de potência ao longo de três dias no PCV. Cintas térmicas desligadas de 9 horas às 21h do primeiro dia.

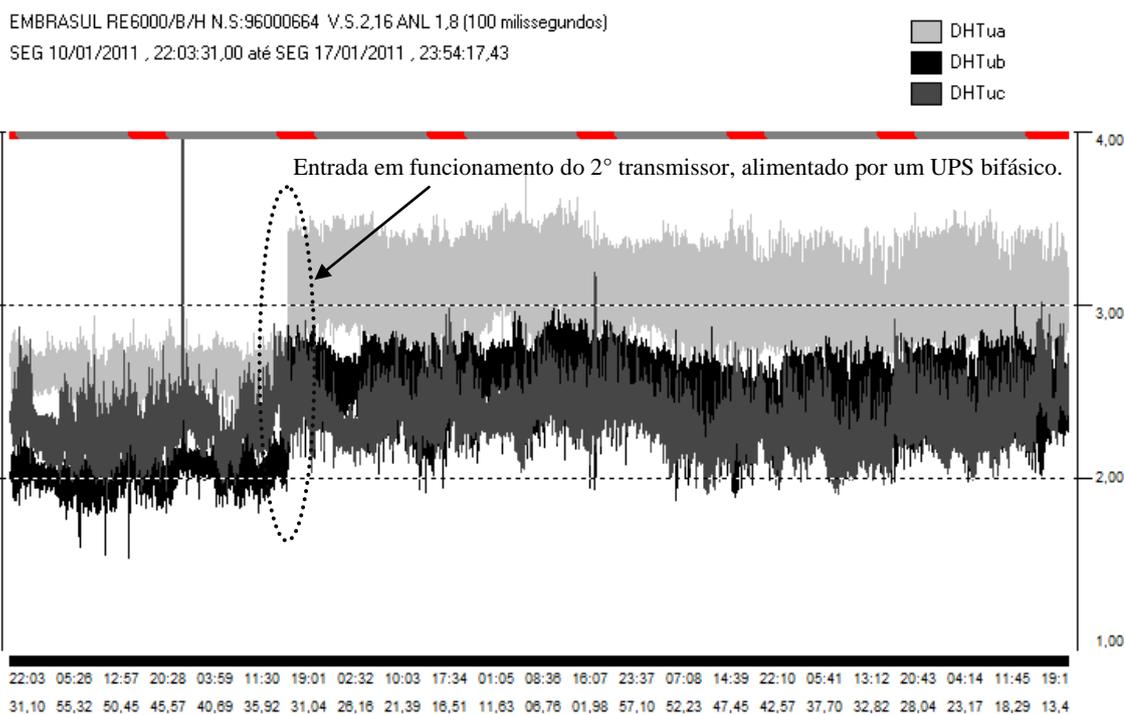


Figura 5.14 - Distorção harmônica de tensão, na saída do Gerador 1.

Outra ocorrência observada foram os baixos valores das tensões na casa de bombas do lago sul. Durante a partida da bomba, a tensão de linha BC chegou a 172,4 V, uma queda de 21,6%. O desbalanceamento de tensão conforme NEMA, em outros momentos, chegou a atingir 4,2%. A alimentação da casa de bombas do lago sul apresentou-se como precária,

sendo interessante a execução de estudos para a correta adequação. A Figura 5.15 apresenta o registro das tensões de linha realizado na casa de bombas do lago sul.

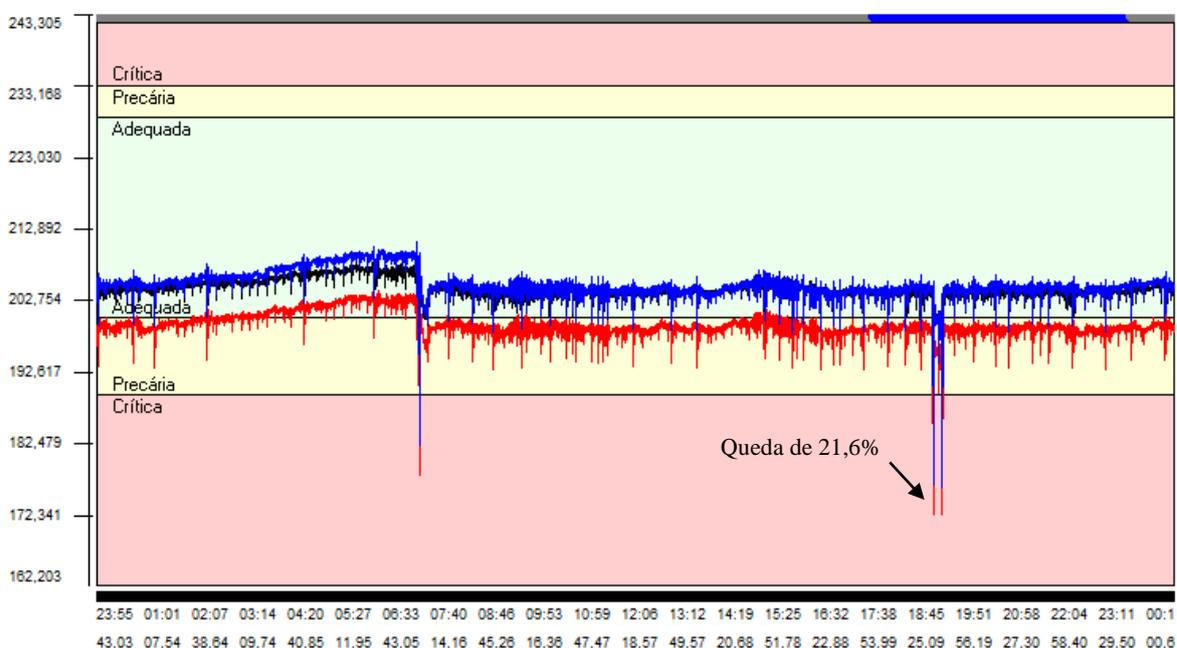


Figura 5.15 - Tensões de linha na casa de bombas do lago sul.

5.4. Conclusões

Na EACF, as instalações elétricas quase sempre estiveram em constantes mudanças devido às exigências locais e de pesquisa. Nesses casos, enfatiza-se a importância do monitoramento contínuo da qualidade de energia.

O diagnóstico energético da Estação mostrou que os maiores consumidores de combustíveis eram os grupos motogeradores (78%) e as caldeiras (18%), sendo que o equivalente a 42% do consumo total de *diesel* da Estação está relacionado aos circuitos de cintas térmicas. Portanto, foi revelada importância de se aplicar aos circuitos de aquecimento das tubulações, adequados modelos de cabos aquecedores aliados a técnicas eletrônicas de acionamento que permitam tanto o controle quanto o monitoramento do sistema.

A partir das medidas feitas na EACF, pode-se concluir que os indicadores analisados na EACF classificam a qualidade da energia gerada como boa, apesar das ocorrências detectadas. O nível de tensão no painel elétrico principal estavam na faixa adequada; e o desequilíbrio de tensão e as distorções harmônicas de tensão também estavam dentro dos limites aceitáveis por norma. Já os circuitos das casas de bombas dos lagos apresentaram alimentação em níveis precários, fato que poderia ser sanado pela adequação dos circuitos alimentadores.

Capítulo 6: Potenciais energéticos da EACF

Este capítulo apresenta o estudo dos potenciais energéticos da EACF para o aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos, cogeração nos motogeradores e no incinerador, uso de energia eólica e uso de energia solar. São avaliados também os desempenhos de três modelos de aerogeradores comerciais e de um painel fotovoltaico para diferentes técnicas de posicionamento. Os indicadores financeiros podem ser obtidos considerando o litro de óleo *diesel* como a unidade monetária.

6.1. Resíduos Sólidos Orgânicos

A EACF contava com um exemplar sistema de coleta seletiva de resíduos sólidos, com a separação de papéis, plásticos, vidros, metais, orgânicos e materiais perigosos ou contaminantes. Todo o resíduo sólido orgânico era incinerado. Após incineração, as cinzas e os outros resíduos eram armazenados e retornados para o Brasil.

Entre todos os tipos de resíduos sólidos produzidos na Estação, os orgânicos eram os principais, equivalendo a cerca de 50% de toda a massa de resíduos (WOELFFEL, ALVAREZ, *et al.*, 2007). Segundo dados de Woelffel *et al.* (2007), em uma amostragem de 30 dias distribuídos entre os meses de novembro de 2006 a março de 2007, foram contabilizados 573,6 kg de resíduos orgânicos, equivalendo em média a 0,31 kg/hab/dia, somente considerando o processo de produção e consumo de alimentos. Englobando todas as fontes de resíduos da Estação, entre março de 2009 e fevereiro de 2010, os Relatórios de Resíduos Gerados na EACF indicam uma produção média de 640Kg/mês de resíduos orgânicos. A Figura 6.1 apresenta a massa mensal de resíduos sólidos incinerada na Estação entre 03/2009 e 02/2010 (SECIRM, 2010).

Os resíduos sólidos, dependendo de suas características, podem ser incinerados ou processados em um sistema de Digestão Anaeróbia (DA), a qual consiste em um processo de conversão de matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio. Na DA, primeiro ocorre a conversão de orgânicos complexos em materiais como ácidos voláteis, e depois a conversão destes ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio, em produtos finais gasosos: o metano e o gás carbônico (REICHERT, 2005). Nos biodigestores, os resíduos sólidos orgânicos e os efluentes do sistema de esgoto podem ser juntamente utilizados em um biodigestor para se obter o conteúdo de sólidos desejado.

**RESÍDUOS SÓLIDOS OOGÂNICOS NA EACF [Kg/MÊS]
03/2009 A 02/2010**

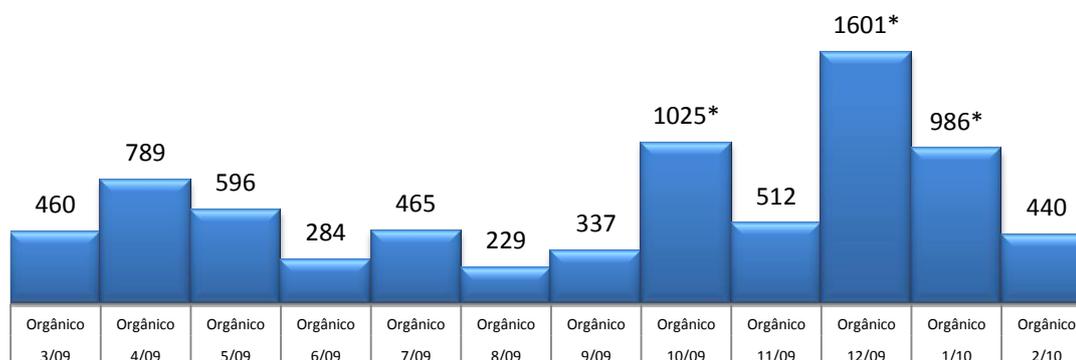


Figura 6.1 - Resíduos sólidos orgânicos produzidos na EACF no período de 01/2009 a 03/2010. * Meses com descarte de gêneros vencidos, 793Kg, 892Kg e 257 Kg respectivamente para os meses 10/09, 12/09 e 1/10. Elaborado com base nos dados do Relatórios de Resíduos Gerados na EACF, da Marinha do Brasil.

Segundo Reichert (2005), entre diversas tecnologias (Valorga, DRANCO, BTA, WAASA, Kompogas e Linde-KCA) de média e grande escala (mais de 1.000 t/ano e 10.000 t/ano respectivamente) utilizadas para a digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos, a produção média de biogás situa-se em torno de 120 Nm³ (metro cúbico de gás a 1 atm, 0 °C, 0% de umidade relativa, ou Normal metro cúbico) por tonelada de resíduo orgânico, variando de 80 Nm³/t a 200 Nm³/t de acordo com a tecnologia utilizada e composição dos resíduos.

Quanto a aplicação em pequena escala (menos de 1.000 t/ano), Hessami *et al* (1996) descreve um biodigestor com volume de 9 m³, desenhado para operar em comunidade de 500 pessoas, com uma taxa de ingestão de resíduo orgânico de 260 kg/dia (densidade de 900 kg/m³) e tempo de retenção de 20 dias. Hessami *et al.* (1996) considera, por via de regra, que cada 1,0 m³ de ocupação do biodigestor pode gerar cerca de 1,4 m³ de biogás, com um poder calorífico de 20 MJ/m³.

Considerando-se as taxas utilizadas por Hessami *et al.* (1996), estima-se que o potencial energético para a utilização de um biodigestor para a produção de biogás, quando alimentado com o volume de resíduos equivalente ao produzido pela EACF, seja de 192,89 kJ/hab/dia (somente contabilizando o resíduo gerado no processo de produção e consumo de alimentos). Realizando a equivalência energética em relação ao óleo *diesel*, o potencial é de 5,5 ml/hab/dia (considerando um poder calorífico de óleo *diesel* igual a 43,2 MJ/kg e densidade igual a 0,82 kg/l).

Embora a quantidade de resíduos gerados pela EACF (em média 640 kg/mês) induzam ao descarte desse processo para a produção de energia elétrica, principalmente pela relação custo x benefício, é importante considerar a possível contribuição ambiental agregada a tal

iniciativa, bem como as responsabilidades advindas pela sanção da Nova Lei de Resíduos Sólidos (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2010). A utilização de um biodigestor na Estação eliminaria a queima de óleo *diesel* no incinerador e suas emissões, e o metano produzido pode ser utilizado para geração de energia térmica (calefação e cozinha). No entanto, a tecnologia a ser adotada deverá tratar três aspectos críticos na Antártica: segurança, temperatura e escassez de água.

6.2. Potencial de cogeração

Na EACF, o calor produzido pelos motores dos grupos geradores de eletricidade e pelo processo de incineração poderiam ser recuperados e utilizados na calefação e aquecimento de água da Estação.

Em motogeradores que utilizam motores alternativos de combustão interna (MACI) alimentados à *diesel*, a parcela de combustível que efetivamente é transformada em energia elétrica situa-se em torno de 36%, sendo o restante perdido quase que em sua totalidade em forma de energia térmica. Por outro lado, ao se utilizar parte do calor presente nos gases de escape e de resfriamento de água e óleo do motor, a eficiência energética global do sistema pode atingir 76% (LORA e NASCIMENTO, 2004). A Figura 6.2 apresenta o diagrama de fluxos de energia típico de um MACI de ciclo *diesel*, sem e com cogeração.

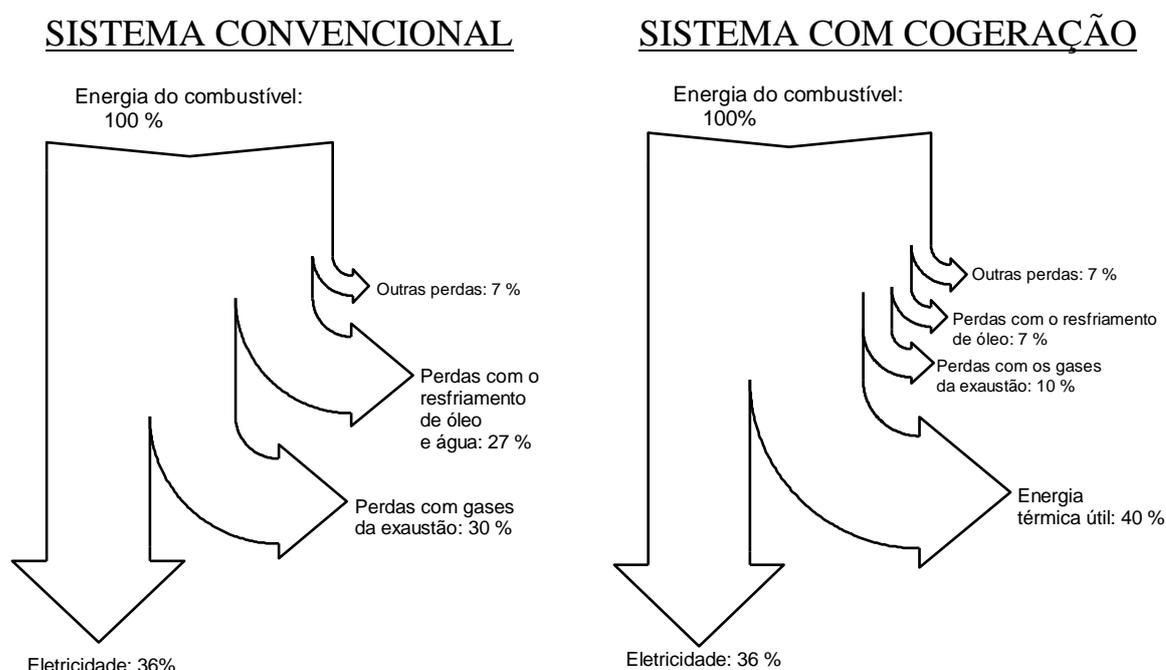


Figura 6.2 - Diagrama de Sankey do balanço energético típico de um grupo motogerador a óleo *diesel*, adaptado de (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Com base nesses dados, foi então calculado o balanço energético da EACF, mensurando nos grupos geradores as porcentagens de óleo *diesel* transformadas em eletricidade, calor utilizável e calor não aproveitável (perdas).

A Figura 6.3 e a Tabela 6.1 apresentam de forma gráfica e numérica, os percentuais e volumes de óleo *diesel* queimado nos diversos processos consumidores de combustível da Estação.

BALANÇO ENERGÉTICO DO CONSUMO DE DIESEL NA EACF EM 2011

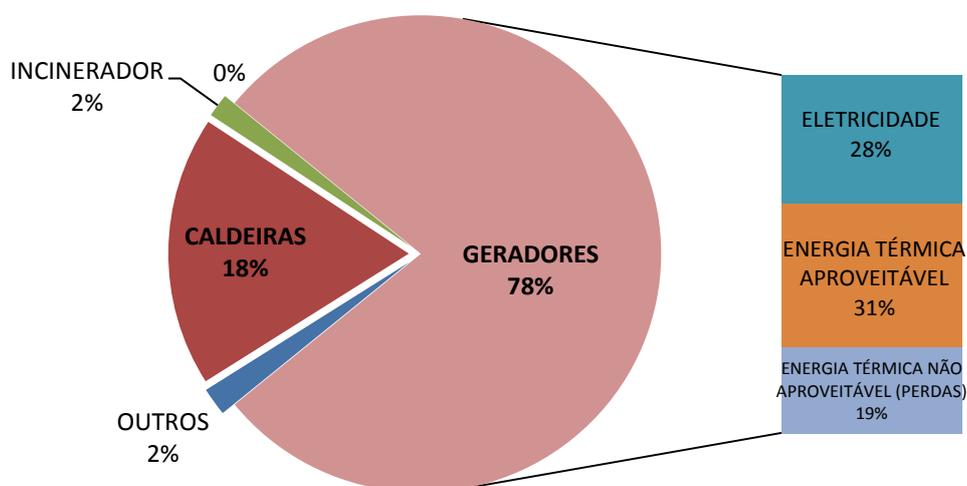


Figura 6.3 - Balanço energético do consumo de óleo *diesel* na EACF, para avaliação de potencial de cogeração.

Tabela 6.1 - Dados numéricos do balanço energético para potencial de cogeração, em litros de óleo *diesel* por ano e equivalência percentual.

PROCESSO CONSUMIDOR		VOLUME DE ÓLEO DIESEL CONSUMIDO [litros/ano]		% EM RELAÇÃO TOTAL ANUAL	
GERADORES	ELETRICIDADE		101.094		28,16%
	ENERGIA TÉRMICA APROVEITÁVEL	280.818	112.327	78,23%	31,29%
	ENERGIA TÉRMICA NÃO APROVEITÁVEL (PERDAS)		67.396		18,77%
CALDEIRAS			65.690		18,30%
INCINERADOR			5.650		1,57%
OUTROS			6.827		1,90%
TOTAL			358.985		100,00%

Comparando o percentual de energia térmica útil cogeraada pelos motores do grupo gerador (31,29%) com o demandado pelo sistema de caldeiras (18,3%), observa-se que, em média, existia energia térmica cogeraada mais que suficiente para suprir as necessidades de aquecimento de água e calefação. Esse fato traduz-se em uma possibilidade de uma significativa redução nas emissões e no consumo de combustível pela implantação de uma planta de cogeração na EACF.

Calculando o consumo médio das caldeiras no ano 2011, obtém-se o valor de 7,5 litros por hora. Considerando o rendimento das caldeiras igual a 90% (LORA e NASCIMENTO, 2004), pode-se dizer que a carga térmica consome em média uma potência equivalente a 6,75 litros de óleo *diesel* por hora.

Avaliando o consumo de combustível nos geradores no mesmo período, obtém-se um valor médio consumido de 32,06 litros por hora. Considerando que, em um grupo motogerador a *diesel*, em média, 40% do combustível consumido é transformado em calor aproveitável (LORA e NASCIMENTO, 2004; ADDAD e LORA, 2006), calcula-se que em média uma energia térmica equivalente a 12,82 litros de óleo *diesel* era expelida pelos motogeradores da Estação a cada uma hora de funcionamento.

Apesar de, em média, a oferta térmica ser maior que a demanda, é necessário investigar a possibilidade de ocorrência de demandas instantâneas superiores à oferta. Para avaliar essa situação foi realizada a comparação entre oferta e demandas térmicas na EACF em 2011, com a máxima resolução dos dados disponibilizados. Na Figura 6.4, é possível observar a sazonalidade na oferta e demanda térmica na EACF, durante 2011, considerando dados médios diários dos geradores e caldeiras. O consumo médio diário das caldeiras situava-se em aproximadamente 150 litros por dia, no verão, e 200 litros/dia, no inverno; enquanto a oferta térmica nos geradores situava-se em 350 litros por dia, no verão, e 300 litros por dia no, inverno.

No gráfico da Figura 6.4, pode-se observar também que em uma análise dos valores médio diários já aparecem situações em que a energia térmica ofertada foi inferior à demandada. Isso indica a necessidade de um sistema de armazenamento da energia térmica oriunda dos grupos motogeradores, para que seja possível o aproveitamento máximo dessa fonte na calefação e no sistema de aquecimento de água.

DEMANDA E OFERTA DE ENERGIA TÉRMICA NA EACF EM 2011

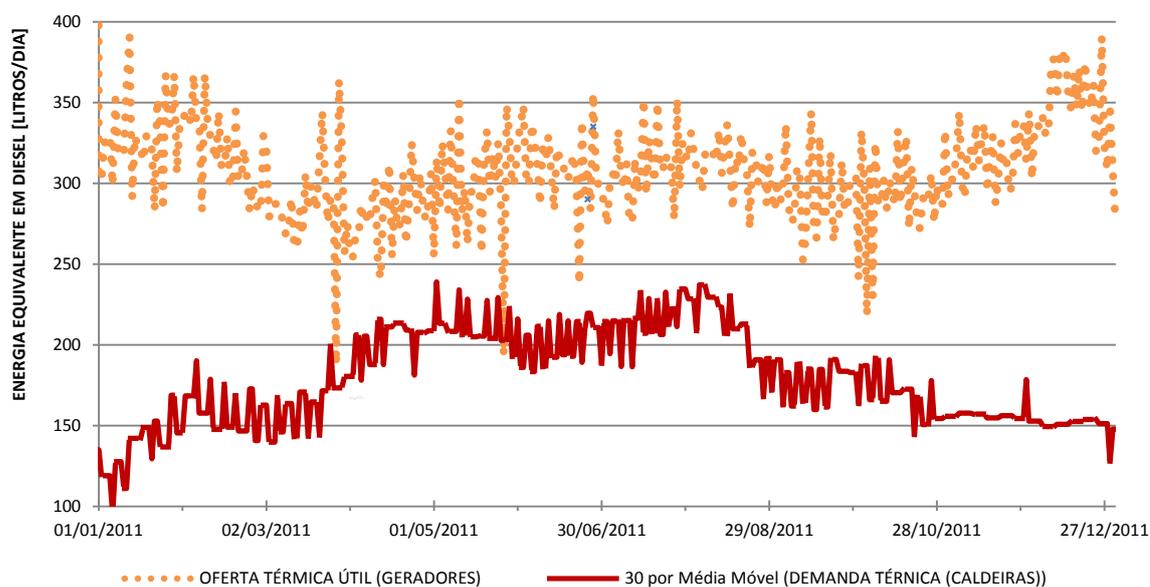


Figura 6.4 - Gráfico de oferta e demanda térmica na EACF, com base em dados médios diários de energia térmica aproveitável nos geradores e demanda da caldeira.

Destaca-se que um pré-aquecimento da água de consumo oriunda dos lagos de degelo já era realizado através do aproveitamento de parte do calor emitido pelos motogeradores através da passagem da tubulação de descarga dos motores pelo reservatório principal de água. No entanto, a caixa d'água utilizada era metálica e sem isolamento térmico. Esse fato facilitava a perda de calor para o ambiente, reduzindo o aproveitamento energético. Outro aspecto é que esse reservatório alimentava a rede de água fria da Estação podendo aquecê-la em excesso, mesmo considerando a reduzida parcela de calor que era absorvida. A Figura 6.5 apresenta a foto do reservatório de água da Estação com indicação dos respectivos pontos de entrada e saída da tubulação de escape dos grupos motogeradores e indicação da temperatura na superfície externa do reservatório.

Para o melhor aproveitamento energético, deve-se optar por um sistema de cogeração com uso de caldeiras recuperadoras e trocadores de calor interligados ao sistema de calefação e aquecimento de água, aliado à apropriada tecnologia de supervisão e controle.

Outra fonte de calor aproveitável era o incinerador. Segundo dados do fabricante, o poder calorífico do resíduo a ser queimado deve ser superior a 2.500 kcal/kg (LUFTECH, 2007). Considerando esse poder calorífico e uma massa de 7.724 kg de resíduos sólidos incinerados ao longo de 12 meses na EACF (período de 3/2009 a 2/2010), calcula-se que o volume de óleo *diesel* equivalente seja de 2.281 litros por ano (para um poder calorífico de óleo *diesel* igual a 43,2 MJ/kg, densidade igual a 0,82 kg por litro e 1 caloria = 4,1855 Joule).

Comparando com o volume de total de óleo consumido anualmente (358.985 litros em 2011), o resíduo sólido incinerado correspondia energeticamente a apenas 0,63%. Dessa forma, estima-se que a implantação de um sistema de cogeração no incinerador representaria uma redução no consumo da Estação inferior a 0,6%, uma vez que haveria também perdas na recuperação do calor.



Figura 6.5 – Sistema de pré-aquecimento da água de consumo do reservatório de água da EACF. Foto do autor, 2011.

6.3. Potencial de uso de Fontes renováveis: Eólica e Solar

Para análise dos recursos eólico e solar, foram utilizadas duas fontes de dados. Os dados numéricos referentes aos ventos, temperaturas e pressões foram obtidos na base de dados do Projeto Meteorologia na Antártica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)(CPTEC-INPE, 2010). Os dados de radiação solar foram obtidos na base de dados de energia solar de superfície da Agência Espacial Norte Americana (NASA SSE - *National Aeronautics and Space Administration Surface Solar Energy Data Set*)(NASA, 2011).

A Figura 6.6 apresenta a foto do laboratório Meteorologia na Antártica. O projeto de Meteorologia operado pelo INPE na Antártica desde 1985 teve como objetivo caracterizar as condições e variações da circulação troposférica na área Norte da Península Antártica e buscar relações entre essa circulação atmosférica e alterações ambientais regionais observadas na região e também na América do Sul. Atualmente possui uma das maiores séries de dados climáticos do continente antártico (MMA, 2009).



Figura 6.6 –Laboratório de Meteorologia na Antártica do INPE, instalada ao lado do Lago Sul, a 16m de altitude. Foto do autor, 2011.

A Figura 6.7 mostra a disposição da infraestrutura da EACF sobre o mapa topográfico da região (JÚNIOR, DANI, *et al.*, 2010). O laboratório meteorológico situa-se ao lado do Lago Sul, a 16m de altitude. O ponto de aquisição dos dados está indicado no mapa para melhor compreensão e investigação das análises a serem apresentadas. Os instrumentos estavam instalados em uma torre de 10m de altura.

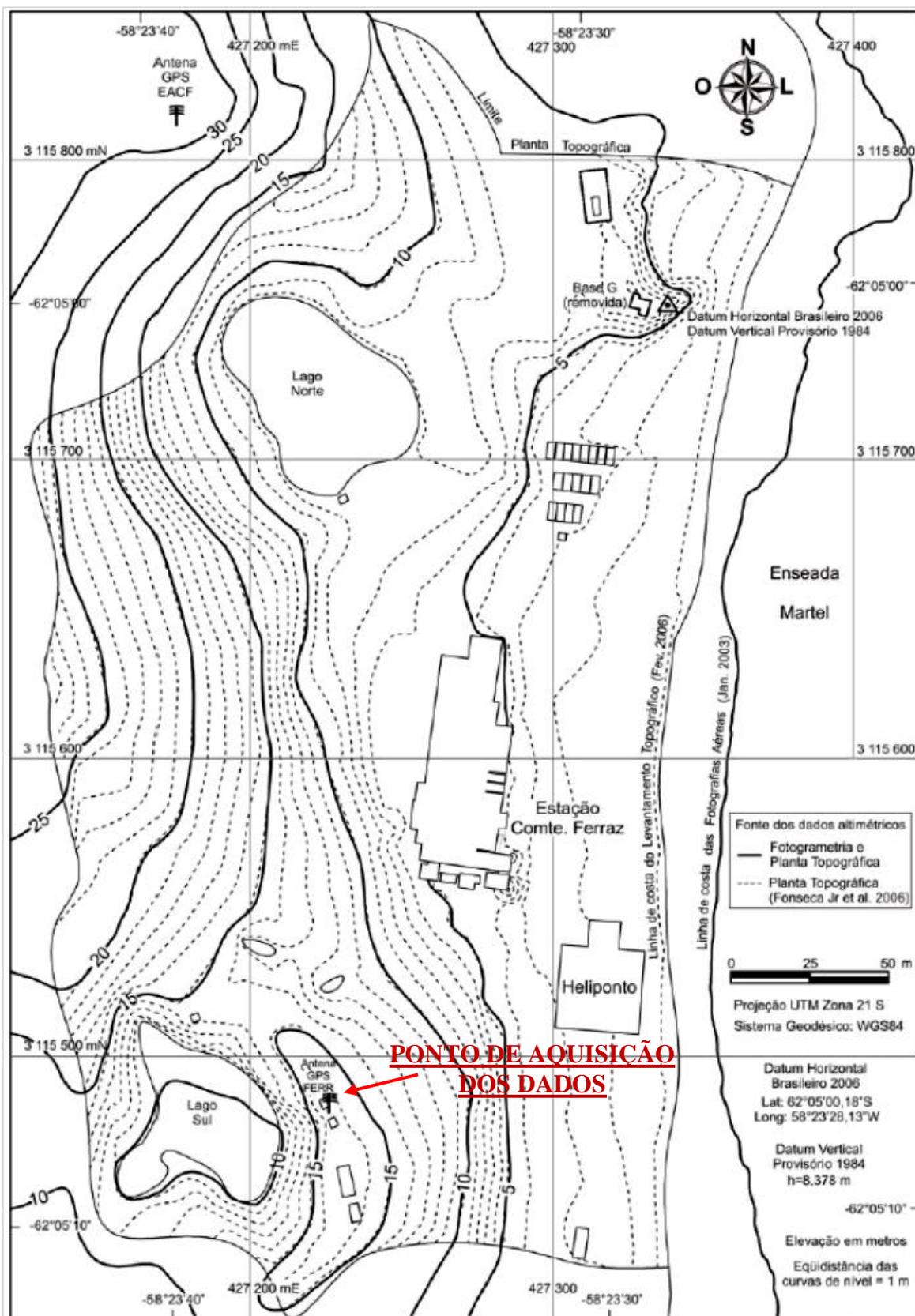


Figura 6.7 - Mapa topográfico do entorno da EACF e indicação do ponto de aquisição dos dados eólicos e de radiação solar (JÚNIOR, DANI, *et al.*, 2010).

6.3.1. Potencial Eólico

A Estação Antártica Comandante Ferraz situa-se em uma região costeira, com velocidade média anual dos ventos igual a 6,1 m/s e direções predominantes norte e oeste. Os meses de maior e menor média de ventos registraram velocidades médias de 9,5m/s (02/1984) e 3m/s (01/2005) (CPTEC-INPE, 2010).

Apesar da disponibilidade de recurso eólico na região da Estação, alguns fatores críticos, como rajadas de ventos e variações de temperaturas e pressão, devem ter sua influência considerada no caso de estudos para estações antárticas. Condições de ventos fortes podem levar os aerogeradores a entrarem na condição de proteção, prejudicando a geração de energia. Variações de temperatura e pressão influenciam na densidade do ar, que consequentemente influencia na quantidade de energia do volume de ar. Dessa forma, para o levantamento do potencial eólico na região da EACF, foram utilizados dados de velocidade, direção, temperatura e pressão, disponíveis na base de dados do CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).

Para simulação e análise gráfica do potencial eólico, foi utilizada a ferramenta computacional *WindoGrapher* (WINDOGRAPHER), que leva em consideração as variações da densidade do ar e dos sistemas de proteção dos aerogeradores.

Para o levantamento do potencial eólico da EACF adotou-se as seguintes etapas:

- a. Análise das médias anuais e mensais das velocidades dos ventos
 - i. Variabilidade anual na oferta do recurso
 - ii. Sazonalidade de oferta do recurso
- b. Análise das direções dos ventos
 - i. Elaboração da rosa dos ventos
- c. Análise mensal da distribuição de frequência das velocidades dos ventos
 - i. Levantamento da curva da distribuição de Weibull sazonal
 - ii. Determinação dos parâmetros k e c
- d. Determinação do potencial eólico
 - i. Potencial eólico por m^2 considerando temperatura e pressão
 - ii. Potencial energético aproveitável considerando modelos comerciais de aerogeradores

Análise das médias anuais e mensais das velocidades dos ventos:

Para descoberta da variabilidade anual do recurso eólico, apresenta-se no gráfico da Figura 6.8 as velocidades médias anuais dos ventos de 1986 a 2010. Pelo gráfico observa-se que as maiores variações anuais ocorreram de 1988 para 1989 ($\Delta = + 1,2$ m/s) e de 2004 para 2005 ($\Delta = - 1,4$ m/s). As médias anuais, mínima e máxima, ocorreram respectivamente em 1986 (4,6 m/s) e em 2010 (7,1 m/s). O desvio padrão da amostra é 0,6 m/s. No projeto do sistema eólico deverá ser avaliada a sensibilidade a essas situações.

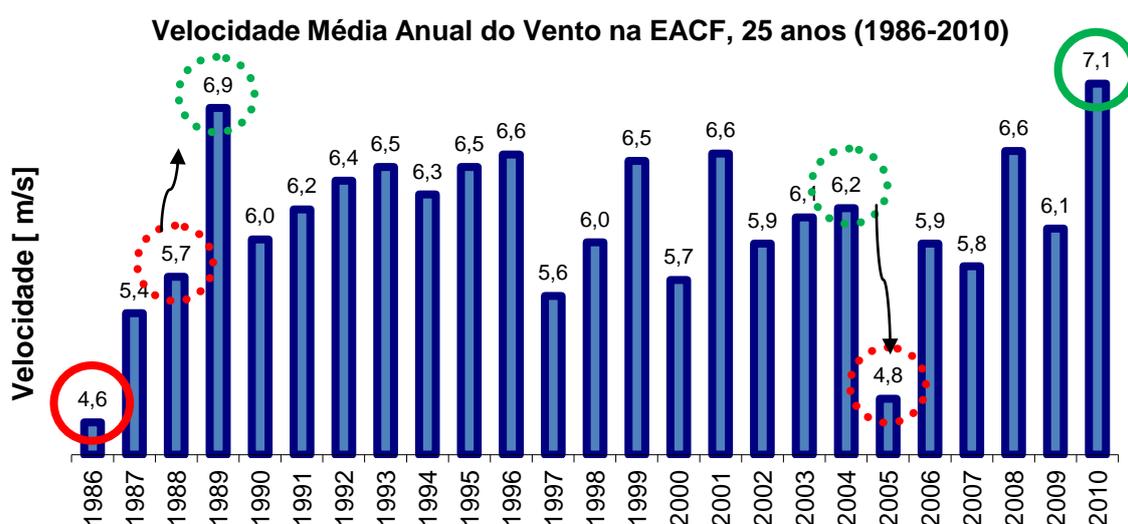


Figura 6.8 - Gráfico de velocidades médias anuais de 1986 a 2010. Destaque em linha contínua para valores extremos. Destaque em linhas pontilhadas para maiores variações observadas. Elaborado com base nos dados coletados pelo CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).

Para avaliar o comportamento sazonal do recurso eólico na EACF, apresenta-se gráfico da Figura 6.9 com as velocidades médias mensais dos ventos referentes ao período de 1986 a 2011.

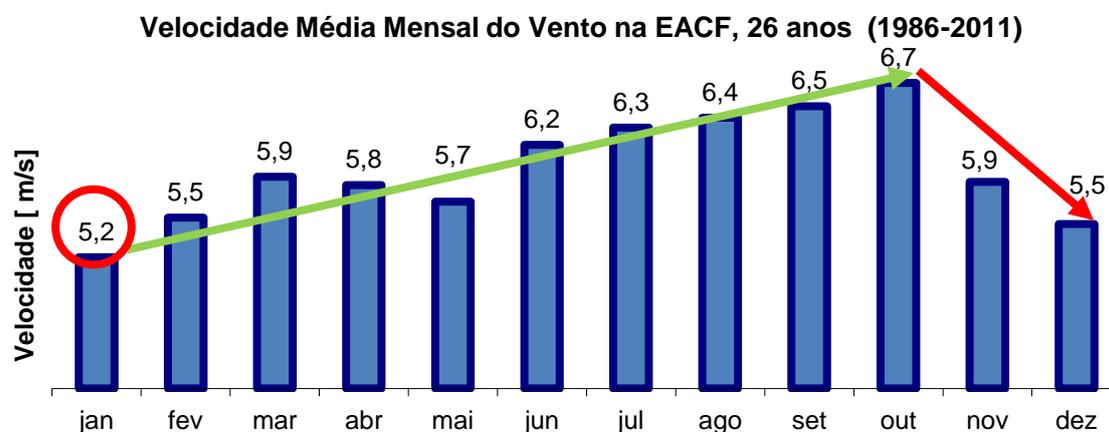


Figura 6.9 - Gráfico de velocidade média mensal do vento na EACF, 26 anos (1986-2011). Destaque para comportamento anual. Elaborado com base nos dados coletados pelo CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).

Pelo gráfico, constata-se que o período de maior velocidade média dos ventos encontra-se no inverno estendendo-se até outubro, quando atinge o valor máximo. O período de menor intensidade de ventos é o verão, sendo janeiro o mês de menor média.

Análise mensal das direções dos ventos:

Para identificação das direções predominantes dos ventos e sazonalidade, apresenta-se a Tabela 6.2, contendo as predominâncias mensais referentes ao período de 1986 a 2010. Consta-se que as direções predominantes são oeste e norte. Os ventos são denominados a partir da direção de onde eles sopram. Um vento norte sopra do norte para o sul, um vento oeste sopra de oeste para leste (CPTEC-INPE, 2010). As primeiras e as segundas direções predominantes são aquelas que apresentaram, respectivamente, as primeiras e segundas maiores ocorrências durante todo o período avaliado.

Tabela 6.2 - Direções predominantes dos ventos na EACF, anual de 1986 a 2010. . Elaborado com base nos dados coletados pelo CEPTEC-INPE (CPTEC-INPE, 2010).

DIREÇÃO PREDOMINANTE DOS VENTOS NA EACF				
MÊS	1º PREDOMINANTE		2º PREDOMINANTE	
<i>jan</i>	<i>Oeste</i>	→	<i>Norte</i>	↓
<i>fev</i>	<i>Norte</i>	↓	<i>Oeste</i>	→
<i>mar</i>	<i>Oeste</i>	→	<i>Leste</i>	←
<i>abr</i>	<i>Leste</i>	←	<i>Norte</i>	↓
<i>mai</i>	<i>Leste</i>	←	<i>Norte</i>	↓
<i>jun</i>	<i>Leste</i>	←	<i>Oeste</i>	→
<i>jul</i>	<i>Oeste</i>	→	<i>Norte</i>	↓
<i>ago</i>	<i>Oeste</i>	→	<i>Norte</i>	↓
<i>set</i>	<i>Norte</i>	↓	<i>Oeste</i>	→
<i>out</i>	<i>Oeste</i>	→	<i>Norte</i>	↓
<i>nov</i>	<i>Oeste</i>	→	<i>Norte</i>	↓
<i>dez</i>	<i>Leste</i>	←	<i>Oeste</i>	→
MÉDIA	<i>Oeste</i>	→	<i>Norte</i>	↓

Destaca-se que as informações de frequência dos ventos por direção auxiliam na compreensão da qualidade do recurso e não necessariamente correspondem à direção de maior densidade de potência. Isso ocorre, pois, na rosa de frequências, apenas é contabilizado o número de vezes que venta em cada direção; enquanto a rosa de densidade de potência considera a velocidade, a direção, a temperatura e a pressão atmosférica, aplicando a cada registro a equação de potência eólica, equação (2.2).

A rosa de frequência dos ventos e a rosa de densidade de potência, referentes ao mês de janeiro de 2010, são apresentadas lado a lado na Figura 6.10. Nesse período, a rosa de

frequência dos ventos apresentou a maior frequência em 90°, enquanto a rosa de densidade de potência apresentou a maior densidade para o ângulo de 30°.

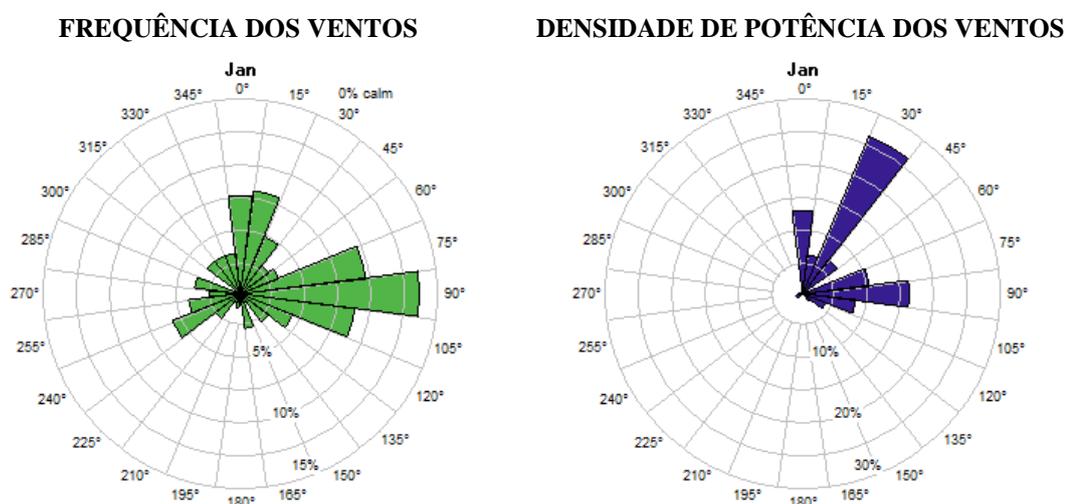


Figura 6.10- Rosa dos ventos de frequência e rosa dos ventos de densidade de potência na EACF referente ao mês de janeiro de 2010.

Análise mensal da distribuição de frequência das velocidades dos ventos:

Para caracterização do perfil eólico da EACF, deve-se quantificar as frequências das diversas velocidades dos ventos registradas. Essa caracterização é realizada pela construção do histograma das velocidades dos ventos. Construído o histograma, seu perfil pode ser aproximado por uma curva da distribuição de Weibull. Encontrando-se a curva de Weibull que melhor contorne o histograma, os dados eólicos poderão ser expressos por apenas dois parâmetros, k e c , de Weibull, respectivamente relacionados com o formato da distribuição e com a velocidade média do recurso.

A Figura 6.11 apresenta o histograma de velocidades, contornado pela curva da distribuição de Weibull, referentes aos registros das velocidades dos ventos na EACF de 1994 a 2006. Os parâmetros de Weibull encontrados foram $k = 1,45$ e $c = 6,72$ m/s.

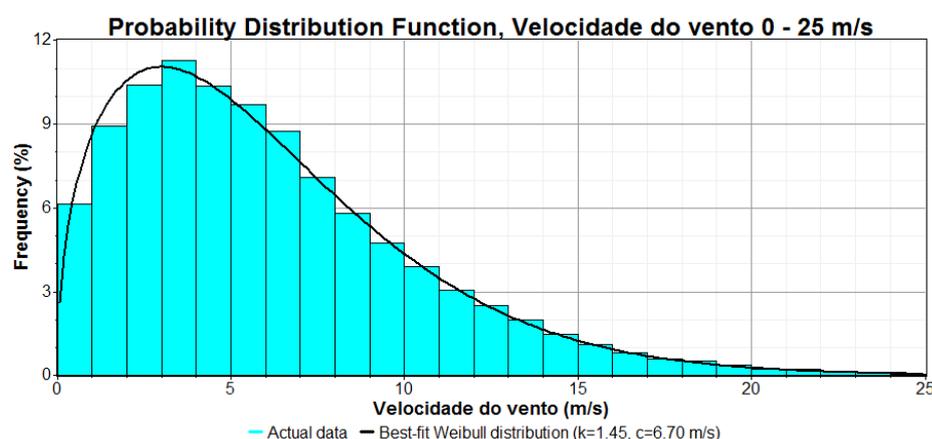


Figura 6.11 - Histograma das velocidades do vento e levantamento dos parâmetros da curva de distribuição de Weibull. Registros de 1994 a 2006 na EACF.

Para avaliar o perfil sazonal dos ventos na EACF, foram levantados as distribuições e os parâmetros k e c referentes a cada mês do ano. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 6.12 e na Tabela 6.3. Os parâmetros apresentados pela Tabela 6.3 resumem o potencial eólico da região da EACF e podem servir como referência para simulações de turbinas eólicas.

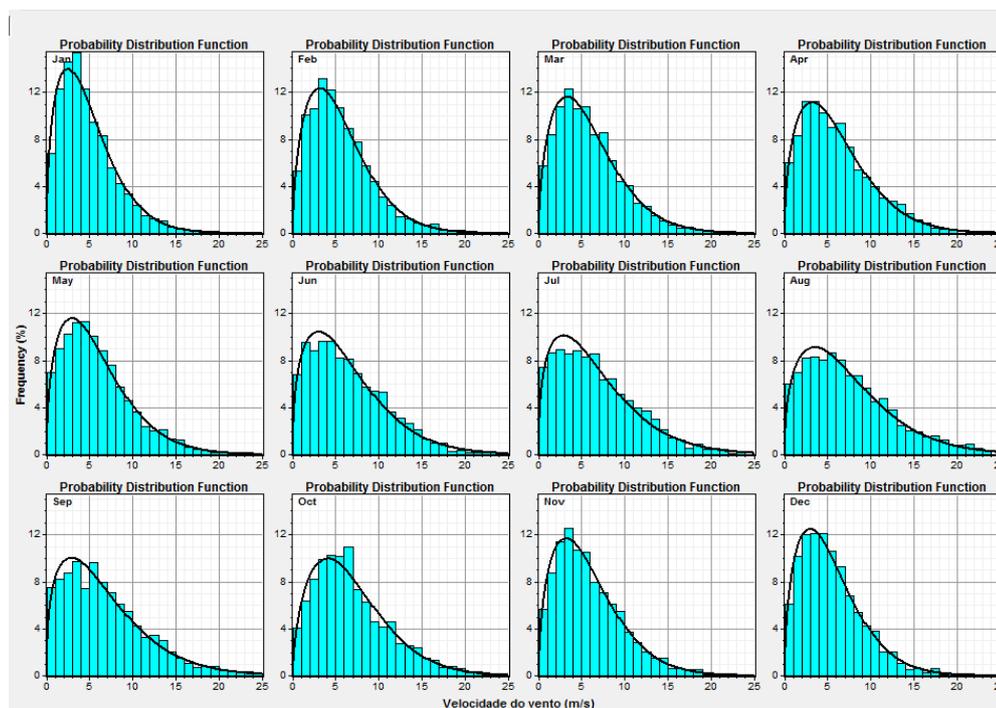


Figura 6.12 – Características das distribuições das velocidades do ventos e curvas de Weibull para todos os meses do ano, na região da EACF, no período de 1994 a 2006.

Tabela 6.3- Parâmetros da distribuição de Weibull na EACF, referente ao período de 1994 a 2006.

PERÍODO ANALISADO (1994 A 2006)	WEIBULL k	WEIBULL c [m/s]	DENSIDADE DO AR [kg/m ³]
Janeiro	1,47	5,34	1,25
Fevereiro	1,55	6,15	1,25
Março	1,53	6,52	1,26
Abril	1,49	6,71	1,27
Maio	1,46	6,44	1,28
Junho	1,41	7,11	1,29
Julho	1,38	7,30	1,30
Agosto	1,41	8,19	1,28
Setembro	1,37	7,42	1,29
Outubro	1,59	7,64	1,27
Novembro	1,52	6,44	1,26
Dezembro	1,51	6,01	1,26
TUDO O PERÍODO	1,45	6,72	1,27

Pela análise, observa-se que o parâmetro k situa-se em torno 1,45, variando em média entre 1,37 e 1,59. O parâmetro c situa-se em torno de 6,72 m/s, variando em média entre 5,34 m/s e 8,19 m/s. A densidade situa-se em torno de 1,27 kg/m³, variando em média entre 1,25 kg/m³ e 1,30 kg/m³.

Determinação do potencial eólico:

Para análise do potencial eólico disponível, utiliza-se comumente uma notação de potência do vento por metro quadrado de área interceptada (W/m^2). A densidade de potência refere-se potência que é ofertada pelo vento por unidade de área interceptada. Dessa forma, pode-se obter a potência que irá incidir sobre uma dada turbina eólica em função da área do coberta pelo seu rotor (PATEL, 1999).

A Figura 6.13 apresenta a densidade de potência mensal na EACF, considerando registros de velocidades dos ventos, temperaturas e pressão atmosférica, referentes ao período de 1994 a 2006. A densidade de potência média anual calculada foi de $398,4 \text{ W/m}^2$, os limites inferior e superior foram, respectivamente, $194,4 \text{ W/m}^2$ e $760,3 \text{ W/m}^2$.

O maior potencial situa-se entre os meses de junho e outubro, da mesma forma que as maiores intensidades médias dos ventos; porém, observa-se que apesar da velocidade média dos ventos aumentar de setembro para outubro, a densidade de potência diminuiu. Esse comportamento é explicado pelo efeito da mudança de 1,37 para 1,59 do fator k e de influências da temperatura e pressão atmosférica na densidade do ar, entre os meses de setembro e outubro.

Densidade de potência e velocidade média mensal na EACF (1994 a 2006)

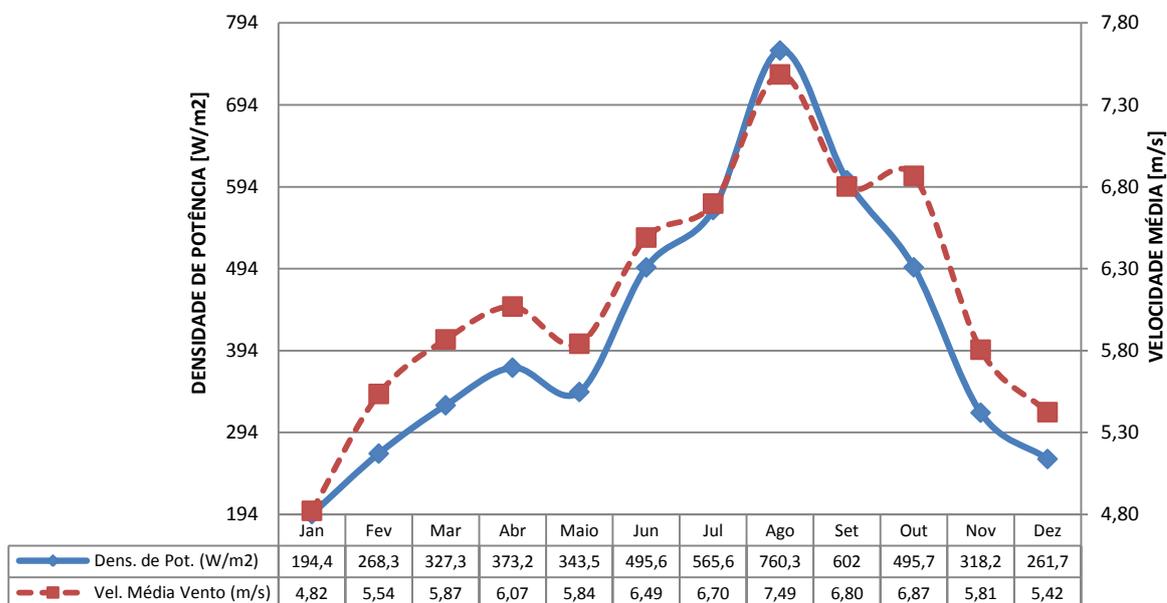


Figura 6.13 - Velocidade do vento e densidade média de potência mensal na EACF, 1994 a 2006.

A Figura 6.14 apresenta de forma sobreposta a distribuição das frequências das velocidades dos ventos e a distribuição do potencial eólico por velocidade do vento, para o período 1994 a 2006 na EACF. É importante destacar que, apesar de maior parte dos ventos

situar-se em torno de 4 m/s, não é nesta velocidade de vento que se encontra a maior parcela do potencial eólico, uma vez que a potência eólica varia cubicamente com a velocidade do vento. Pela Figura 6.14 observa-se que as maiores parcelas de energia dos ventos situam-se em torno de 15 m/s e que ventos com velocidades de até 4 m/s constituem uma parcela inferior a 2% do potencial total. Para o cálculo da distribuição da densidade de energia por velocidades, mostrada na Figura 6.14, foi multiplicado o valor densidade de potência na velocidade média da faixa, pelas proporções de tempo em que os ventos se mantiveram dentro de cada uma das respectivas faixas de velocidade.

No entanto, somente parte desse potencial consegue ser efetivamente captado pelos aerogeradores. Cada turbina eólica possui um rendimento aerodinâmico característico em função do específico projeto das hélices. Além do rendimento aerodinâmico (η_a), atuam também no processo de captação do recurso eólico os rendimentos mecânico (η_m) e elétrico (η_e). O produto desses rendimentos determina o coeficiente de potência do aerogerador (C_p) e relaciona quanto da potência do vento consegue ser convertida pelo aerogerador (DELEITO, 1984) (PATEL, 1999).

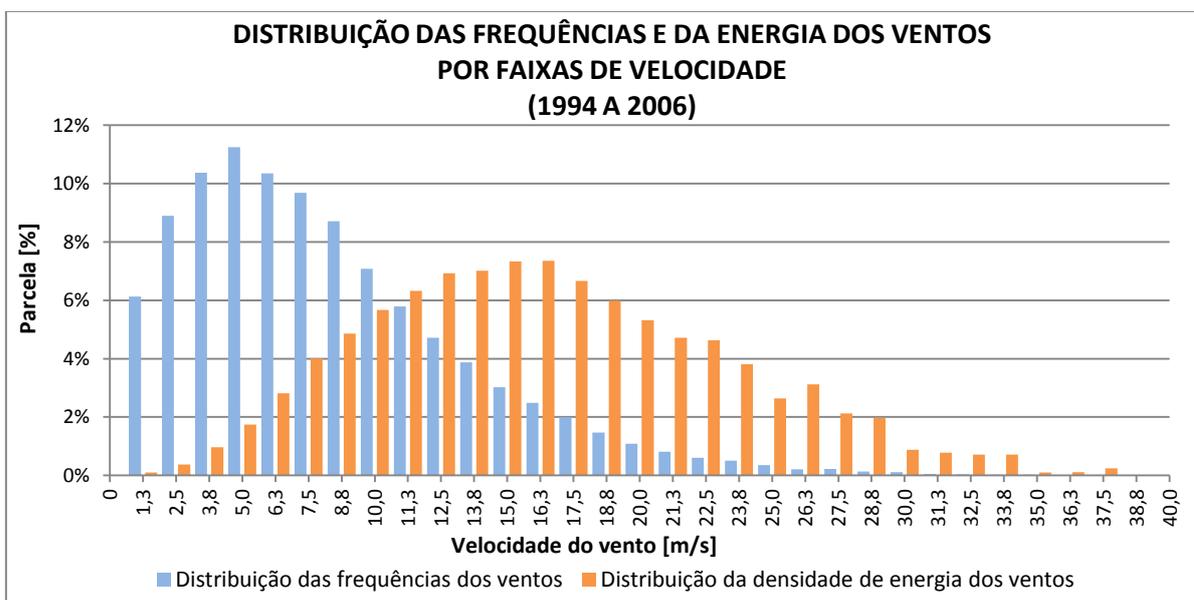


Figura 6.14 - Distribuição de velocidades e de densidade de energia dos ventos na EACF. Período de 1994 a 2006.

Buscando alcançar o máximo aproveitamento deste potencial eólico para a geração de energia elétrica, foram avaliados diversos aerogeradores entre os 184 modelos disponíveis no banco de dados do *WindoGrapher*. Das várias turbinas eólicas, foram escolhidos três com base na análise das curvas de potência, o já conhecido uso em regiões antárticas e suas diferentes capacidades. A escolha por diferentes capacidades de aerogeradores visa permitir a avaliação de desempenho tanto de soluções que contemplem várias turbinas eólicas de

pequeno porte quanto a opção por um projeto que contemple apenas uma turbina de grande porte. A Figura 6.15 apresenta de forma normalizada as curvas de potências dos aerogeradores Proven 15 (15 kWp), Endurance G-3120 (35 kWp) e ENERCON E-33 (330 kWp), fabricadas respectivamente pelas empresas *Proven Energy* (absorvida pela *Kingspan Wind*), *Endurance Wind Power* e ENERCON. A unidade de potência kWp refere-se a máxima potência alcançada pelo equipamento quando o mesmo é operado sob condições nominais de projeto.

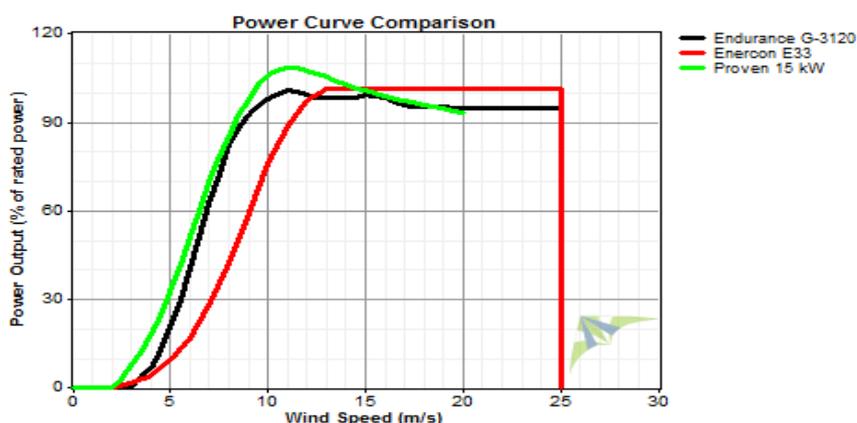


Figura 6.15 - Curvas de potência dos aerogeradores Endurance G-3120, Enercon E33 e Proven 15kw.

Para obtenção dos dados de desempenho dos três aerogeradores, foram consideradas perdas referentes às paradas para manutenção (6%), interferência entre turbina (5%), congelamento nas hélices (4%) e perdas nos sistemas de conversão e transmissão de energia (4%). Dessa forma, o total de perdas consideradas foi de 17,7%. Esses são os valores padrões considerados pelo WindoGrapher, mas os mesmos podem ser alterados.

A rugosidade média de superfície considerada foi 0,013m, valor superior ao padrão para superfícies puramente com neve (0,003), uma vez que a Estação situa-se em região de maior relevo e o derretimento da neve é frequente no verão.

A Tabela 6.4 apresenta o desempenho dos três aerogeradores com base nos dados dos anos de 1994 a 2006 e destaca em verde ou em vermelho, respectivamente os melhores e piores índices de desempenho obtidos entre os três modelos.

O maior tempo de operação em potência nominal e o maior fator de capacidade foram alcançados pela turbina eólica Proven 15 cuja curva de potência apresenta o maior percentual de produção de energia, dentre as três turbinas, para ventos de até 14 m/s, faixa onde encontra-se cerca de 90% dos ventos e 40% de todo o potencial eólico disponível (vide Figura 6.14). A turbina Endurance G-3120, apesar de ter obtido um fator de capacidade semelhante a turbina Proven 15, foi a que apresentou o maior tempo de inoperância (21,73%), cerca de 790 horas (33dias) a mais por ano do que a Enercon E33.

Tabela 6.4 - Desempenho anual de diferentes modelos de turbinas eólicas, considerando as características dos ventos da EACF.

Aerogerador	Altura do rotor	Velocidade do vento na altura do rotor	Tempo com produção zero	Tempo com produção nominal	Potência média produzida	Energia média produzida	Fator de capacidade
	[m]	[m/s]	[%]	[%]	[kW]	[kWh/ano]	[%]
Proven 15 (15kWp)	15	6,46	15,16	21,72	6.1	53.713	40,9
Endurance G-3120 (35kWp)	30,5	7,13	21,73	17,53	14.1	123.333	40,2
Enercon E33 (330kWp)	36	7,30	12,72	14,31	101.3	887.372	30,7

Esses resultados reforçam a importância da análise detalhada das características dos aerogeradores para o melhor aproveitamento do recurso, pois matrizes eólicas de mesma potência podem apresentar diferentes desempenhos a depender do perfil eólico e curva característica das turbinas. Dessa forma, para a melhor aplicação de aerogeradores torna-se essencial considerar a distribuição Weibull dos ventos locais, a curva de potência da turbina, além de variações de temperatura e pressão.

Sabendo que grupos motogeradores semelhantes ao que eram utilizados na EACF geram 3,69kWh por litro de *diesel* queimado (CUMMINSPOWER, 2008), calcula-se a redução anual em litros de combustível possível de ser alcançado com a inclusão de cada uma das três turbinas eólicas em análise. A Tabela 6.5 apresenta o equivalente em *diesel* necessário para um motogerador gerar a mesma quantidade de energia produzida por cada um dos três aerogeradores.

Tabela 6.5 - Volume anual de óleo *diesel* economizado para diferentes modelos de turbinas, considerando as características dos ventos da EACF.

TURBINA EÓLICA	LITROS DE DIESEL ECONOMIZADOS POR ANO POR TURBINA INSTALADA	LITROS DE DIESEL ECONOMIZADOS POR ANO POR kWp INSTALADO
Proven P15 (15kWp)	14.553	970
Endurance G-3120 (35kWp)	33.423	955
Enercon E33 (330kWp)	240.480	729

Para visualizar o caso em que a potência eólica instalada é superior à demanda da Estação, foi simulada uma turbina ENERCON E33, considerando os dados de intensidade dos ventos, temperatura e pressão, referentes ao mês de janeiro de 2010. O mês de janeiro foi

escolhido para essa simulação por ser o mês em que ocorrem as menores velocidades médias dos ventos. O resultado gráfico é apresentado na Figura 6.16 de forma sobreposta ao consumo energético médio da EACF em janeiro de 2011 (133 kW).

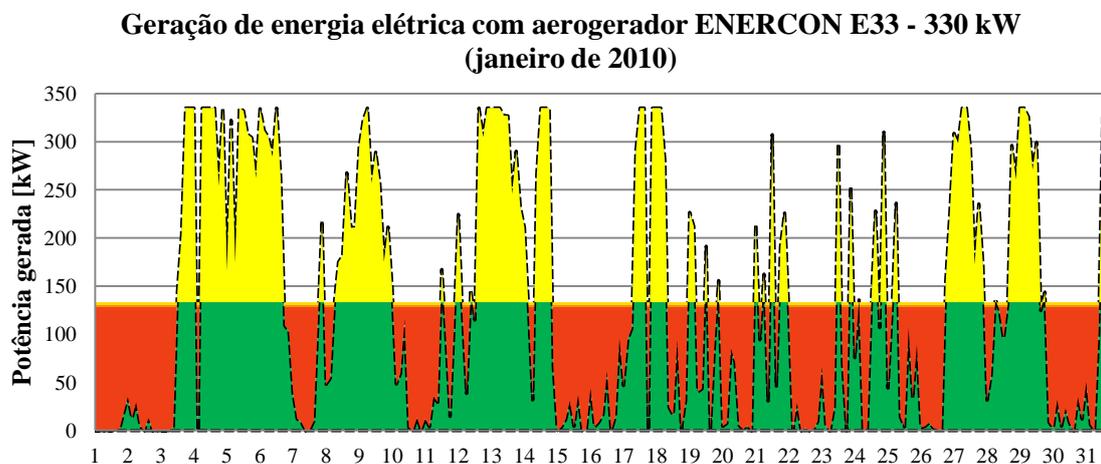


Figura 6.16 – Geração de energia eólica, referente a janeiro de 2010. Em amarelo: excedente produzido. Em verde: energia eólica diretamente consumida. Em vermelho: geração complementar necessária.

A linha tracejada no gráfico da Figura 6.16 indica a potência que o aerogerador é capaz de gerar. A área em verde representa a parcela de energia eólica que seria diretamente consumida pela Estação, a área em amarelo representa o excedente de energia eólica e o preenchimento em vermelho representa energia complementar que deveria ser fornecida por outra fonte para atender as necessidades de consumo da Estação. A Figura 6.16 mostra que a capacidade geração eólica é em alguns momentos superior à capacidade de consumo e em outros, inferior. Esse fato reflete a necessidade de geração complementar de energia, mesmo com a especificação de um aerogerador de capacidade superior ao consumo da Estação. Nesse caso, para o aproveitamento máximo da energia gerada, faz-se necessário a utilização de acumuladores de energia. Os indicadores de desempenho para o caso simulado na Figura 6.16, constam na Tabela 6.6.

Considerando um consumo aproximado 100 MWh no mês de janeiro (aproximado por aferições realizadas em janeiro de 2011), o uso do aerogerador E33 refletiria numa redução máxima teórica de 76,7% no consumo de óleo *diesel* para o referido mês.

Tabela 6.6 – Indicadores de desempenho para uso do aerogerador Enercon E33. Referente a janeiro de 2010.

Aerogerador	Altura do rotor	Velocidade do vento na altura do rotor	Tempo com produção zero	Tempo com produção nominal	Potência média produzida	Energia média produzida	Fator de capacidade
	[m]	[m/s]	[%]	[%]	[kW]	[kWh]	[%]
Enercon E33	36	7,21	10,48	9,68	105,1	76.704	31.8

6.3.2. Potencial Solar Fotovoltaico

A incidência solar na região da EACF varia significativamente entre os períodos de inverno e verão devido à localização geográfica (latitude:62°05'Sul, longitude:58°23'Oeste). No período de inverno as noites são mais longas, a acumulação de neve é intensificada e a velocidade média dos ventos é maior. Já no verão os dias são mais longos, o acúmulo de neve é menor e a velocidade dos ventos também é menor (CPTEC-INPE, 2010).

A Figura 6.17 mostra a Radiação Global Horizontal e índice de claridade atmosférica, na região da EACF com base em dados da NASA SSE (2011). Os valores numéricos são apresentados na Tabela 6.7.

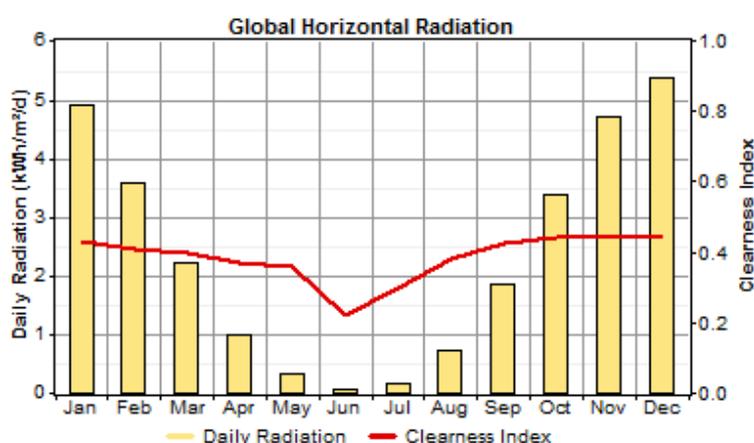


Figura 6.17 - Radiação Global horizontal e índice de claridade para a região da EACF (NASA, 2011).

Tabela 6.7 - Radiação global horizontal e índice de claridade para a região da EACF (NASA, 2011).

Mês	Índice de claridade	Radiação kWh/m ² /d
Jan	0,432	4,89
Fev	0,408	3,59
Mar	0,399	2,23
Abr	0,369	0,99
Maio	0,359	0,34
Jun	0,222	0,08
Jul	0,296	0,18
Ago	0,381	0,72
Sep	0,427	1,87
Out	0,442	3,38
Nov	0,442	4,70
Dez	0,443	5,37

A curva vermelha representada no gráfico da Figura 6.17 é chamada de índice de claridade (*clearness index*) e corresponde à fração da radiação solar extraterrestre que é possível de ser transmitida através da atmosfera até a superfície da terra. A Radiação Global Horizontal, também chamada de radiação solar total, é a soma das radiações direta sobre o painel, radiação horizontal difusa e radiação refletida do solo. Nesse caso, considera-se a superfície de medição na posição horizontal, ângulo de inclinação zero.

A Figura 6.18 apresenta as curvas diárias de radiação para os doze meses do ano. No verão, existe radiação horizontal apreciável aproximadamente 18 horas por dia, podendo chegar a 19 horas e 48 minutos de duração no solstício de verão; no entanto, no inverno, a radiação reduz sua intensidade e duração, chegando a 5 horas e 7 minutos (CPTEC-INPE, 2010).

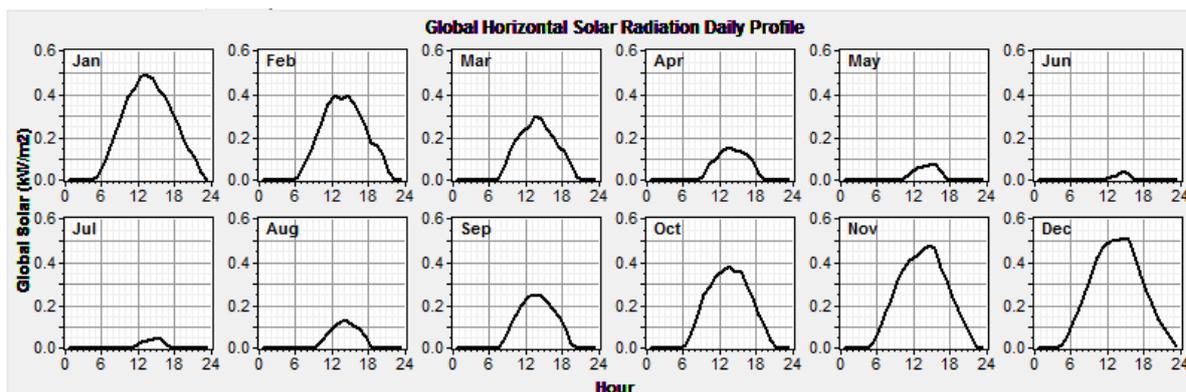


Figura 6.18 – Perfil anual por hora da radiação solar global horizontal na região da EACF (NASA, 2011).

Para maximizar a captação da radiação solar, faz-se necessário o correto posicionamento do painel em relação a posição do sol. Esse posicionamento é realizado pelo ajuste dos ângulos de azimute e de inclinação do painel. No campo da energia solar, o Sul é referido geralmente como 0° . O símbolo negativo é atribuído aos ângulos orientados a Leste e o símbolo positivo aos ângulos orientados a Oeste (ALTENER-GREENPRO, 2004). A Figura 6.19 exemplifica os ângulos de inclinação e azimute para um dado posicionamento do painel solar.

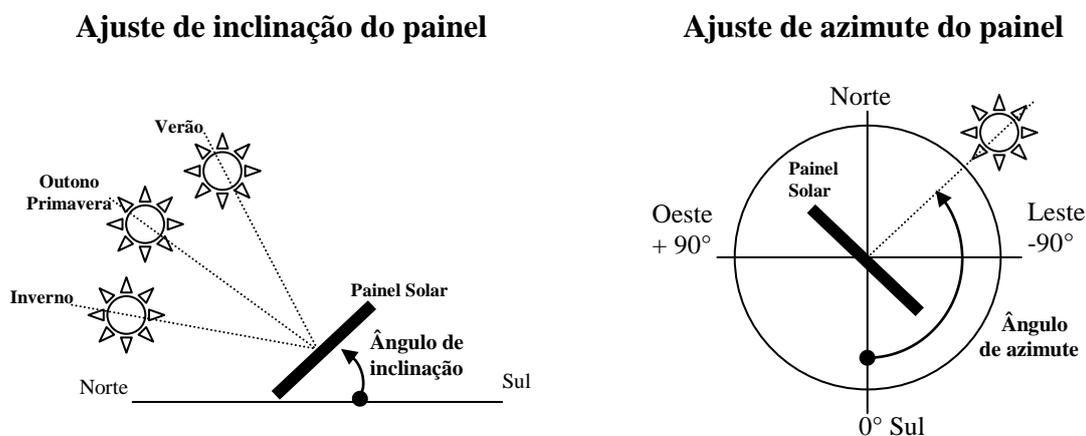


Figura 6.19 - Exemplificação dos ângulos de inclinação e azimute para posicionamento de painéis solares.

Em Regiões de clima extremo como a Antártica, além do posicionamento solar, faz-se necessário considerar as influências da temperatura e albedo (refletividade do solo), isso por que temperaturas mais baixas elevam a potência que pode ser entregue pelas células fotovoltaicas e a neve sobre o solo pode elevar o albedo a valores acima de 70% (ALTENER-GREENPRO, 2004), (LAINE, 2007). Dessa forma, considerando os valores de temperaturas médias mensais, albedo de 70% e fator de redução da geração por condições adversas (deposição de neve e sombreamento), foram avaliadas quatro técnicas de posicionamento:

- Painel com posicionamento fixo;
- Painel com azimute fixo e rastreamento de inclinação ótima;
- Sistema com inclinação fixa e rastreamento de azimute ótimo;
- Painel com rastreamento de posição ótima.

Para as análises foi utilizado o *software* HOMER, dados de radiação solar anual da NASA SSE e temperaturas médias mensais da EACF registradas ao longo de 26 anos pelo INPE. As análises consideraram por conveniência uma potência instalada de 1 kWp, o equivalente a 3 painéis marca SunPower, modelo E20 de 327 Wp, que tem eficiência 20,1% e coeficiente de variação de potência igual a $-0,38\%/^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, obteve-se diretamente os valores de desempenho por kWp instalado.

Sistema de posicionamento fixo:

Para a avaliação do sistema com posicionamento fixo deve-se determinar o posicionamento que maximize a geração de energia anual. Dessa forma, foi realizado o cálculo da energia anual gerada para as diversas possibilidades de azimute e inclinação. O resultado gráfico é mostrado na Figura 6.20.

Para albedo de 70%, a máxima produção anual de energia situa-se em torno de 950 kWh/ano para cada 1 kWp instalado (3 painéis E20-327 Wp). Os ângulos ótimos encontrados foram azimute de 180° e inclinação de 60° .

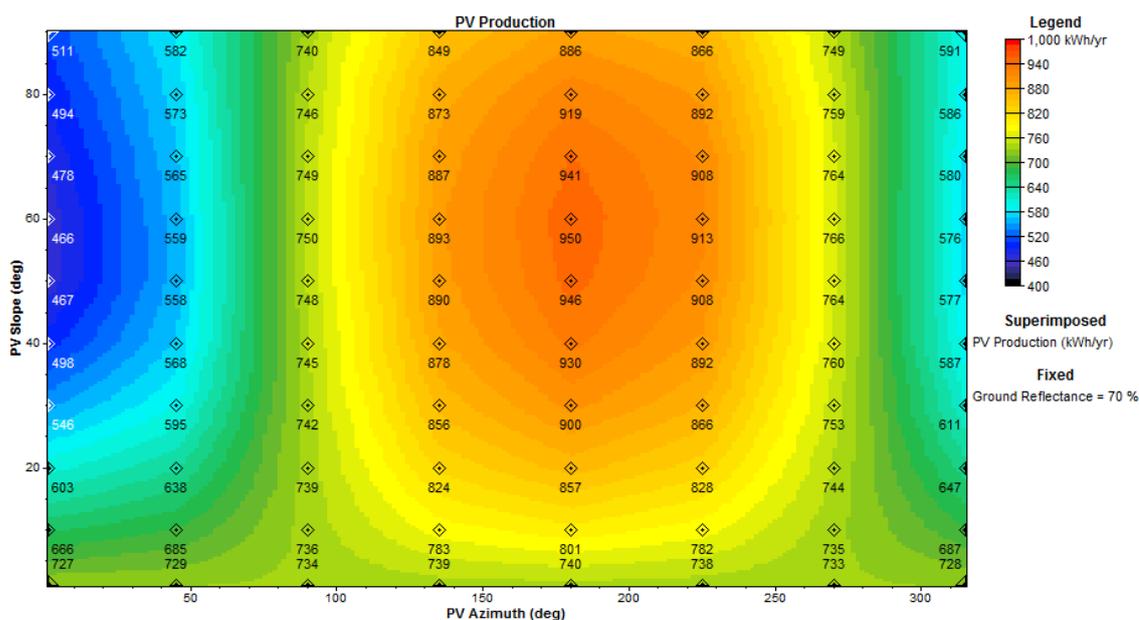


Figura 6.20 – Energia anual produzida pelo painel solar em função do posicionamento.

Pela Figura 6.20 constata-se que, para a técnica de posicionamento fixo, é possível a instalação dos painéis em ângulos de inclinação superiores a 60° sem grande redução da

produção anual de energia, quando o albedo for de 70% ou superior. Este fato sugere que a instalação dos painéis solares pode ser feita na vertical, em paredes externas das edificações, sem decréscimos significativos na produção anual de energia.

A Figura 6.21 apresenta a relação do albedo e do ângulo de inclinação, com a energia anual produzida pelos painéis. Nela, estão circulados valores de energia referentes às situações de albedo igual 20% e albedo igual a 70%, para o caso de reposicionamento do painel a 80°. Consta-se que o albedo tem influência considerável na inclinação ótima anual do painel. No caso de albedos superiores a 70%, as reduções na energia anual produzida em função do reposicionamento da inclinação para 80° são inferiores a 3,3% em relação à inclinação ótima. Já para albedos inferiores a 20%, a redução pode ultrapassar 13%.

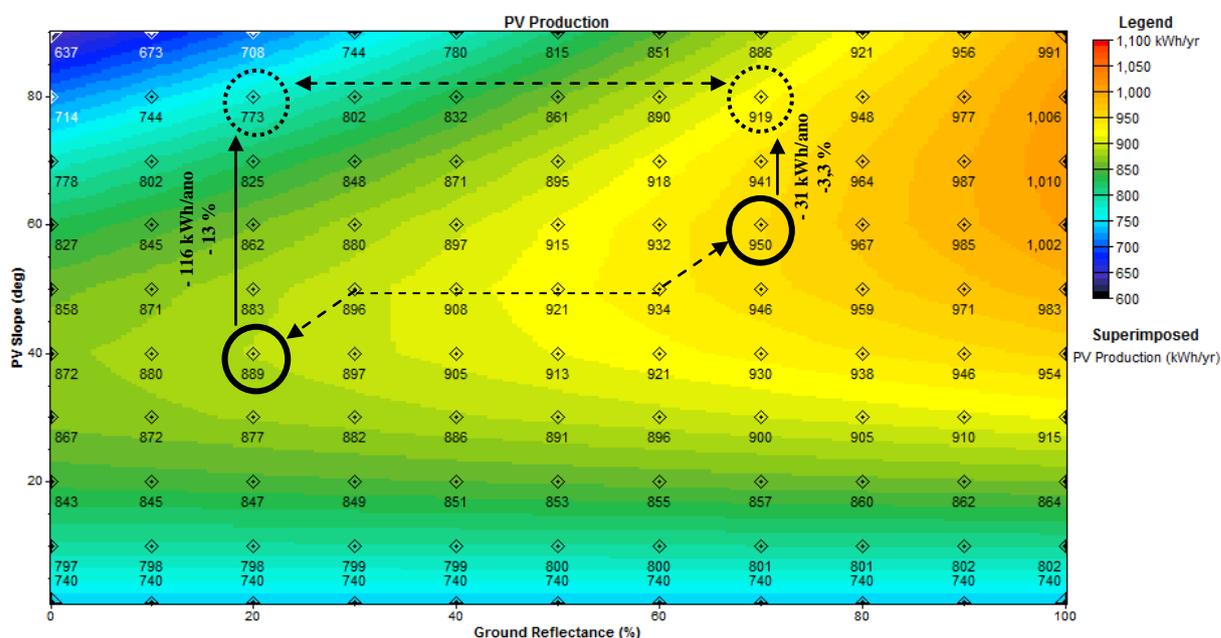


Figura 6.21 – Influência da refletividade do solo na inclinação ideal do painel solar.

Essa característica reforça a possibilidade de instalação de painéis solares em paredes externas da Estação e de módulos em regiões de elevados albedos, isso garante maior robustez estrutural e minimiza a chance de deposição de neve sobre os painéis.

Para avaliar a disponibilidade energética sazonal para a inclinação ótima (60°) e para albedo de 70%, é apresentada na Figura 6.22 a potência de saída dos painéis por hora ao longo de um ano. Observa-se que, no verão, a maior disponibilidade ocorre entre as 9 horas da manhã e 18 horas da tarde, já no inverno, o sistema opera em média apenas 3 horas por dia.

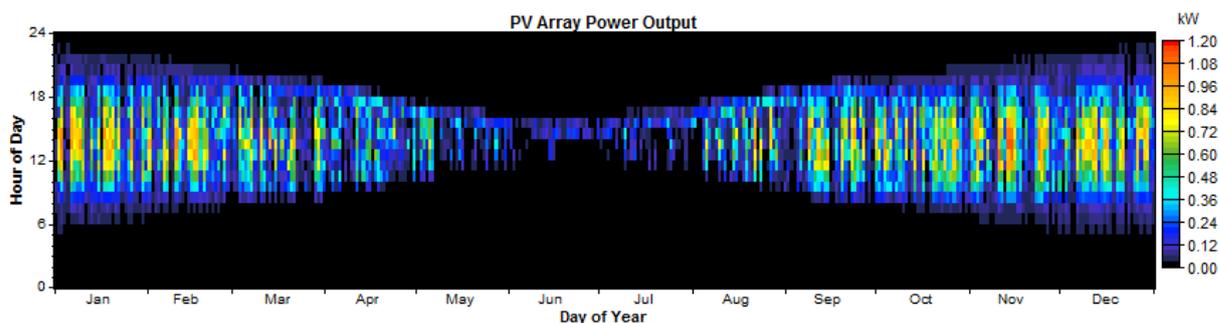


Figura 6.22 – Potência produzida pelo painel solar para posicionamento fixo, albedo a 70%, inclinação a 60°, azimute a 180°.

A Figura 6.23 apresenta os valores médios, máximos e mínimos das potências referentes à Figura 6.22. A potência média mensal manteve-se em torno de 20% da capacidade instalada apenas para os meses de novembro, dezembro e janeiro; nos demais meses, os valores foram inferiores. Na Figura 6.23 podem ser observados valores máximos de potência gerada, superiores a 1 kW (potência nominal do sistema solar simulado), esse fato é reflexo da influência positiva das baixas temperaturas nos painéis (coeficiente de variação de potência negativo, $-0,38\%/^{\circ}\text{C}$) juntamente com situações de elevada exposição à radiação solar.

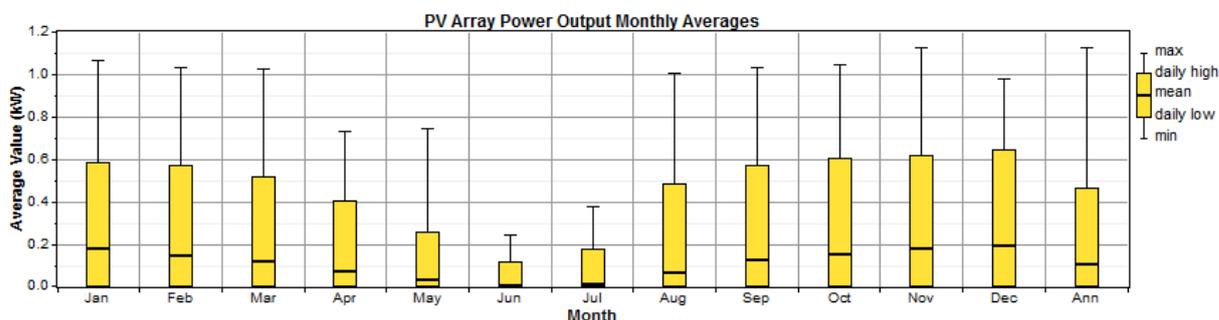


Figura 6.23 – Potências mensais médias, máximas e mínimas para posicionamento fixo, albedo a 70%, inclinação a 60°, azimute a 180°.

O fator de capacidade (relação entre a energia gerada e capacidade de geração do painel) para o posicionamento fixo a 60° de inclinação, 180° de azimute e albedo de 70%, foi de 10,8%.

Sistema de posicionamento com azimute de 180° e ajuste mensal de inclinação:

Para avaliação do sistema com azimute fixo e inclinação ajustável, foi simulado um sistema com azimute fixo em 180° e com correção mensal de inclinação ótima. Os ângulos obtidos variaram cerca de 10° a cada mês, tomando valores próximos a 40° no verão e a 85° no inverno. A Figura 6.24 apresenta o gráfico com os valores dos ângulos ótimos de inclinação para ajuste mensal, obtidos pelo HOMER.

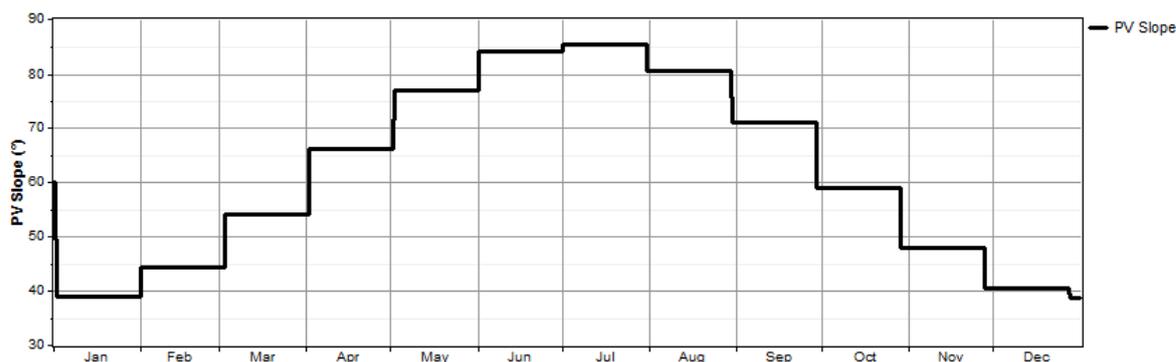


Figura 6.24 – Valores dos ângulos ótimos de inclinação para ajuste mensal, azimute fixo em 180° e albedo de 70%.

Para avaliar a disponibilidade energética do sistema ajustável no decorrer do ano, a Figura 6.25 apresenta a potência de saída dos painéis por hora ao longo de um ano. Nesse caso, é observado comportamento extremamente semelhante ao caso de posicionamento fixo.

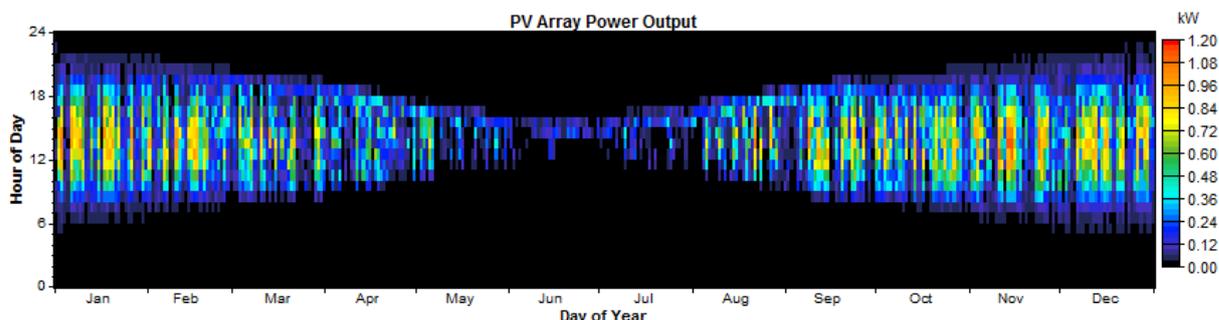


Figura 6.25 - Potência produzida pelo painel solar para albedo a 70%, azimute a 180° e ajuste mensal de inclinação.

A Figura 6.26 apresenta os valores médios, máximos e mínimos das potências geradas por mês pelos painéis ao longo de um ano na região da EACF, referente à da Figura 6.25. Pelo gráfico observa-se novamente extrema semelhança com o sistema fixo, com mínimos aumentos na potencia média mensal durante o verão.

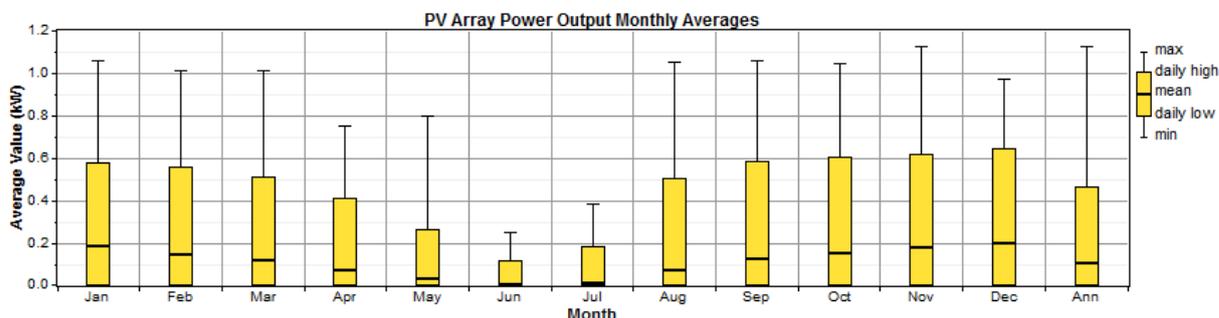


Figura 6.26 – Potências médias, máximas e mínimas produzidas pelo painel solar para albedo a 70%, azimute a 180° e ajuste mensal de inclinação.

O fator de capacidade para o posicionamento com ajuste mensal de inclinação, 180° de azimute e albedo de 70%, foi de 11%.

Sistema com inclinação fixa e rastreamento de azimute ótimo (semirrastreado):

Esta técnica consiste em manter uma inclinação fixa e permitir ao sistema o rastreamento do azimute ótimo. Dessa forma, o painel gira a cada dia, acompanhando o sol.

O sistema foi simulado para inclinação fixa de 60° sendo obtido o gráfico anual de potência do painel, mostrado na Figura 6.27. Pelo gráfico, nota-se uma maior geração e disponibilidade energética, quando comparado às técnicas de posicionamento fixo e inclinação ajustável. A disponibilidade energética é significativamente maior e ainda mais notável no período do verão. No verão, o sistema com azimute rastreado disponibiliza energia desde 6 horas da manhã até às 23 horas, cerca de 8 horas a mais que o sistema fixo de painéis.

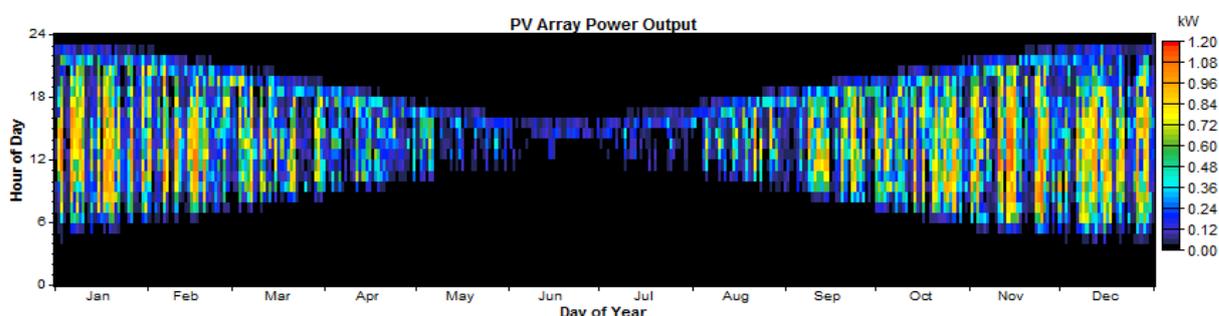


Figura 6.27 - Potência produzida pelo painel solar para posicionamento com albedo a 70%, inclinação 60° e rastreamento e azimute ótimo.

A Figura 6.28 apresenta os valores médios, máximos e mínimos das potências geradas por mês pelos painéis ao longo de um ano na região da EACF, considerando o posicionamento semirrastreado da Figura 6.27. Nos meses de verão as potências médias situaram-se em torno de 25% da capacidade instalada. Dessa forma, observa-se que o reajuste contínuo do azimute assume influência significativa para o ganho de desempenho da situação estudada.

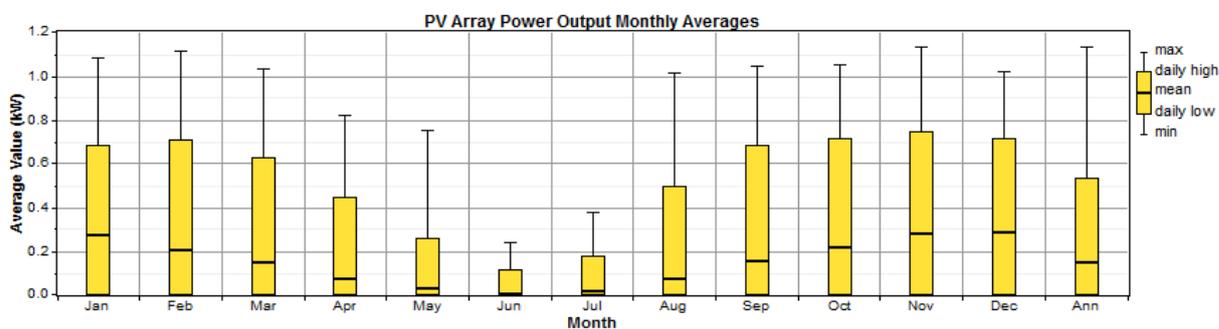


Figura 6.28 - Potências médias, máximas e mínimas produzidas pelo painel solar para albedo a 70%, inclinação 60° e rastreamento de azimute ótimo.

O fator de capacidade para o posicionamento com azimute rastreado, inclinação de 60° e albedo de 70%, foi de 14,8%.

Sistema com rastreamento de posição ótima:

Para avaliação do caso ótimo, foi simulado um sistema com rastreamento contínuo dos ângulos de inclinação e azimute ideais para máxima captação. A Figura 6.29 apresenta o gráfico da potência horária gerada pelo sistema ao longo de um ano.

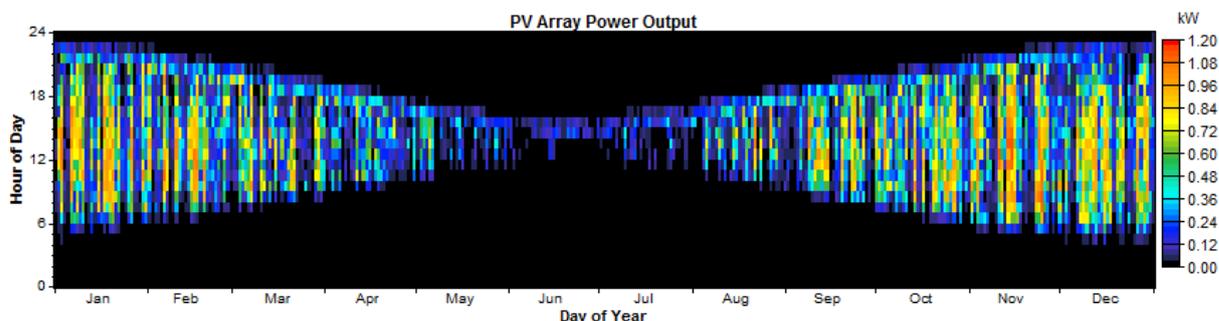


Figura 6.29 - Potência produzida pelo painel solar para posicionamento com rastreamento de posição ótima e albedo de 70%.

Pelo gráfico, observa-se um comportamento semelhante ao resultado obtido pelo sistema com rastreamento apenas de azimute. Isso se deve à maior influência ocasionada pelo ajuste de azimute (comum às duas técnicas), comparada à influência causada pelo ajuste de inclinação - esse comportamento é típico de regiões polares. Nesses casos, a amplitude de ajuste do azimute será extensa, podendo chegar a realizar rotações diárias de 360 graus no verão; já o reajuste da inclinação será mínimo.

A Figura 6.30 apresenta o gráfico das potências médias, máximas e mínimas mensais, ocorridas para o sistema com rastreamento, referente à Figura 6.29. O resultado foi semelhante ao do sistema semi-rastreado.

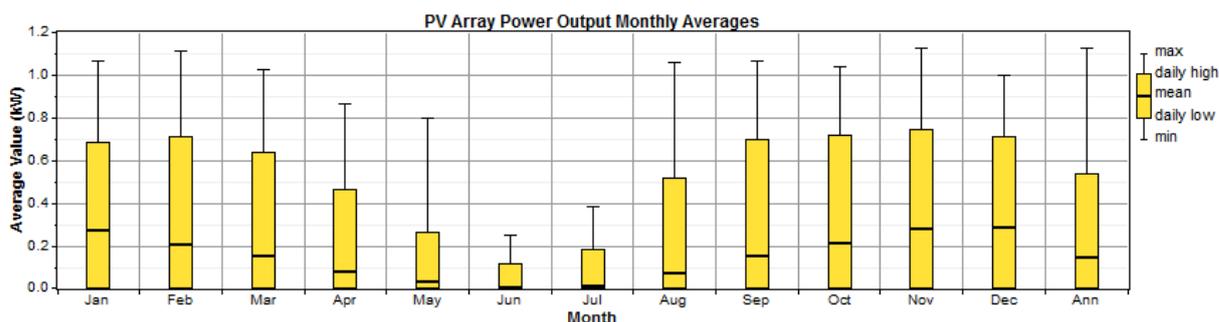


Figura 6.30 - Potências médias, máximas e mínimas produzidas pelo painel solar para rastreamento de posição ótima e albedo a 70%.

O fator de capacidade para o sistema com rastreamento de azimute e inclinação, e albedo de 70%, foi de 14,9%.

Comparativo de desempenho das técnicas de posicionamento:

Para melhor comparação entre as quatro técnicas de posicionamento, foram tabelados os valores de fator de capacidade, energia anual gerada e equivalência em redução no consumo de combustível nos geradores. A Tabela 6.8 apresenta os dados descritos, considerando o consumo de 0,27 litros de óleo *diesel* para cada 1 kWh gerado pelo motogerador da EACF (CUMMINSPOWER, 2008).

Tabela 6.8 – Quadro comparativo de desempenho de diferentes técnicas de posicionamento de painéis solares.

Simulação no HOMER para cada 1kWp instalado (Painel SunPower E20)			
Técnica de posicionamento	Fator de Capacidade [%]	Energia anual gerada [kWh/ano]	Redução anual no consumo dos Geradores [L/ano]
Fixo: Azimute = 180° e Inclinação = 60°	10,8	950	257,3
Ajuste mensal: Azimute=180° e Inclinação ajustável	11	962	260,5
Semirrastreado: Azimute rastreado e Inclinação = 60°	14,8	1296	351,0
Rastreado: Azimute e inclinação	14,9	1309	354,5

Os fatores de capacidade indicam desempenhos semelhantes para as técnicas de posicionamento fixo e com ajuste mensal de inclinação. Esse fato induz ao descarte da técnica de ajuste mensal de inclinação para uso na região da EACF.

As técnicas que apresentaram melhor desempenho dentre os casos simulados foram os sistemas totalmente rastreado e o semirrastreado. Nesses casos o fator de capacidade alcançado foi 38% superior ao do posicionamento fixo. No entanto, as fortes rajadas de vento característicos da região são fatores dificultadores para a segura implantação das soluções com rastreamento.

A possibilidade de instalação em posições, quase verticais, em situações de elevados albedos apresenta-se como uma alternativa interessante, uma vez que a fixação dos painéis pode ser feita em superfícies externas das construções, direcionadas para o norte.

6.4. Comparativo dos recursos renováveis

A Tabela 6.9 e Figura 6.31 apresentam as quantidades anuais de combustível possíveis de serem economizadas por kWp renovável instalado na EACF. Esses indicadores são válidos considerando que toda a energia gerada pelos sistemas eólico e solar estará sendo absorvida pela Estação, e que não haja sistemas de cogeração.

Conforme mostra a Tabela 6.9, o fator de capacidade do sistema de geração eólica é 2,74 vezes superior ao do sistema solar. Essa significativa diferença se dá principalmente pelo fato da menor incidência solar recebida em regiões polares, baixa incidência solar, enquanto que a oferta de recurso eólico é farta durante todo o ano.

Tabela 6.9 - Economia anual de óleo *diesel* esperada na EACF por kWp renovável instalado, considerando *diesel* geradores sem cogeração.

SISTEMA (sem cogeração)	ECONOMIA ANUAL DE <i>DIESEL</i> NA EACF POR kWp INSTALADO [litros/kWp]
Eólico (Para fator de capacidade 40,9%)	970
Solar rastreado (Para fator de capacidade 14,9%)	354

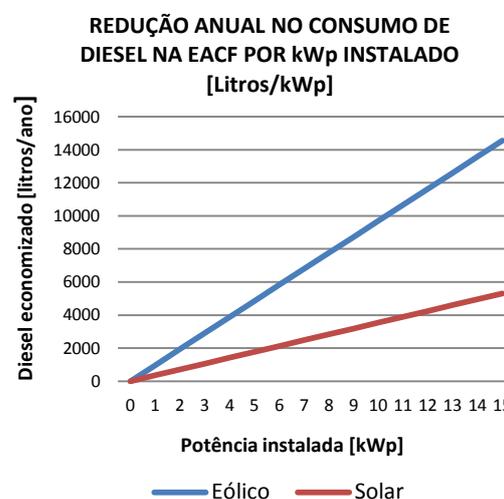


Figura 6.31 – Curvas de economia anual de óleo *diesel* esperada na EACF por kWp renovável instalado, considerando *diesel* geradores sem cogeração.

No Capítulo seguinte serão abordados os casos de matrizes energéticas híbridas com cogeração em que a Potência Renovável Instalada se aproxime ou ultrapasse a Demanda Média da Estação – situações nas quais as curvas da Figura 6.31, não serão válidas.

6.5. Conclusões

A utilização de digestores anaeróbios e a cogeração no incinerador mostraram-se alternativas interessantes do ponto de vista ambiental, porém, energeticamente sugerem baixo potencial para redução de consumo de combustíveis. O uso de cogeração e turbinas eólicas na EACF mostram-se como as soluções mais atrativas do ponto de vista energético, para a redução no consumo de combustíveis.

Na EACF, como a oferta térmica nos geradores é maior que a demanda térmica da Estação, é possível a redução de 65.000 litros/ano com o adequado projeto de cogeração e ainda uso do excedente para promover o aquecimento da rede hidráulica até os lagos.

Quanto à energia eólica, uma turbina de 15 kWp já é capaz de gerar uma redução de aproximadamente 14.500 litros/ano de óleo *diesel*. O fator de capacidade alcançado foi de 40,9% com uma turbina Proven 15 kW.

Para a tecnologia de geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, cada 1 kWp instalado, 3 painéis SunPower E20 327 Wp, proporcionariam uma redução de 354 litros/ano. O fator de capacidade alcançado foi de 14,9% para o posicionamento rastreado e de apenas 10,8 para o posicionamento fixo. Considerando ainda que condições climáticas desfavoráveis como fortes rajadas de ventos e deposição de neve elevam os riscos de inoperância dos painéis fotovoltaicos, o uso dessa tecnologia mostra-se atrativa para instalações nas paredes de módulos isolados, especialmente durante o período de verão.

Capítulo 7: Proposta de matriz energética para a EACF

7.1. Introdução

Conhecidos a infraestrutura, o perfil de consumo da EACF e seus potenciais energéticos, parte-se para a análise das possíveis composições de matrizes energéticas visando à máxima segurança, adequação logística e o mínimo impacto ambiental. Para isso, o estudo foi desenvolvido passando pelas seguintes etapas:

- Seleção e inserção de dados na ferramenta de simulação e avaliação de coerência do modelo;
- Simulação de matrizes híbridas e análise de desempenho;
- Definição de critérios para avaliação das matrizes híbridas;
- Proposta de matriz energética para a EACF e análise de desempenho.

O estudo terá enfoque técnico de análise de desempenho. Os indicadores financeiros podem ser obtidos considerando como unidade monetária o litro de combustível.

7.2. Inserção dos dados no modelo de simulação

Para a simulação e análise de desempenho das matrizes híbridas, foi utilizado o *software* HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), do Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL-*National Renewable Energy Laboratory*) (HOMER ENERGY, 2011). Este *software* consiste em um modelo computacional para análise e otimização de matrizes de energias renováveis e permite, entre outras funções, comparar o desempenho de diferentes composições de matrizes híbridas.

Para a simulação de matrizes energéticas no HOMER, é necessário a inserção de dados específicos de perfil de consumo, perfil dos recursos disponíveis e características técnicas das tecnologias escolhidas para geração de energia. Dessa forma, foi inserido no HOMER os dados de consumo de energia elétrica e térmica da EACF referentes ao ano de 2011, especificações dos motogeradores e caldeiras, perfis dos recursos eólico e recurso solar, e as temperaturas médias mensais.

O perfil de consumo energético da EACF foi calculado com base nos volumes diários de combustíveis utilizados para a geração de energia elétrica e calefação, presentes na planilha de controle de combustíveis da EACF de 2011, disponibilizada pela Marinha do Brasil (MB, 2011). A potência elétrica consumida foi calculada cruzando-se os volumes diários de *diesel* consumidos pelo motogeradores com curva característica de consumo de combustível dos geradores Cummins C200-D6 (CUMMINSPOWER, 2008). A potência

térmica média diária consumida foi calculada com base no consumo de *diesel* nas caldeiras, considerando uma eficiência de 90% (LORA e NASCIMENTO, 2004) e poder calorífico padrão do *diesel* sugerido pelo HOMER (43,2 MJ/kg e densidade igual a 0,82 kg/litro). A Figura 7.1 apresenta graficamente o perfil de consumo elétrico e térmico da Estação referentes a 2011, calculados conforme metodologia descrita.

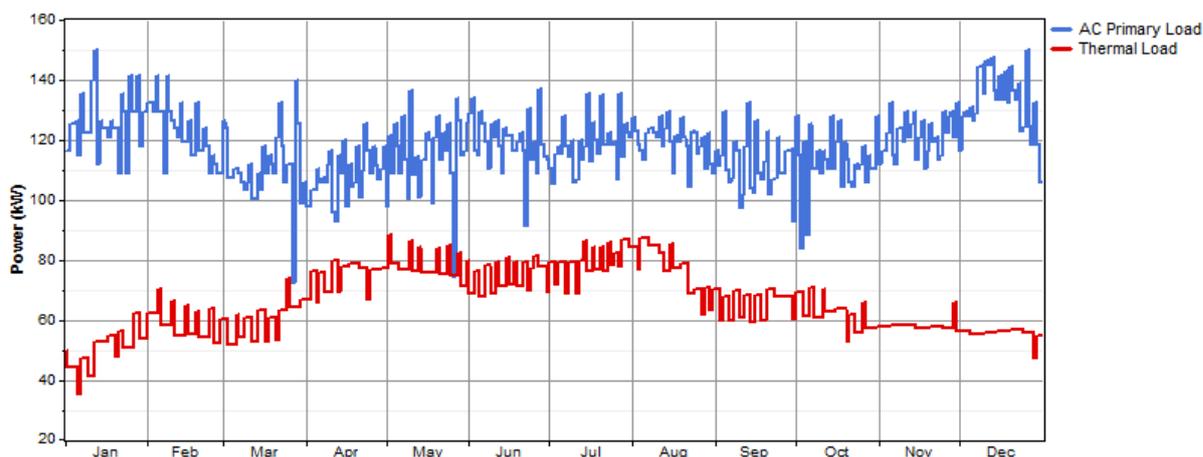


Figura 7.1 - Perfil de consumo de energia elétrica e térmica na EACF em 2011. Calculado com base em dados da Marinha do Brasil.

As especificações dos grupos motogeradores a *diesel* foi estabelecida de acordo com dados técnicos de potência e de consumo dos grupos Cummins C200-D6, Tabela 7.1. A curva de eficiência gerada pelo HOMER é apresentada na Figura 7.2 e indica o percentual de combustível que é transformado em eletricidade em função da potência solicitada ao gerador (percentual em relação à potência nominal).

Tabela 7.1 – Consumo de combustível do grupo motogerador Cummins C200-D6, em modo Prime (CUMMINSPower, 2008).

POTÊNCIA NOMINAL	240 kVA 192 kW			
CARGA APLICADA	100%	75%	50%	25%
CONSUMO (LITROS/HORA)	52	39	27	15

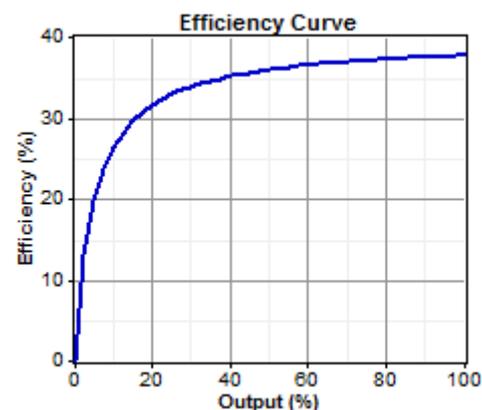


Figura 7.2 - Curva de eficiência do gerador C200-D6, gerada pelo HOMER, com base nos dados técnicos do motogerador.

Para simular o sistema de calefação e aquecimento de água, foi estabelecida uma caldeira com 90% de eficiência, baseada em valores médios apresentados por Lora & Nascimento (2004).

Para a simulação das matrizes híbridas, foram também inseridos os dados de recurso eólico e de temperaturas resultantes das análises dos registros do banco de dados do Projeto Meteorologia na Antártica (2010). As informações do recurso solar foram obtidas no banco de dados da NASA SSE (2011), a coordenada do ponto central da célula usada é 62° 30' S, 58° 30' W. Estes dados são os mesmos apresentados no Capítulo 6: Potenciais energéticos da EACF.

Para avaliar a consistência dos dados de entrada com o sistema em funcionamento na Estação no período estudado, foi simulado um sistema com quatro grupos motogeradores e uma caldeira alimentando as cargas elétrica e térmica calculada. A Tabela 7.2 apresenta a matriz energética simulada no HOMER e os resultados obtidos.

O consumo de óleo *diesel* obtido na simulação apresentou conformidade com os valores reais. O desvio foi de +2,3% em relação ao consumo real dos geradores (280.818 litros/ano) e -0,3% para as caldeiras. No total, o desvio foi de apenas +1,8%, aproximadamente 17 litros por dia.

Tabela 7.2 - Simulação da matriz energética da EACF no HOMER, com base nos dados de demanda energética do ano de 2011.

SISTEMA SIMULADO	CONSUMO DE <i>DIESEL</i> DOS GERADORES	CONSUMO DE <i>DIESEL</i> DA CALDEIRA
	287.383 litros/ano	65.449 litros/ano
	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA
	1.036.235 kWh/ano	579.620 kWh/ano

Apesar do desvio alcançado ser de apenas 1,8%, é importante ressaltar a influência das condições climáticas no rendimento dos motores a *diesel*. No caso, a redução da temperatura do ar e o aumento da pressão atmosférica influenciam positivamente na redução do consumo de combustível em grupos motogeradores movidos a *diesel* (LORA e NASCIMENTO, 2004).

7.3. Simulação de matrizes híbridas

Na Antártica, a necessidade do uso de tecnologias que garantam a geração de energia mesmo em condições extremas torna especialmente interessante a adoção de uma matriz energética diversificada aliada a um sistema de alta confiabilidade e máxima eficiência.

Considerando condições climáticas que levem a inoperância parcial ou total da geração eólica ou solar, deve haver um sistema capaz de suprir as cargas vitais da Estação por tempo suficiente para a readequação das condições normais de operação. Nessa situação, a geração de energia elétrica a partir de motogeradores movidos a biocombustíveis mostra-se como uma solução de baixo impacto ambiental e alta confiabilidade.

Para o aproveitamento máximo da oferta térmica dos grupos motogeradores e para estabilização do sistema elétrico, mostra-se interessante o uso de múltiplos reservatórios térmicos de água (reservatórios quente, frio e de mistura) acoplados a caldeiras *diesel* elétricas. Dessa forma, as matrizes simuladas serão sempre compostas por uma matriz base contendo grupos motogeradores com cogeração (CHP - *Combined Heat and Power*, Calor e Potência Combinados) e caldeiras *diesel* elétricas, aliada a uma matriz renovável com diferentes composições de tecnologias eólica e solar.

Quanto à potência renovável instalada, são possíveis três casos:

1º Caso: (Potência Renovável Instalada) \ll (Demanda Média)

Nesse caso o grupo motogerador funciona ininterruptamente para completar as necessidades energéticas e não há necessidade de sistema de armazenamento de energia elétrica, apenas um sistema de amortecimento como as resistências de caldeiras *diesel* elétricas. Toda a potência renovável gerada é aproveitada diretamente.

2º Caso: (Potência Renovável Instalada) \cong (Demanda Média)

Nesse segundo caso o grupo motogerador completa as necessidades energéticas, podendo até desligar-se automaticamente em alguns períodos caso haja um sistema de armazenamento de eletricidade. A contribuição da cogeração para o sistema de calefação e aquecimento de água será reduzida devido a menor operação dos motogeradores, tornando necessário o maior uso das caldeiras. Nessa solução o uso de tecnologias de armazenamento (elétrico e térmico) absorve os excedentes de potência renovável gerada, amortecendo os fluxos de potência, permitindo uma maior estabilidade e a qualidade de energia.

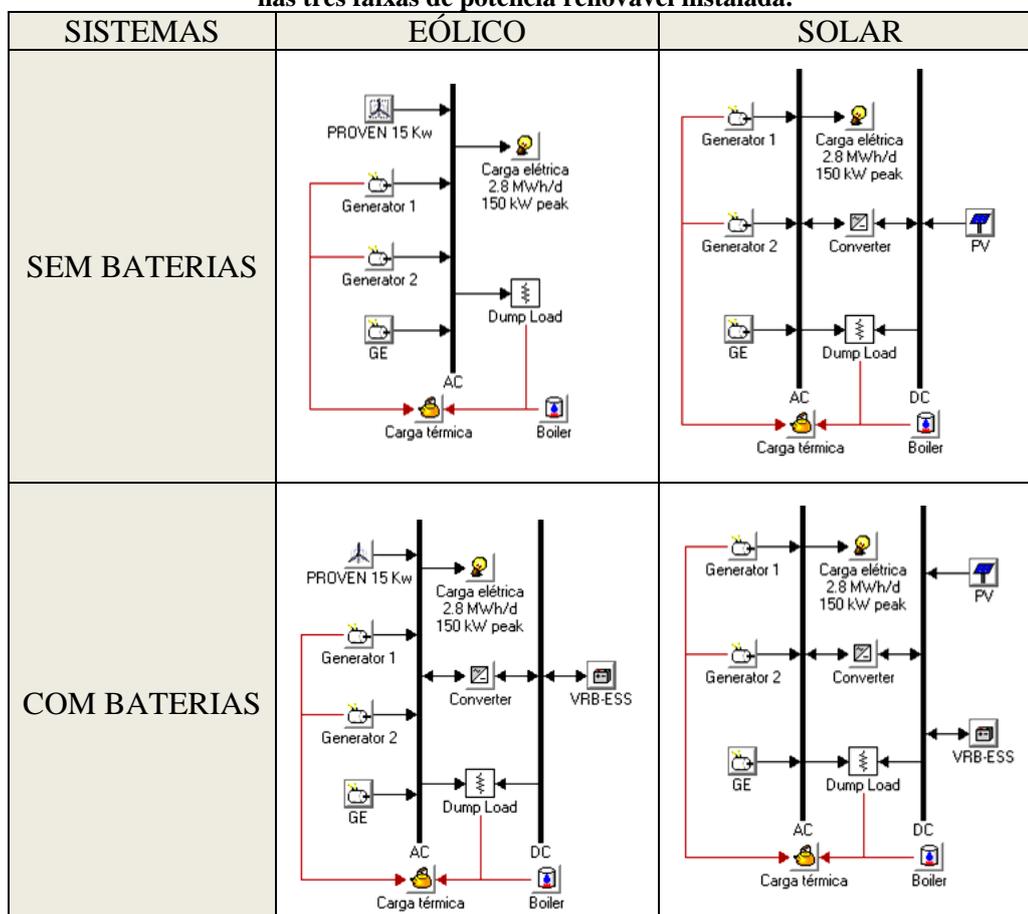
3º Caso: (Potência Renovável Instalada) \gg (Demanda Média)

Nesse caso o grupo motogerador somente é utilizado em emergências ou caso o nível de energia das baterias esteja baixo. É obrigatório o uso de um robusto sistema de armazenamento para o total aproveitamento do excedente renovável gerado e posterior alimentação das cargas elétricas, podendo ainda ser necessário um sistema específico de amortecimento dos fluxos de potência resultantes das oscilações entre ofertas e demandas elétricas. O consumo de combustível é mínimo.

Considera-se Potência Renovável Instalada (PRI) a máxima potência que a planta renovável será capaz de gerar sobre condições nominais, já a Demanda Média (DM) é definida como a relação entre a energia elétrica (kWh) consumida em um certo tempo e o número de horas desse período (MARTINS e HADDAD, 2001).

Para o estudo do comportamento das tecnologias eólica e solar nos casos descritos, foram definidas quatro topologias de matrizes considerando o uso da energia eólica ou solar separadamente, com e sem o uso de baterias. As quatro diferentes topologias de matrizes híbridas são apresentadas de forma esquemática na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Matrizes energéticas simuladas para avaliação do comportamento das diferentes tecnologias nas três faixas de potência renovável instalada.



As características técnicas inseridas no HOMER para simulação das turbinas eólicas foram referidas ao modelo Proven 15 kW, modelo que apresentou melhor desempenho, ver Tabela 6.4, aliado à maior simplicidade de montagem, elevada robustez, além da já conhecida aplicação de um modelo semelhante, de 6 kW, na Estação Princess Elisabeth. Para as simulações dos painéis fotovoltaicos foram utilizados os dados técnicos do painel SunPower E20, por apresentar excelente desempenho (20,01% de eficiência) comparado a diversos modelos disponíveis comercialmente (em média 14%) (SUNPOWER, 2011). As folhas de dados dos respectivos equipamentos constam no ANEXO D.

Foram utilizados nessas simulações, baterias e conversores dimensionados de forma a permitir o armazenamento de todos os excedentes, não impondo nenhuma limitação de potência ou capacidade. A eficiência considerada nos conversores foi de 95% para o circuito inversor e de 85% para o retificador. Para o sistema de armazenamento foram selecionadas baterias de fluxo do tipo VRB-ESS (*Vanadium Redox Battery - Energy Storage Systems*, Bateria de Oxirredução de Vanádio – Sistemas de Armazenamento de Energia). As baterias de fluxo VRB-ESS estocam os eletrólitos em dois tanques, um para o positivo e outro para o negativo. Esses eletrólitos são bombeados separadamente para uma célula onde fluem separados por uma fina membrana, ali liberam ou absorvem energia (processos de descarga ou de carga) e, na sequência, os eletrólitos fluem novamente até os tanques originais. Esse tipo de bateria destaca-se por permitir cargas e descargas de megawatts em frações de milissegundos, sem nenhum decréscimo significativo em sua capacidade (PRUDENTENERGY, 2011).

Para avaliar o consumo anual de combustível na Estação em função da inserção de matrizes renováveis de diferentes topologias, foram avaliadas 86 matrizes, sendo 21 em cada uma das quatro topologias apresentados na Tabela 7.3, uma matriz *diesel* semelhante à da antiga Estação e outra agregando apenas a cogeração aos motogeradores. A Figura 7.3 apresenta o resultado da simulação de consumo anual de óleo *diesel* na Estação em função da potência renovável instalada (15 kWp a 315 kWp) nas quatro topologias da Tabela 7.3.

O uso de baterias só apresentou maior redução no consumo anual em de matrizes com mais de 135 kWp de potência eólica instalada, ou com mais de 210 kWp para potência solar instalada. Nesses valores, as matrizes começaram a apresentar considerável geração de excedente (equivalentes a 5% do consumo médio anual). A diferença, 135 kWp para tecnologia eólica e 210 kWp para solar, acontece devido à turbina eólica produzir maior energia por kWp instalado do que a tecnologia solar, dados os diferentes perfis de oferta dos recursos eólico e solar durante o ano na região da EACF.

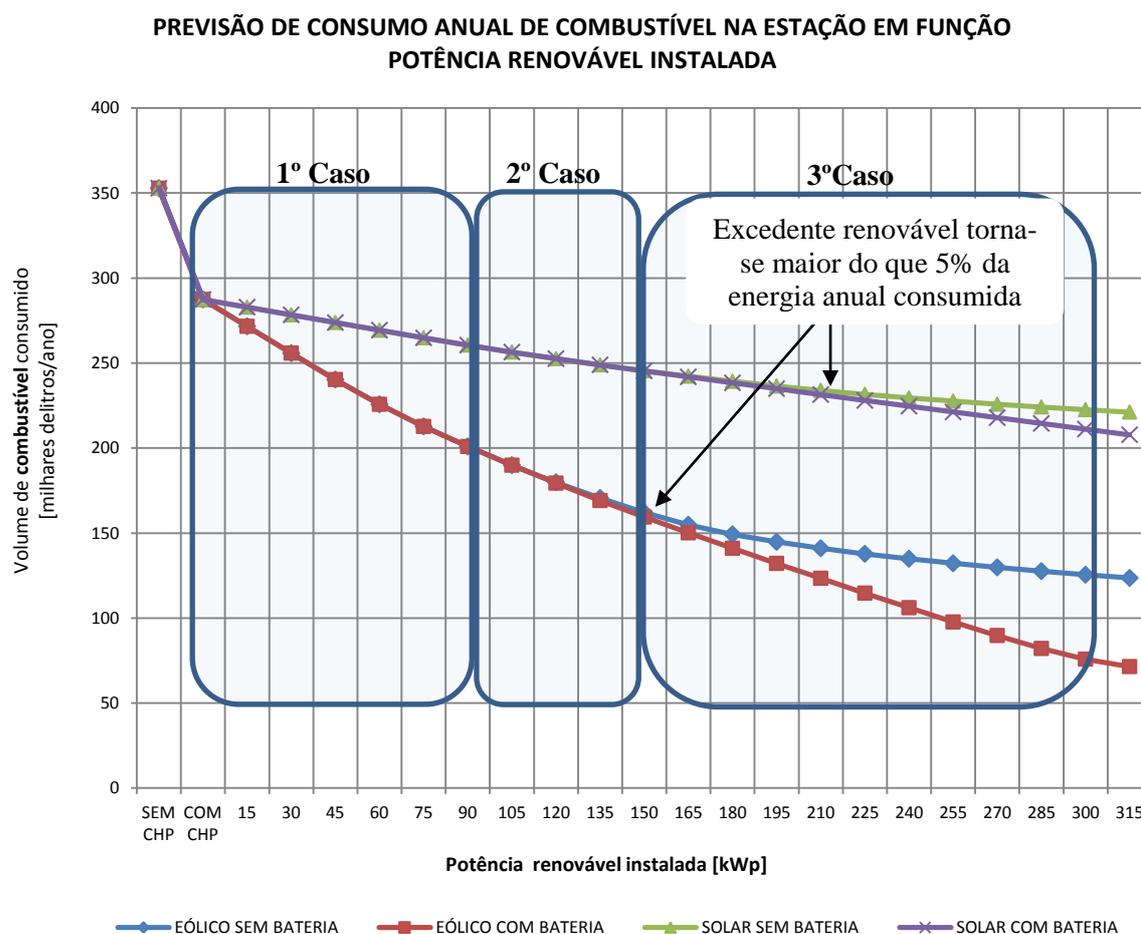


Figura 7.3 - Consumo de combustível da Estação em função da potência renovável instalada, considerando o uso de cogeração (CHP) em todas as matrizes renováveis.

Na Figura 7.3 observa-se que mesmo com matrizes de potência instalada de 315 kWp (2,66 vezes a demanda média da Estação) aliadas ao uso de baterias, o consumo anual se manteve acima de 50 mil litros. Após investigação, foi identificado que a ferramenta de simulação HOMER limita o uso da energia excedente armazenada nas baterias apenas para alimentação de cargas elétricas primárias, não permitindo a opção das baterias alimentarem um sistema de calefação (caldeiras *diesel* elétricas). Dessa forma, constata-se que o programa apresenta limitações quanto a simulações de matrizes energéticas que visem à integração dos sistemas elétricos e térmicos com o uso de sistemas de armazenamento de energia. Ressalta-se que caso seja considerado o uso dos excedentes armazenados nas baterias para atendimento à carga térmica, o comportamento das curvas dos sistemas com uso de baterias se mostraria ainda mais atrativo na presença de excedentes.

Apesar das análises realizadas para EACF indicarem a necessidade do uso de sistemas de armazenamento de energia elétrica, apenas nos casos de matrizes de maior porte, compostas por mais de 9 aerogeradores (total de 135 kWp instalado) ou 630 painéis solares

(total de 210 kWp instalado), soluções que adotem elevado número de painéis solares ou turbinas eólicas sugerem-se inexequíveis dadas as restrições locais. Dessa forma, matrizes que utilizem até 9 aerogeradores (considerando turbinas Proven 15) e que tornem opcional a utilização de baterias apresentam-se como soluções particularmente atrativas, dadas as sérias restrições ambientais e técnicas quanto à instalação de infraestruturas na região da EACF.

Para avaliar o desempenho das diferentes opções de matrizes, calcula-se o indicador litros economizados em um ano por quilowatt renovável instalado. Quanto maior for o volume economizado por quilowatt instalado, melhor é considerado o desempenho da solução. Esse indicador é apresentado na Figura 7.4 e consiste na taxa de variação das curvas de consumo apresentadas na Figura 7.3. Nota-se pela Figura 7.4, que os melhores desempenhos foram obtidos pelas matrizes com até três turbinas eólicas (45 kWp instalado). Para matrizes com mais de quatro turbinas eólicas a relação volume anual de combustível economizado por quilowatt instalado passa a se reduzir proporcionalmente à quantidade de turbinas adotada.

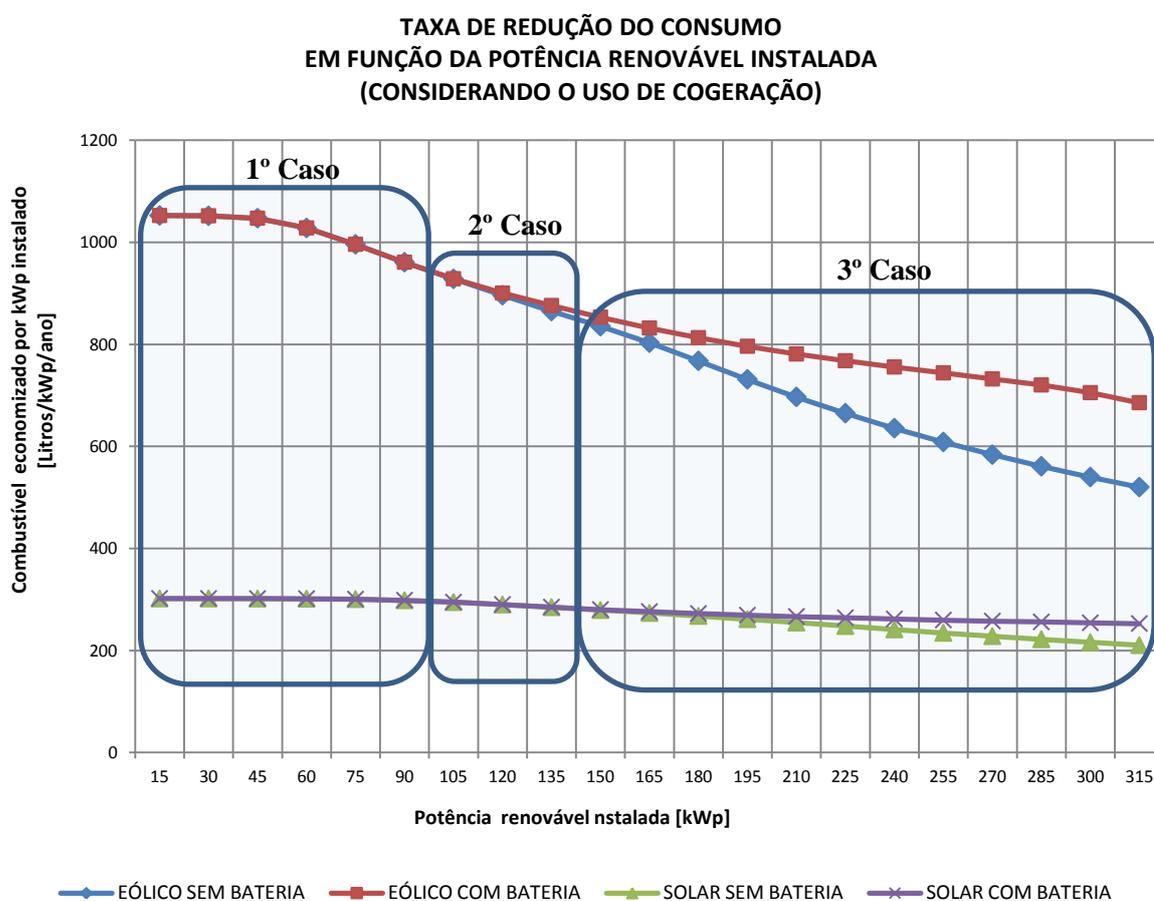


Figura 7.4 – Taxa de variação do consumo de combustível em função da potência renovável instalada considerando o uso de cogeração.

Esse comportamento acontece quando a potência renovável produzida se aproxima da demanda instantânea, reduzindo a necessidade de funcionamento dos motogeradores, conseqüentemente reduzindo a oferta térmica cogeraada pelos motogeradores, o que exige queima extra de combustível nas caldeiras para que seja atendida a demanda térmica. Antes desse ponto o sistema funciona com a eficiência do motogerador (36%) e a cada 1 kWh elétrico que deixa de ser demandado do motogerador, deixa-se de consumir 2,77 kWh de *diesel*. Porém, quando o sistema passa a operar com oferta de cogeração menor que a demanda térmica, cada 1 kWh elétrico que deixa de ser exigido do motogerador, apesar de continuar reduzindo o consumo de 2,77 kWh de *diesel* no motogerador, exige a queima extra de *diesel* na caldeira para complementar as necessidades térmicas.

Para avaliar o comportamento de matrizes híbridas Diesel-Eólica-Solar com cogeração e sem uso de baterias, foram simuladas 81 composições com potências eólica e solar instaladas entre 0 kWp e 135 kWp (equivalente a 9 aerogeradores ou 390 painéis solares). Na Tabela 7.4, são apresentados os resultados anuais de consumo de *diesel*, energia renovável excedente e percentual de óleo *diesel* economizado em relação ao ano de 2011. Para melhor interpretação dos dados, foi aplicada uma escala de cores aos valores e também feito um reforço nas bordas das células situadas na margem em que o excedente energético ultrapassa 2,8 MWh (consumo médio diário de energia elétrica na EACF em 2011).

Observa-se, na Tabela 7.4, que uma das composições que alcança elevada redução no consumo de combustível (46% em relação a 2011) juntamente com um baixo valor anual de excedentes (inferior a 2,8 MWh, valor do consumo médio diário de energia elétrica em 2011), é a matriz energética composta por 7 aerogeradores (105 kWp instalado), marcada em negrito para melhor visualização. Essa composição permite operar sem uso de baterias desde que um sistema para amortecimento dos fluxos de potência seja implementado, como, por exemplo, caldeiras elétricas acopladas a múltiplos reservatórios térmicos. Nessa solução, o grupo motogerador deverá estar sempre em operação a fim de complementar a geração de energia.

Tabela 7.4 - Desempenho de matrizes híbridas Diesel-Eólico-Solar, com cogeração, tomando como referência o diesel consumido em 2011 na EACF e considerando potenciais de recursos renováveis levantados.

CONSUMO ANUAL DE COMBUSTÍVEL PARA MATRIZES HÍBRIDAS DIESEL-EÓLICO-SOLAR COM CHP E SEM O USO DE BATERIAS [MILHARES DE LITROS/ANO]											
		POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA									
		0 kWp	15 kWp	30 kWp	45 kWp	60 kWp	75 kWp	90 kWp	105 kWp	120 kWp	135 kWp
POTÊNCIA SOLAR INSTALADA	0 kWp	287	272	256	240	226	213	201	190	180	170
	15 kWp	283	267	251	236	221	209	197	186	176	167
	30 kWp	278	263	247	231	217	205	193	183	173	163
	45 kWp	274	258	242	227	213	201	190	179	169	160
	60 kWp	269	254	238	223	209	197	186	176	166	157
	75 kWp	265	249	234	219	206	194	183	173	163	154
	90 kWp	261	245	230	216	202	191	180	169	160	152
	105 kWp	256	241	226	212	199	187	177	167	158	149
	120 kWp	253	238	223	209	196	184	174	164	155	147
	135 kWp	249	234	220	206	193	182	171	162	153	145
EXCEDENTE ANUAL DE ELETRICIDADE PRODUZIDO PELAS MATRIZES HÍBRIDAS DIESEL-EÓLICO-SOLAR COM CHP E SEM O USO DE BATERIAS [MWh/ANO]											
		POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA									
		0 kWp	15 kWp	30 kWp	45 kWp	60 kWp	75 kWp	90 kWp	105 kWp	120 kWp	135 kWp
POTÊNCIA SOLAR INSTALADA	0 kWp	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	2,4	17,3	47,6
	15 kWp	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	4,2	22,1	54,2
	30 kWp	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	7,7	28,0	61,5
	45 kWp	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	3,3	12,4	34,8	69,3
	60 kWp	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,9	7,0	18,4	42,3	77,7
	75 kWp	0,0	0,0	0,0	0,1	1,3	4,8	12,0	25,3	50,4	86,6
	90 kWp	0,0	0,0	0,1	0,9	3,6	9,2	18,1	32,9	59,1	95,9
	105 kWp	0,0	0,1	0,7	2,8	7,4	14,7	25,2	41,2	68,4	106,0
	120 kWp	0,2	0,6	2,4	6,3	12,7	21,4	33,1	50,3	78,4	116,7
	135 kWp	1,0	2,6	6,0	11,6	19,3	29,2	42,1	60,4	89,4	128,2
REDUÇÃO NO CONSUMO DE DIESEL PROVOCADO PELAS MATRIZES HÍBRIDAS DIESEL-EÓLICO-SOLAR COM CHP E SEM O USO DE BATERIAS [PERCENTUAL/ANO]											
		POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA									
		0 kWp	15 kWp	30 kWp	45 kWp	60 kWp	75 kWp	90 kWp	105 kWp	120 kWp	135 kWp
POTÊNCIA SOLAR INSTALADA	0 kWp	19%	23%	27%	32%	36%	40%	43%	46%	49%	52%
	15 kWp	20%	24%	29%	33%	37%	41%	44%	47%	50%	53%
	30 kWp	21%	26%	30%	34%	38%	42%	45%	48%	51%	54%
	45 kWp	22%	27%	31%	36%	40%	43%	46%	49%	52%	55%
	60 kWp	24%	28%	33%	37%	41%	44%	47%	50%	53%	56%
	75 kWp	25%	29%	34%	38%	42%	45%	48%	51%	54%	56%
	90 kWp	26%	31%	35%	39%	43%	46%	49%	52%	55%	57%
	105 kWp	27%	32%	36%	40%	44%	47%	50%	53%	55%	58%
	120 kWp	28%	33%	37%	41%	45%	48%	51%	54%	56%	58%
	135 kWp	29%	34%	38%	42%	45%	49%	51%	54%	57%	59%

7.4. Determinação da matriz energética para EACF

Para definição das topologias mais atrativas em cada uma das possíveis regiões de operação ($PRI < DM$, $PRI \approx DM$ e $PRI > DM$) e para a escolha de uma das opções para proposta

de implantação na EACF, foram levados em consideração diversos aspectos dentre eles a segurança, o desempenho, a logística e a complexidade de instalação. Por se tratar de uma matriz energética para uma Estação Antártica, condições climáticas extremas e de ocorrências que levem à inoperância dos sistemas também foram previstas. Para facilitar manutenções e minimizar os riscos em caso de falhas elétricas, mecânicas ou incêndios, as composições das matrizes foram estabelecidas de maneira a possibilitar estruturas modulares e redundantes, de operação simultânea e ou individual. Para a melhor logística e manutenção, foram escolhidos os componentes da matriz energética de forma a possibilitar reduzidos volumes e massas e permitir reduzido estoque de sobressalentes.

Dessa forma, são então expostas na Tabela 7.5 as principais vantagens e desvantagens das topologias consideradas mais atrativas. As opções se diferenciam principalmente por desempenho (litros economizados por kWp instalado), complexidade e percentual de redução do consumo de combustíveis (litros/ano)

Tabela 7.5 – Comparativo de possíveis soluções de matrizes energéticas por tipo de solução. Potência renovável instalada (PRI).

SOLUÇÃO	COMPOSIÇÃO DA MATRIZ	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESVANTAGENS
Solução 1: PRI < DM	2 motogeradores com cogeração 1 motogerador para Emergência 4 Aero geradores 45 Painéis Solares PRI = 75 kWp	Menor complexidade e custo. Não necessita de sistemas de baterias. Melhor desempenho entre as soluções. (economia de combustível por quilowatt instalado)	Menor redução no consumo de combustível (37%)
Solução 2: PRI \cong DM	2 motogeradores com cogeração 1 grupo motogerador para Emergência 6 aerogeradores 45 painéis solares PRI = 105 kWp	Boa redução de consumo (44%) Possibilidade de otimização do uso do motogerador, quando aliado a sistemas de armazenamento de energia elétrica.	Necessidade se sistema para amortecimento dos fluxos de potência e ou sistema de armazenamento.
Solução 3: PRI > DM	2 motogeradores para emergência ≥ 12 aerogeradores* Total Renovável ≥ 180 kWp * ou turbinas eólicas de maior potência	Elevada redução de consumo, > 60% . Possibilidade de operação autônoma da Estação, por períodos.	Elevada complexidade de projeto, instalação e manutenção. Necessita de um sistema de armazenamento de energia e de amortecimento dos fluxos de potência, de grande porte.

A solução 1 apresenta-se particularmente atrativa pois utiliza apenas 4 aerogeradores e possui elevado desempenho, ou redução de consumo de *diesel* por quilowatt instalado (litros por kWp), como já apresentado na Figura 7.4. Isso sugere um menor tempo de retorno de custo da solução 1 em relação as soluções 2 e 3. Outro aspecto positivo é a não necessidade de uso de baterias. No entanto, no que se refere a ganho de autonomia, a solução 1 apresenta uma redução inferior as solução 2 e 3. Apesar disso, a redução de consumo em 37%, já é superior ao estabelecido como meta pelo pacote de medidas climáticas e energéticas conhecido como 20-20-20 (EU, 2011).

A solução 2 apresenta possibilidade de desligamento dos motogeradores em períodos de menor demanda, desde que exista um sistema de armazenamento de energia capaz de suprir as cargas elétricas. Quando o nível baixo do sistema de armazenamento é atingido, os geradores são ligados e operam a plena carga e eficiência máxima, a fim de recarregar o sistema de armazenamento de energia. Na solução 2, também é possível a operação sem o uso de baterias, porém, os motogeradores deverão permanecer sempre ligados e um robusto sistema de amortecimento dos fluxos de potência deverá existir.

A solução 3, apesar de permitir a maior autonomia entre os casos estudados, é a solução que necessita de maior área para instalação dos aerogeradores, sistemas de gerenciamento e de armazenamento de energia. Com base nos estudos de Manwell *et al.* (2002, p. 384-389), o espaçamento dos aerogeradores situa-se entre 5 a 9 vezes o diâmetro de rotor na direção de ventos dominantes, e de 3 a 5 vezes na direção perpendicular aos mesmos, dessa forma, calcula-se que a área livre necessária para a instalação de 12 aerogeradores seria de aproximadamente 3.000 m² (para um diâmetro de rotor igual a 9 m e valores médios de espaçamento).

Apesar das soluções 2 e 3 apresentarem aspectos positivos, o não conhecimento dos custos de logística, instalação e manutenção em ambiente antártico, sugerem que para uma análise decisiva da melhor solução a longo prazo, devam antes ser mensurados em completo os custos envolvidos na logística, implantação e operação de tecnologias renováveis na região da EACF. Considerando as complexidades de instalação e manutenção em clima extremo e o esperado impacto ambiental, a solução 1 é a que melhor se adéqua às capacidades logísticas do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e a que provoca menor impacto ambiental do ponto de vista de área necessária para implantação.

Dessa forma, propõe-se a adoção da solução 1, pois a mesma possibilita tanto a redução imediata de 37% no consumo anual de combustíveis quanto o estudo detalhado de custos e desempenho para futura otimização e ampliação da matriz.

Análise de desempenho da solução proposta:

A Tabela 7.6 mostra o diagrama da matriz proposta (4 aerogeradores, 45 painéis fotovoltaicos, 2 motogeradores com cogeração e um motogerador de emergência), apresentando os respectivos dados de consumo de combustível, geração de energia elétrica, energia térmica e excedente de energia, por tecnologia. A redução de consumo nos motogeradores seria de 67.670 litros por ano (23,5% ao ano) e nas caldeiras seria de 63.743 litros por ano (97,4% ao ano).

A economia total seria de 131.413 litros de óleo *diesel* por ano, cerca de 37% em relação ao consumo total da Estação em 2011, 358.985 litros. Essa economia equivaleria a um aumento de aproximadamente 7 meses na autonomia da Estação considerando o novo consumo médio de óleo *diesel* esperado, 641 litros por dia. O novo consumo médio diário da Estação considera: 607 litros/dia consumidos nos motogeradores e caldeiras e mais 34 litros/dia em embarcações, viaturas e incinerador.

As emissões de CO₂ também seriam reduzidas em proporções semelhantes, uma vez que aproximadamente 99% dos carbonos contidos no combustível são emitidos em forma de dióxido de carbono. Assim, estima-se que os níveis de emissão de CO₂ passariam de 940 toneladas por ano para cerca de 590 toneladas por ano.

Tabela 7.6 – Diagrama da matriz proposta para a EACF. Dados de consumo de combustível e geração de energia elétrica e térmica..

MATRIZ SIMULADA	GRUPO MOTOR GERADOR COM COGERAÇÃO	CALDEIRAS	AEROGERADOR E PAINÉIS SOLARES
	DIESEL CONSUMIDO POR ANO		
	219.713 litros/ano	1.706 litros/ano	Não se aplica
	ENERGIA ELÉTRICA (kWh_e) OU TÉRMICA (kWh_t) PRODUZIDA POR ANO		
	Gerador elétrico: 772.111 kWh _e /ano	15.106 KWh _t /ano	Eólica: 246.456 kWh _e /ano
	Cogeração: 868.670 KWh _t /ano		Fotovoltaica: 17.669 kWh _e /ano
	EXCEDENTE DE ENERGIA POR ANO		
304.166 KWh _t /ano	0	0	

A Figura 7.5 apresenta a potência elétrica produzida pelas fontes renováveis e a Figura 7.6 apresenta a potência elétrica complementar gerada pelo grupo motogerador. Para melhor análise, a demanda elétrica da Estação também está representada tanto na Figura 7.5 quanto na Figura 7.6.

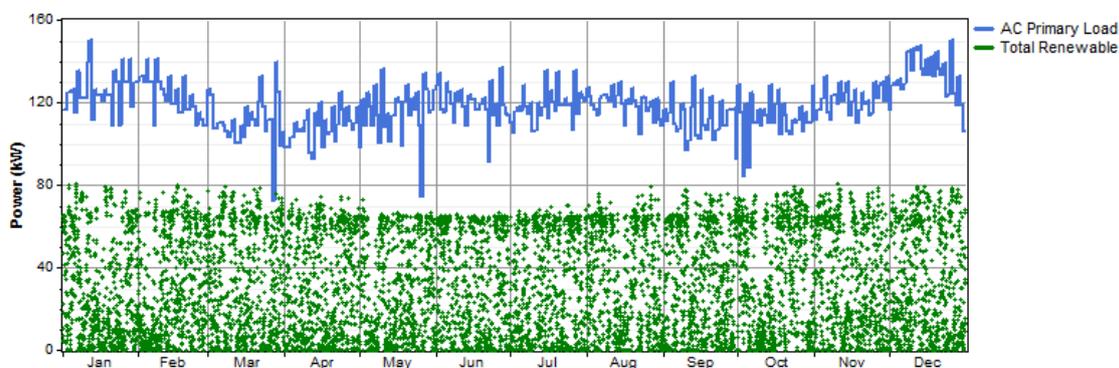


Figura 7.5 – Característica da Potência elétrica produzida pelas fontes renováveis de energia para a matriz proposta.

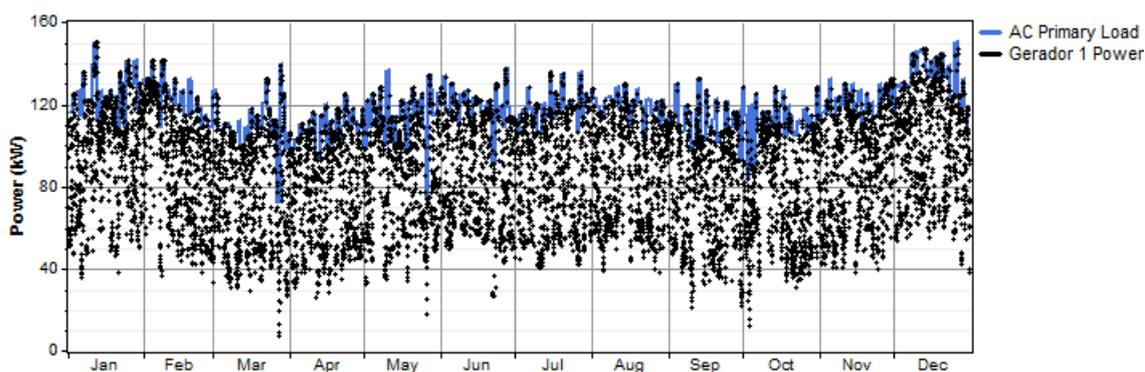


Figura 7.6 – Característica da produção complementar de energia no grupo motogerador, para a matriz proposta.

A Figura 7.7 apresenta a proporção de eletricidade produzida em média a cada mês por cada tecnologia de geração. Os percentuais de participação na produção anual de energia elétrica foram de 2% para os painéis fotovoltaicos, 24% para os aerogeradores e de 74% para os motogeradores.

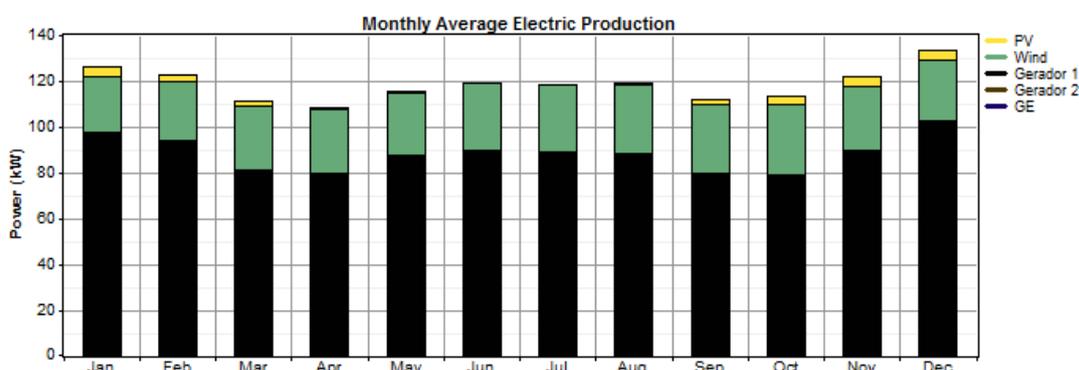


Figura 7.7 - Produção média mensal de eletricidade por tecnologia para a matriz proposta.

Em um sistema de alto desempenho, é esperado que toda energia renovável gerada seja aproveitada, isto é, penetre na rede. Quanto maior forem os níveis de penetração das fontes renováveis, maior deverá ser a capacidade da matriz em lidar com variações abruptas entre oferta e demanda, sem comprometer a estabilidade da rede e a qualidade de energia. A Figura 7.8 mostra o gráfico dos diversos valores de penetração alcançados a cada hora para o mesmo período. A Figura 7.9 apresenta os percentuais máximos, mínimos e médios da penetração da energia renovável para a solução proposta. A maior penetração alcançada foi de 89,9%.

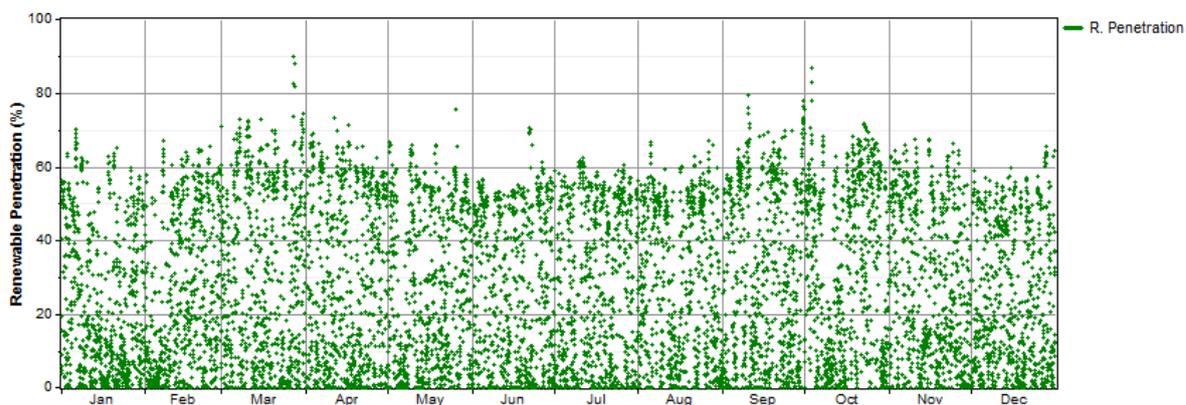


Figura 7.8 – Característica da penetração das energias renováveis da matriz proposta.

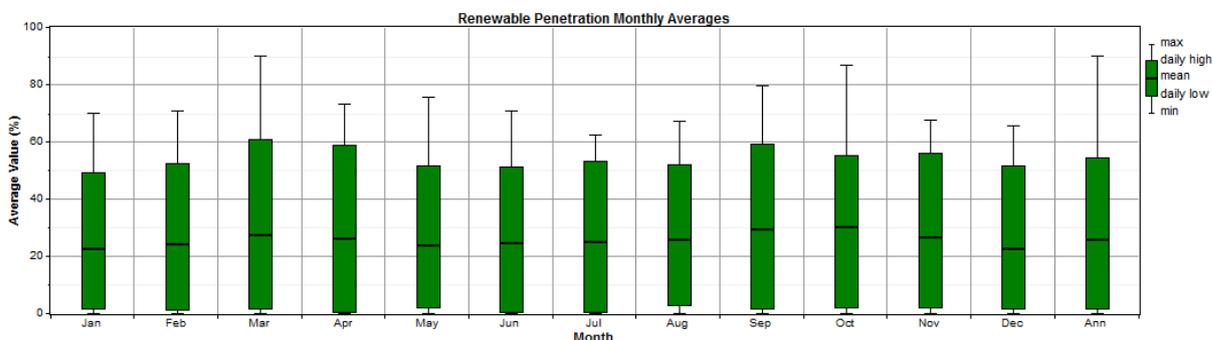


Figura 7.9 – Valores médios, máximos e mínimos da penetração de energia renovável na matriz proposta.

Quanto à geração de energia térmica, a Figura 7.10 apresenta a produção média mensal por tecnologia, a Figura 7.11 apresenta a oferta térmica proveniente do motor do gerador 1 a cada hora, e a Figura 7.12 apresenta a operação da caldeira nos momentos de baixa oferta térmica dos motogeradores. Em ambas as figuras foi representada também a curva de demanda térmica da Estação a fim de permitir uma melhor análise.

A cogeração foi capaz de suprir 97,4% da demanda térmica, sendo o uso das caldeiras restrito apenas a situações de baixa operação do grupo motogerador consequentes de baixas demandas elétricas ou elevada penetração das fontes renováveis. No entanto, observa-se, pela Figura 7.11, que ocorreu excedente térmico considerável. O excedente térmico foi de 304.166 kWh_t/ano, cerca de 20 vezes a produção das caldeiras nas situações já descritas

(15.106 kWh_t/ano). Este fato reforça a possibilidade de que toda a demanda térmica da Estação pode ser suprida pela cogeração com o uso da adequada tecnologia de armazenamento.

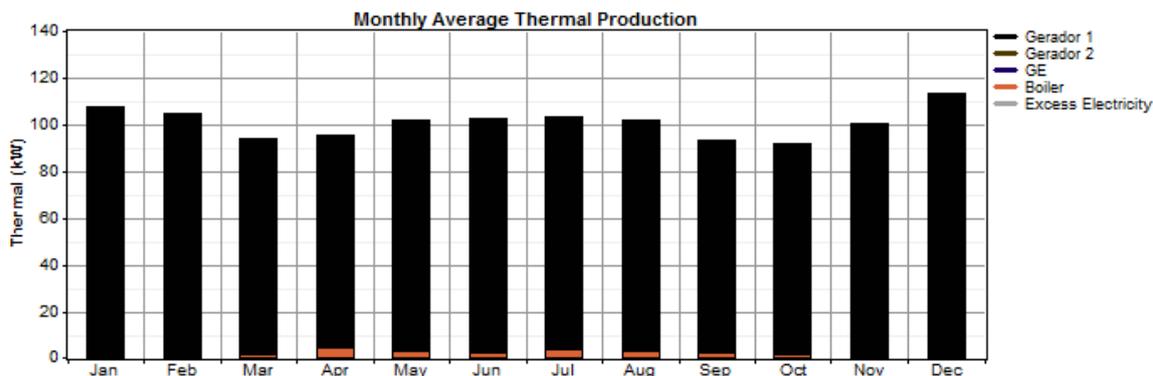


Figura 7.10 – Produção média mensal de energia térmica da matriz proposta, por tecnologias.

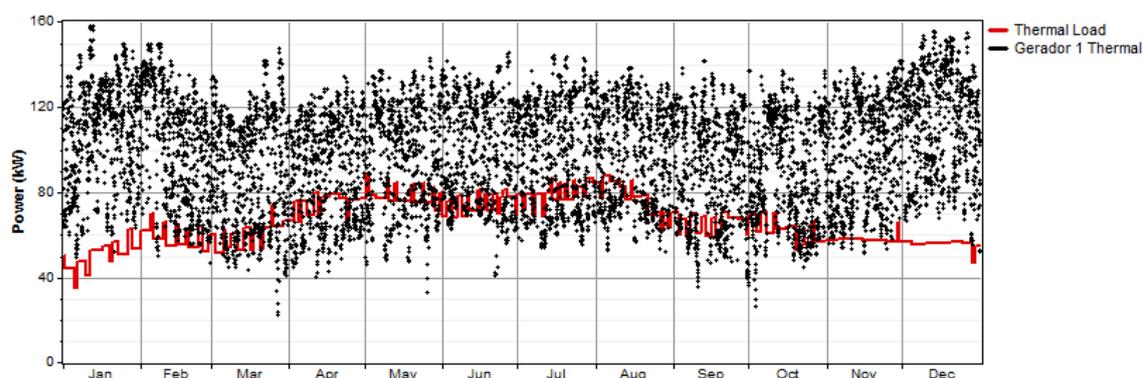


Figura 7.11 – Característica da produção de energia térmica no motogerador da matriz proposta, sobreposta a demanda térmica da EACF.

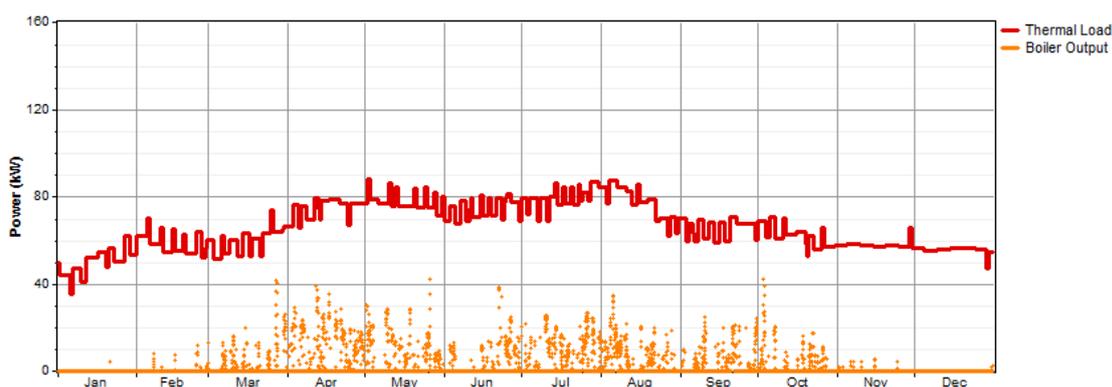


Figura 7.12- Característica de produção de energia térmica nas caldeiras da matriz proposta, sobreposta a demanda térmica da EACF.

Apesar dos resultados indicarem a possibilidade de redução de consumo de combustível em torno 37% com a adoção da matriz proposta, deve-se avaliar a sensibilidade da mesma à variação da disponibilidade dos recursos renováveis ou possibilidade de inoperância dos sistemas. A Figura 7.13 mostra a variação do consumo anual de óleo *diesel* em função da disponibilidade dos recursos renováveis, numa faixa que vai de zero a 1,5 vezes o valor médio anual do recurso. A curva azul apresenta o consumo anual de combustível

esperado em função do recurso eólico e considera o recurso solar fixo em seu valor médio anual (2,36 kWh/m²/dia). A curva vermelha apresenta o consumo anual esperado em função da variação do recurso solar e considera o recurso eólico fixo em seu valor médio (5,97 m/s).

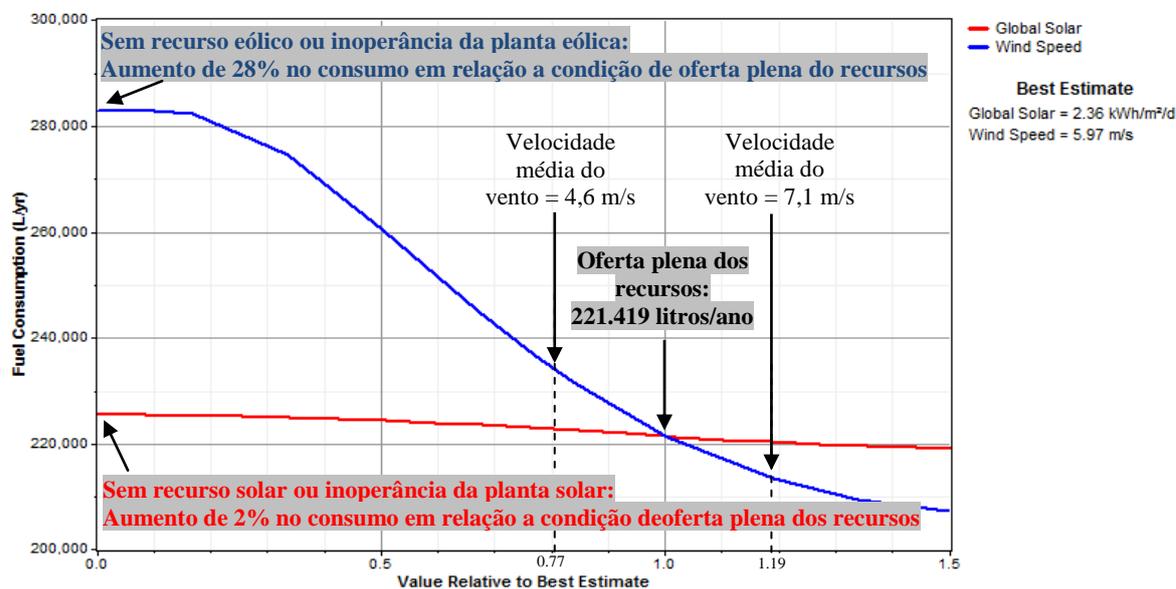


Figura 7.13 – Variação no consumo anual de combustível na matriz proposta em função da oferta de recursos renováveis.

Considerando os valores máximo e mínimo da velocidade média anual dos ventos já registrada na região da EACF, 4,6 m/s e 7,1 m/s (vide Figura 6.8), o consumo de combustível esperado estará, respectivamente, entre 236.659 e 213.329 litros por ano. Dessa forma, o consumo anual de óleo *diesel* na Estação esperado com a adoção da matriz proposta seria de 221.419 litros por ano, com uma variação anual de +6,8% a -3,6%.

No entanto, o risco de instabilidade da rede elétrica será uma das principais questões a que a ser trabalhada para implementação real de uma matriz híbrida sem o uso de baterias. Nesse sentido, duas soluções já implantadas em estações antárticas que vem sendo testadas são: o uso de sistemas de volantes de inércia (Estação McMuro – Norte Americana), e o uso de sistemas de caldeiras *diesel* elétricas integradas à rede (Estação Mawson - Australiana).

7.5. Conclusões

Este capítulo apresentou estudos de desempenho de matrizes híbridas, considerando os recursos renováveis, características climáticas e perfil de consumo referidas a Estação Antártica Comandante Ferraz. A avaliação de consistência do modelo de simulação e dos dados de entrada apresentou elevada coerência com os valores reais, sendo obtido um desvio de apenas +1,8%.

A avaliação das matrizes híbridas indicou a possibilidade de operação com potências eólicas instaladas de até 105 kWp (7 aerogeradores Proven 15) sem a obrigatoriedade do uso

de baterias. No entanto, a partir de potências eólicas instaladas superiores a 45 kWp, três aerogeradores Proven 15, a relação de economia de combustível por quilowatt instalado é reduzida.

A matriz energética proposta, composta por 4 aerogeradores Proven 15 kWp, 45 painéis SunPower E20 327 Wp, 2 motogeradores C200-D6-4 com cogeração e um motogerador de emergência, possibilita tanto a redução de 37% no consumo anual de combustíveis quanto o estudo detalhado de custos e desempenho para futura otimização e ampliação. O consumo esperado para essa solução seria de 221.419 litros por ano com uma variação anual entre +6,8% e -3,6%. A emissão de CO₂ passaria de 940 toneladas ano para cerca de 590 toneladas por ano.

Apesar da possibilidade de operação de matrizes híbridas sem o uso baterias, o risco de instabilidade da rede e de problemas de qualidade de energia são aspectos a serem trabalhados nesses casos. Nesse caso, a adoção de sistemas de caldeiras *diesel* elétricas integradas a rede (Estação Mawson - Australiana) e volantes de inércia (Estação McMudo – Norte Americana) vêm demonstrado eficácia.

Capítulo 8: Conclusão Geral

A EACF desenvolveu-se ao longo dos anos através de consecutivas reformas e expansões para o total atendimento às demandas de pesquisas. No que diz respeito ao sistema elétrico, uma das reformas mais recentes e importantes foi a substituição dos grupos motogeradores por novos modelos mais modernos e eficientes, aliada à revitalização do sistema elétrico e a adoção de tensão de 220 V em toda a Estação. No entanto, o consumo de aproximadamente 360.000 litros de *diesel* por ano ainda apresentava-se como um fator que impunha limitações à autonomia da Estação, elevava o esforço logístico e potencializa os riscos de impactos ambientais.

No presente estudo, foi diagnosticado que os principais consumidores de combustível da Estação eram, respectivamente, os sistemas de geração de energia elétrica (78%) e aquecimento da Estação (18%). Foi visto que as principais cargas elétricas da Estação eram os cabos térmicos, sendo responsáveis por cerca de 40% do consumo de todo o óleo *diesel* na Estação. Os estudos realizados nas cintas térmicas externas, durante o verão de 2010/2011, indicaram que havia um elevado potencial para efficientização desses circuitos. Esse fato atesta a importância do correto dimensionamento, especificação e instalação de cabos térmicos e isolamentos, bem como o uso de sistemas eletrônicos de controle e monitoramento dos circuitos.

A qualidade de energia da EACF foi, de forma geral, considerada adequada pois enquadra-se dentro dos patamares estabelecidos pelas normas IEEE519 e PRODIST-ANEEL Módulo 8. No entanto, o circuito do lago sul apresentou tensões em níveis precários e necessidade de readequação. Como os circuitos dos lagos não foram alcançados pelo incêndio, a necessidade de readequação se mantém. Outra ocorrência constatada foi a elevação da distorção harmônica provocada por *no-breaks* bifásicos, o que deve ser evitado em instalações futuras, optando-se por equipamentos trifásicos e com filtros de correção de fator de potência integrados.

As tecnologias que demonstraram maior potencial energético para redução do consumo de óleo *diesel* na Estação foram a cogeração nos motogeradores e o uso de turbinas eólicas, seguido do uso de painéis fotovoltaicos e de aproveitamento dos resíduos. A energia da cogeração seria capaz de suprir todas as necessidade térmicas da Estação, refletindo em uma redução anual de 65.000 litros de óleo *diesel*, sobrando ainda excedentes da ordem de 300.000 kWh_t/ano. Esse excedente poderia ser armazenado por múltiplos reservatórios térmicos, o que permitiria uma maior autonomia e segurança na operação da Estação. O uso

de energia eólica pode refletir em uma redução anual de até 970 litros de *diesel* para cada quilowatt instalado, ou uma economia de até 14.553 litros por considerando uma turbina eólica modelo Proven 15 kW. O uso de painéis fotovoltaicos para a geração de energia elétrica apresentaram baixo potencial para redução do consumo de *diesel* (354 litros por ano para cada quilowatt instalado) quando comparado à geração eólica. A baixa intensidade de radiação solar no inverno leva os painéis quase à inoperância; no entanto, durante o verão, quando a maior parte das pesquisas se desenvolve, o sistema apresenta taxas de produção de energia próximas às da solução eólica. Dessa forma, o uso de painéis solares torna-se particularmente atrativo para situações de instalação em parede de refúgios utilizados primordialmente no verão. O aproveitamento de resíduos sólidos não se mostrou energeticamente atrativo, porém, o ganho ambiental pela redução de emissões e possibilidade de utilização do metano gerado em fogões e fornos são aspectos positivos dessa tecnologia.

A escolha de uma matriz energética envolve a avaliação dos custos de implantação, manutenção e operação dos sistemas, assim como a vida útil dos mesmos. Nesse trabalho, foi detectado a necessidade de se obter esses custos para avaliar, do ponto de vista financeiro, a estratégia mais interessante em longo prazo. Dessa forma, foi realizado o estudo de desempenho das matrizes e expressados os indicadores utilizando o litro do *diesel* como unidade monetária, permitindo a tradução futura em indicadores financeiros e uso em análises de custo.

A análise de matrizes energéticas híbridas Diesel-Eólica-Solar identificou três possibilidades de matrizes, em função da Potência Renovável Instalada (PRI) e Demanda Média (DM) da Estação. A saber:

- A primeira opção é uma matriz na qual a Potência Renovável Instalada é menor do que a Demanda Média da Estação. Nesse caso toda a potência renovável produzida pela planta eólica e solar poderia ser aproveitada diretamente pela Estação, e os motogeradores funcionariam ininterruptamente para completar as necessidades energéticas. Nessa solução não haveria necessidade de um sistema de armazenamento de energia elétrica, como baterias, sendo suficiente apenas a adoção de um sistema de amortecimento como as resistências de caldeiras *diesel* elétricas.
- A segunda opção é uma matriz com Potência Renovável Instalada é próxima a Demanda Média da Estação. Nessa topologia a potência renovável gerada horas torna-se superior a demanda sendo possível até desligar-se automaticamente os motogeradores em alguns períodos caso haja um sistema de armazenamento de eletricidade capaz de suprir as necessidades da Estação. Nessa configuração a energia

cogerada para o sistema de calefação e aquecimento de água será reduzida devido a menor operação dos motogeradores, implicando em uma maior necessidade de queima de diesel nas caldeiras. Para melhorar o desempenho dessa solução é indicado o uso de tecnologias de armazenamento de energia elétrica e térmica, de forma a absorver os excedentes de potência renovável gerada e amortecer os fluxos de potência na matriz.

- A terceira opção é um caso em que a Potência Renovável Instalada seja superior a Demanda Média da Estação. Nesse caso o grupo motogerador somente é utilizado em emergências ou caso o nível de energia das baterias esteja baixo. É obrigatório o uso de um robusto sistema de armazenamento para o total aproveitamento do excedente renovável gerado e posterior alimentação das cargas elétricas, podendo ainda ser necessário um sistema específico de amortecimento dos fluxos de potência resultantes das oscilações entre ofertas e demandas elétricas. O consumo de combustível é mínimo, porém, a complexidade, o custo de instalação e o espaço necessário para a instalação de toda a planta são os maiores dentre os casos possíveis.

No entanto, uma proposta de matriz energética para a EACF deve considerar além das características de desempenho e redução de consumo de combustíveis, as capacidades logísticas do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), o impacto ambiental do ponto de vista de área necessária para implantação, e ainda, a necessidade de se realizar estudo detalhado dos reais custos de transporte, instalação e manutenção em ambientes antárticos.

Portanto, considerando os casos estudados, este trabalho propõe uma matriz energética híbrida, Diesel-Eólica-Solar, com cogeração e sem o uso de baterias, composta por: dois motogeradores a *diesel* com cogeração e interligados ao sistema de calefação e aquecimento de água; um motogerador de emergência; 4 aerogeradores de 15 kWp cada; e 45 painéis solares de 327 Wp cada. Essa solução promoveria uma economia de 37% no consumo anual de combustíveis, cerca de 133.000 litros por ano, e com isso aproximadamente 20 viagens com as chatas de óleo poderiam ser evitadas em média a cada ano. Essa estrutura inicial possibilitaria ainda o levantamento dos custos envolvidos na logística, implantação e operação, permitindo assim a futura inclusão de maior número de aerogeradores e painéis.

Considerando os históricos de variação dos recursos eólico e solar, o consumo esperado com a implantação da proposta de matriz energética na EACF seria de 221.419 litros por ano, com variações entre +6,8% e -3,6% em função de possíveis variações na oferta anual do recurso eólico. Estima-se que a emissão de CO₂ passaria de 940 toneladas por ano para cerca de 590 toneladas por ano.

No entanto, a possibilidade de operação de matrizes híbridas sem o uso de baterias traz consigo o risco de instabilidade da rede e de problemas de qualidade de energia, sendo aspectos importantes a serem trabalhados. Nesses casos, a adoção de sistemas de caldeiras *diesel* elétricas integradas à rede (Estação Mawson - Australiana) e de volantes de inércia (Estação McMurdo – Norte Americana) tem se mostrado como soluções eficazes.

Com o intuito de promover a continuidade das pesquisas na área, sugere-se como estudos futuros:

- Levantamento dos custos de logística, instalação e manutenção de tecnologias de geração de energias renováveis na Antártica e desenvolvimento de um modelo para análise de viabilidade técnica e financeira, considerando os indicadores apresentados no presente trabalho;
- Estudos de posicionamento e a instalação de torres para execução de medições anemométricas contínuas e em múltiplas alturas, determinação do índice de rugosidade por direção e para previsão de recurso eólico.
- Estudo e desenvolvimento de um sistema de gestão energética hierarquizada, *Smart Grid*, para otimização do consumo e da geração de energia em sistemas isolados operando com matrizes híbridas;
- Estudo e desenvolvimento de sistemas portáteis para provimento de energia em módulos isolados e acampamentos, baseados no uso de fontes renováveis de energia.

Referências

- AAD. Australian Antarctic Division. **Power generation at Mawson**, 2009. Disponível em: <<http://www.aad.gov.au/default.asp?casid=33573>>. Acesso em: Agosto 2009.
- AAD. Australian Antarctic Division. **Australia's Antarctic Stations**, 29 junho 2011. Disponível em: <<http://www.antarctica.gov.au/living-and-working/stations>>. Acesso em: 2011.
- ABEN. Associação Brasileira de Energia Nuclear. **Análise comparativa das alternativas energéticas quanto às emissões diretas e indiretas de CO₂**, 2010. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/uploads/energia/alternativas-energeticas.doc>>. Acesso em: Abril 2010.
- ADDAD, J.; LORA, E. E. S. **Geração distribuída: Aspectos Tecnológicos, ambientais e industriais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- ALTENER-GREENPRO. Energia Fotovoltaica - Guia sobre tecnologia, projecto e instalação, 2004. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>.
- ALVAREZ, C. E. D. **ARQUITETURA NA ANTÁRTICA: Ênfase nas edificações brasileiras em madeira**. São Paulo: USP, 1995.
- ANEEL, A. N. D. E. E. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em: 2012.
- ANTARCTICENERGYSOLUTIONS. AntarcticEnergySolutions. **AntarcticEnergySolutions - Engineering Solutions**, 2011. Disponível em: <<http://antarcticenergysolutions.wikispaces.com/Engineering+Solutions>>. Acesso em: 2011.
- BURTON, T. et al. **WIND ENERGY HANDBOOK**. Chichester, UK: JOHN WILEY & SONS, LTD, 2001.
- CÂMARA DOS DEPUTADOS. Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/501911.pdf>>. Acesso em: Agosto 2010.
- CARDOSO, B. Biodiesel na Antártica. **Revista TN Petróleo**, p. nº58, 46-55, 2008.
- CCSM, C. D. C. S. D. M. MB - Nota 3 – Incêndio na Estação Antártica Comandante Ferraz. **Ministério da Defesa - Marinha do Brasil**, 25 fevereiro 2012. Disponível em: <<http://www.defesanet.com.br/defesa/noticia/4907/MB---Nota--3-%E2%80%93-Incendio-na-Estacao-Antartica-Comandante-Ferraz>>. Acesso em: 2012.
- CCSM^a, C. D. C. S. D. M. MB - Nota a Imprensa – Replutuação da chata na Antártica. **Ministério da Defesa - Marinha do Brasil**, 2012. Disponível em: <<http://www.defesanet.com.br/defesa/noticia/5000/MB----Nota-a-Imprensa-%E2%80%93-Replutacao-da-chata-na-Antartica>>. Acesso em: 2012.
- CEPTEC-INPE. Ciclo do Carbono, 2011. Disponível em: <http://videoseducacionais.cptec.inpe.br/swf/mud_clima/03_ciclo_do_carbono/03_ciclo_do_carbono.shtml>. Acesso em: 2011.

COMNAP, 4 Abril 2011. Disponível em: <<http://www.comnap.aq>>. Acesso em: 2011.

COSTA, C. F. **Fontes renováveis de energia para a Estação Antártica Comandante Ferraz da marinha do Brasil**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2009.

CPTEC-INPE. Antártica - Projeto de Meteorologia, 2010. Disponível em: <<http://antartica.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 2010.

CRESESB-CEPEL. Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica. **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**, 2012. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=231>>. Acesso em: 2012.

CRESESB-GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: PRC-PRODEEM, 2004.

CUMMINSPOWER. Dados técnicos C200D6. **Grupos geradores acionados por motor Diesel**, p. 2, 2008.

DELEITO, J. C. C. **La Energia Eolica: tecnologia e história**. Madrid - Espanha: Hermann Blume, 1984.

DOE. Smart Grid - Department of Energy. **U.S. Department of Energy**, 2012. Disponível em: <<http://energy.gov/oe/technology-development/smart-grid>>. Acesso em: 2012.

EEP. Electrical Engineering Portal. **EEP - Smart Grid Concept and Characteristics**, junho 2012. Disponível em: <<http://electrical-engineering-portal.com/smart-grid-concept-and-characteristics>>.

ENERCON. **ENERCON Wind energy converters - Product overview**, 2012. Disponível em: <<http://www.enercon.de>>.

EPA, U. S. E. P. A. **A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions**. Assessment and Standards Division. [S.l.]. 2002. (EPA420-P-02-001).

EU, E. U. Europe 2020 – EU-wide headline targets for economic growth, 2011. Disponível em: <http://ec.europa.eu/europe2020/reaching-the-goals/targets/index_en.htm>. Acesso em: 2011.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. D. S.; SCABIO, A. BIODIESEL DE SOJA – TAXA DE CONVERSÃO EM ÉSTERES ETÍLICOS, CARACTERIZAÇÃO FÍSICOQUÍMICA E CONSUMO EM GERADOR DE ENERGIA. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.

GIACOMET. Calefação, Aquecimento de água, Aquecimento solar. **Giacomet Aquecimento e Conforto**, 2011. Disponível em: <<http://www.giacomet.com.br/giacomet-eacf.php>>. Acesso em: 2011.

HESSAMI, M. A.; CHRISTENSEN, S.; GANI, R. Renewable Energy. **Anaerobic digestion of household organic waste to produce biogas**, Setembro-Dezembro 1996. Volume 9, Issues 1-4, 954-957.

HOMER ENERGY, 2011. Disponível em: <<http://www.homerenergy.com/>>. Acesso em: 2011.

IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems: Standard 519**, 1992.

JAMIESON, P. **Innovation in Wind Turbine Design**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011.

JÚNIOR, C. W. M. et al. ELABORAÇÃO DE UM MAPA TOPOGRÁFICO NA ESCALA 1:5.000 PARA A PENÍNSULA KELLER, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA. **Revista Brasileira de Cartografia (ISSN 0560-4613)**, p. No 62/03, 453-466, 2010.

KASSOY, E. Modeling diesel exhaust emissions in diesel retrofits - An internal NREL report by Erin Kassooy. **National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page**, 2009. Disponível em: <<http://www.nrel.gov>>. Acesso em: 2009.

KLINK, A. **Mar Sem Fim: 360º ao redor da Antártica**. São Paulo: Companhia da Letras, 2002.

LAINE, V. ANTARCTIC ICE ALBEDO, TEMPERATURE AND SEA ICE CONCENTRATION TRENDS, 1981-2000. **EUMETSAT Meteorological Satellite Conference**, 2007. 50.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. D. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

LUFTECH. Manual técnico RGL200S. **Acervo da Estação Antártica Comandante Ferraz**, p. 73, 2007.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained - Theory Design And Application**. Baffins Lane, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.

MARTINS, A. R. S.; HADDAD, J. **Conservação de Energia: Eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: Editora da EFEI, 2001.

MB, M. D. B. 1º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral. **Marinha do Brasil - Protegendo Nossas Águas**, 2010. Disponível em: <<http://www.mar.mil/ehu-1/imagens/Ferraz.jpg>>. Acesso em: 2010.

MB, M. D. B. Manual do sistema de geração e distribuição da EACF. **Acervo da Estação Antártica Comandante Ferraz**, Antártica, p. 11, 2010.

MB, M. D. B. **Planilhas de controle de consumo de combustíveis**. EACF. 2011.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio atual da incineração no Brasil. **VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública**, 3 Abril 2000. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/informacoes-ambientais/incineracao/122-estagio-atual.htm>>.

MERIDIAN ENERGY. Meridian Energy Ltd. **Meridian Energy Ltd**, 2011. Disponível em: <www.meridian.co.nz>. Acesso em: 2011.

MMA, T. A. S. B. **Antártica: Bem comum da humanidade**. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente, 2009.

NASA, N. A. A. S. A. NASA's Surface Solar Energy Data Set, 2011. Disponível em: <<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>>.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **NREL Newsroom**, 15 Julho 2010. Disponível em: <http://www.nrel.gov/news/features/feature_detail.cfm/feature_id=1528>. Acesso em: 2011.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **NREL Newsroom**, 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/>>.

OSRAM, 2011. Disponível em: <<http://www.osram.com.br>>. Acesso em: Agosto 2011.

OTAGO DAILY TIMES ONLINE. First stage of Antarctic wind farm completed | Otago Daily Times Online, 3 Fevereiro 2009. Disponível em: <<http://www.odt.co.nz/news/world/45779/first-stage-antarctic-wind-farm-completed>>. Acesso em: Agosto 2009.

PATEL, M. R. **Wind and Solar Power Systems**. New York: CRC Press, 1999.

PEA, - P. E. A. S. W. S. Princess Elisabeth Antarctica Station. **Belgian Antarctic Station Web Site**, 2009. Disponível em: <<http://www.antarcticstation.org/>>. Acesso em: 2009.

PEA, P. E. A. S. W. S. Belgian Antarctic Research Station - Interview: Sven Kerremans (Laborelec) - First zero emission station. **Belgian Antarctic Research Station**, 6 Agosto 2009. Disponível em: <[http://www.antarcticstation.org/index.php?/news/interview_sven_kerremans_\(laborelec\)/&uid=396](http://www.antarcticstation.org/index.php?/news/interview_sven_kerremans_(laborelec)/&uid=396)>. Acesso em: Agosto 2009.

PHILIPSLUMILEDS. Technical Datasheet DS51, 2009. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS51.pdf>>. Acesso em: Agosto 2009.

POLAR FOUNDATION. www.polarfoudation.org, 2009. Disponível em: <www.polarfoudation.org>. Acesso em: Agosto 2009.

POLARPOWER.ORG. Remote power systems for polarenvironments. **PolarPower**, 2011. Disponível em: <www.polarpower.org>.

POWERCORP. PowerCorp, 2011. Disponível em: <www.pcorp.com.au>. Acesso em: 2011.

PROANTAR. **TRATADO DA ANTÁRTICA E PROTOCOLO DE MADRID**. Brasília: Secretaria da Comissão Interministerial de Recursos do Mar - SECIRM, 2001.

PRUDENTENERGY. Prudent Energy VRB System. **Clean Energy Storage**, 2011. Disponível em: <<http://www.pdenergy.com/index.html>>. Acesso em: 2011.

RAYCHEM. QTVR - Tyco Thermal Control, Dezembro 2011. Disponível em: <www.tycothermal.com>. Acesso em: Dezembro 2011.

REICHERT, G. A. Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Revisão. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2005. III-242.

REIS, L. B. D. **Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade**. Barueri, SP: Manole Ltda, 2003.

SCIENCEPOLES. Princess Elisabeth Antarctica: Changing the Way We Think about Using Energy. **SciencePoles.org**, 29 Abril 2010. Disponível em: <http://www.sciencepoles.org/articles/article_detail/princess_elisabeth_antarctica_changing_energy_use/>. Acesso em: 2010.

SECIRM, S. D. C. I. P. O. R. D. M. **Relatório de Resíduos Gerados na EACF**. Antártica. 2010.

SOUZA, J. E. B. E. **Brasil na Antártica: 25 Anos de História**. São Carlos - SP: Vento Verde, 2008.

SUNPOWER. SunPower E20 327 W Solar Painel spec sheet. **SunPower web site**, 2011. Disponível em: <<http://us.sunpowercorp.com>>. Acesso em: 2011.

THE ANTARCTIC SUN. The Antarctic Sun: News about Antarctica - Wind Farm, 5 Setembro 2008. Disponível em: <<http://antarcticsun.usap.gov/features/contentHandler.cfm?id=1527>>. Acesso em: Agosto 2009.

VSE, -V. S. E. E. S. A. Apresentações Ethanol Summit 2011. **Ethanol Summit 2011**, 2011. Disponível em: <<http://www.ethanolsummit.com.br/apresentacoes.php?idioma=1>>. Acesso em: 2011.

WINDOGRAPHER. Wind Resource Analysis and Wind Resource Assessment Software. Disponível em: <www.windographer.com>. Acesso em: 2011.

WMO, W. M. O. World Meteorological Homepage - WMO. **World Meteorological Organization**, 2012. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/index_en.html>. Acesso em: 2012.

WOELFFEL, A. B. et al. **Resíduos sólidos gerados pelas atividades de produção e consumo de alimentos na Estação Antártica Comandante Ferraz**. VII Seminário Estadual sobre Saneamento e Meio Ambiente. Vitória. 2007.

ZERO HORA. Condições meteorológicas adversas dificultam buscas na Antártica. **Zero Hora - Jornal do RS com notícias, esportes, colunistas e mais**, 2012. Disponível em: <<http://zerohora.clicrbs.com.br/rs/noticia/2012/02/condicoes-meteorologicas-adversas-dificultam-buscas-na-antartica-3676172.html>>. Acesso em: 2012.

APÊNDICE A – Relatório de Qualidade de Energia



INCT-APA-MÓDULO 4

ARQUIANTAR

UFES

**LEPAC- Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamentos
Elétricos**

Relatório de Qualidade de Energia EACF Medição no Gerador 1

Tiago Malavazi de Christo

tmalavazi@ifes.edu.br

Vitória-ES, 2011

Relatório de qualidade de energia da Estação Antártica Comandante Ferraz com base em dados registrados durante a OPERANTAR XXIX.

Os dados presentes neste documento fazem parte de um conjunto de registros da pesquisa de energias do grupo ARQUIANTAR coordenado pela Dra. Cristina Engel.

Contatos:

tmalavazi@ifes.edu.br

jussara@ele.ufes.br, d.simonetti@ele.ufes.br

engel@npd.ufes.br

Informações:

Instalador/Responsável: Eng. Tiago Malavazi de Christo

Ponto de medição: Saída do Gerador 1

Período: 00h00min de 11/01/2011 a 23h54min de 17/01/2011.

Intervalo de amostragem: 100ms

Equipamento: Analisador de Energia marca Embrasul, modelo RE6000, ponteira de corrente modelo TI3000

Software de análise: ANL6000 1.8

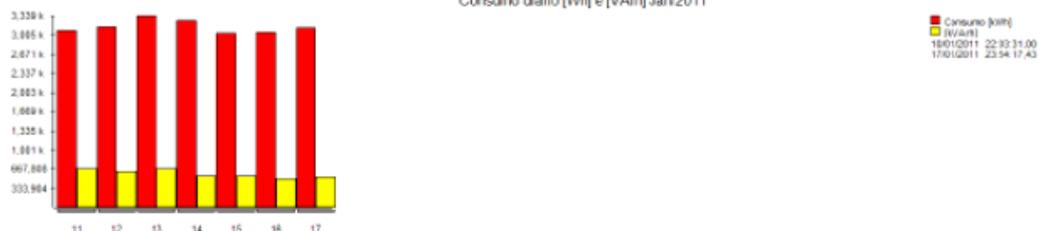
Conteúdo

Item 1 -	Gráficos das tensões, correntes e consumo de energia no período de 11/01/2011 a 17/01/2011.....	4
Item 2 -	Valores médios diários.....	5
Item 3 -	Consumo diário de energia.....	6
Item 4 -	Gráfico de Potências Ativa, Reativa e Aparente.....	8
Item 5 -	Gráfico de Fator de Potência.....	8
Item 6 -	Gráfico das tensões de linha.....	9
Item 7 -	Gráfico das tensões de fase.....	9
Item 8 -	Gráfico das correntes de fase.....	9
Item 9 -	Harmônicas: Ocorrência das 3ª e 5ª harmônicas de corrente nas fases A, B e C.....	10
Item 10 -	Harmônicas: Ocorrência das 7ª, 9ª e 11ª harmônicas de corrente nas fases A, B e C.....	11
Item 11 -	Harmônicas: Ocorrência das 3ª e 5ª harmônicas de tensão nas fases A, B e C.....	12
Item 12 -	Harmônicas: Ocorrência das 7ª, 9ª e 11ª harmônicas de tensão nas fases A, B e C.....	13
Item 13 -	Distorção harmônica total de corrente nas fases A, B e C.....	14
Item 14 -	Distorção harmônica total de tensão nas fases A, B e C.....	15
Item 15 -	Desbalanceamento de tensão conforme norma IEC.....	15
Item 16 -	Variações na Frequência da rede.....	15
Item 17 -	Formas de ondas de tensão e corrente das fases A, B e C.....	16
Item 18 -	Distribuição de tensões.....	17
Item 19 -	DEFINIÇÕES.....	18

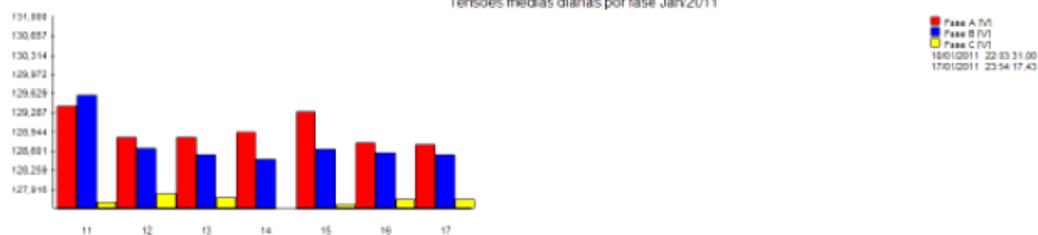
Item 1 - Gráficos das tensões, correntes e consumo de energia no período de 11/01/2011 a 17/01/2011

EMBRASLL 2E200DBH N.5.98000004 V.S.2,16 ANL 1.8 (100 milisegundos)

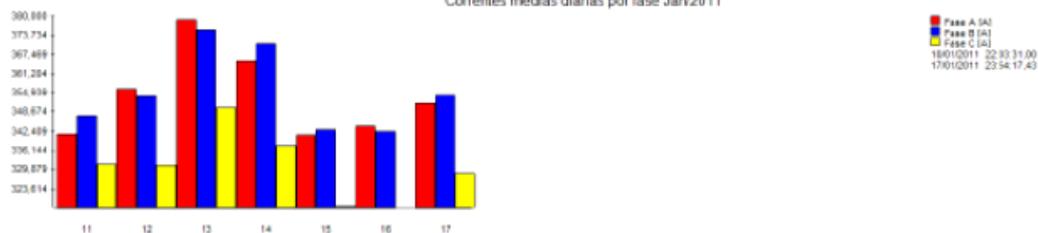
Consumo diário [Wh] e [VAh] Jan2011



Tensões médias diárias por fase Jan2011



Correntes médias diárias por fase Jan2011



Consumo diário Jan2011



Consumo[kWh] e [kVAh] por fase



Item 2 - Valores médios diários

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000664 V.S.2.16 ANL 1,8 (100 milissegundos)

RELATÓRIO DE VALORES MÉDIOS DIÁRIOS (Integração = 100 milissegundos)

Intervalo considerado:

terça-feira 11/01/2011 00:00:00,01 até segunda-feira 17/01/2011 23:54:17,03

Grandezas médias no dia 11/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	129,402	129,604	127,680
Correntes [A]	341,489	347,476	331,422
Potências ativas [kW]	43,721	44,544	40,149
Potências reativas [kVAr]	7,712	7,605	12,535
Potências aparentes [kVA]	44,396	45,189	42,060
Fatores de potência	0,984	0,985	0,954

Grandezas médias no dia 12/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	128,852	128,652	127,827
Correntes [A]	356,204	353,723	331,100
Potências ativas [kW]	45,732	45,129	40,443
Potências reativas [kVAr]	6,845	8,038	11,496
Potências aparentes [kVA]	46,241	45,839	42,045
Fatores de potência	0,988	0,984	0,961

Grandezas médias no dia 13/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	128,845	128,543	127,761
Correntes [A]	378,719	375,581	350,115
Potências ativas [kW]	48,574	47,816	42,774
Potências reativas [kVAr]	7,323	8,684	11,977
Potências aparentes [kVA]	49,123	48,598	44,420
Fatores de potência	0,988	0,983	0,962

Grandezas médias no dia 14/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	128,939	128,454	127,574
Correntes [A]	365,163	371,010	337,543
Potências ativas [kW]	47,133	47,402	41,336
Potências reativas [kVAr]	4,989	7,135	10,858
Potências aparentes [kVA]	47,397	47,936	42,739
Fatores de potência	0,984	0,988	0,967

Grandezas médias no dia 15/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	129,306	128,641	127,646
Correntes [A]	341,291	342,929	318,074
Potências ativas [kW]	43,974	43,938	39,045
Potências reativas [kVAr]	5,604	6,854	10,262
Potências aparentes [kVA]	44,330	44,470	40,371
Fatores de potência	0,991	0,988	0,967

Grandezas médias no dia 16/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	128,746	128,568	127,727
Correntes [A]	344,021	342,280	317,349
Potências ativas [kW]	44,349	43,864	39,151
Potências reativas [kVAr]	5,051	6,462	9,480
Potências aparentes [kVA]	44,635	44,337	40,282
Fatores de potência	0,993	0,989	0,971

Grandezas médias no dia 17/01/2011

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	128,711	128,532	127,731
Correntes [A]	351,404	353,996	328,633
Potências ativas [kW]	45,283	45,377	40,386
Potências reativas [kVAr]	5,366	6,529	10,231
Potências aparentes [kVA]	45,600	45,845	41,662
Fatores de potência	0,993	0,989	0,969

Item 3 - Consumo diário de energia

EMBRASUL RE6000/B/H N.S.:96000664 V.S.2.16 ANL 1,8 (100 milissegundos)

RELATÓRIO DIÁRIO (Integração = 100 milissegundos)

Intervalo considerado:

terça-feira 11/01/2011 00:00:00,01 até segunda-feira 17/01/2011 23:54:17,03

Faixas de horário estabelecidas no software

Intervalo - Fora de ponta: 00:00 - 18:00

Intervalo - Ponta: 18:00 - 24:00

Intervalo - Reservado:

TERÇA-FEIRA 11/01/2011

Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVAh]	FP
Ponta	788,849	0,000	172,333	0,976 ind
Fora de ponta	2,293 k	0,000	496,215	0,977 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,082 k	0,000	668,548	0,977 ind

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]			Ponta [kW]		
11/01/2011	12:13:57,64	169,113	11/01/2011	20:11:16,67	162,946
11/01/2011	16:12:46,06	165,235	11/01/2011	20:11:07,07	159,376
11/01/2011	12:13:57,74	164,389	11/01/2011	20:44:04,57	159,183

Fora de ponta [kVAh]			Ponta [kVAh]		
11/01/2011	10:27:53,14	63,071	11/01/2011	18:06:58,56	54,860
11/01/2011	09:06:06,63	63,024	11/01/2011	18:55:31,86	54,054
11/01/2011	10:28:02,74	62,091	11/01/2011	22:54:11,98	52,059

QUARTA-FEIRA 12/01/2011

Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVAh]	FP
Ponta	850,260	0,000	159,716	0,982 ind
Fora de ponta	2,301 k	0,000	473,464	0,979 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,151 k	0,000	633,181	0,980 ind

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]			Ponta [kW]		
12/01/2011	17:18:57,33	168,525	12/01/2011	18:44:40,24	173,183
12/01/2011	16:17:35,93	167,250	12/01/2011	18:05:14,24	171,816
12/01/2011	17:19:14,03	165,839	12/01/2011	18:23:41,14	171,754

Fora de ponta [kVAh]			Ponta [kVAh]		
12/01/2011	01:23:20,38	-833,021	12/01/2011	19:14:12,64	52,144
12/01/2011	15:49:23,93	65,708	12/01/2011	18:44:40,24	51,980
12/01/2011	07:54:35,40	52,860	12/01/2011	18:10:42,04	51,242

QUINTA-FEIRA 13/01/2011

Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVAh]	FP
Ponta	852,106	0,000	158,470	0,983 ind
Fora de ponta	2,486 k	0,000	513,112	0,979 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,339 k	0,000	671,582	0,980 ind

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]			Ponta [kW]		
13/01/2011	09:47:46,78	180,211	13/01/2011	19:16:40,32	173,634
13/01/2011	11:19:12,79	178,830	13/01/2011	18:21:38,01	171,734
13/01/2011	11:45:39,19	176,833	13/01/2011	18:21:28,51	170,077

Fora de ponta [kVAh]			Ponta [kVAh]		
13/01/2011	16:28:51,11	73,918	13/01/2011	18:21:28,51	61,926
13/01/2011	17:55:02,81	67,502	13/01/2011	18:26:39,11	53,970
13/01/2011	16:11:05,30	60,450	13/01/2011	18:26:39,91	53,953

SEXTA-FEIRA 14/01/2011

Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVArh]	FP
Ponta	831,728	0,000	127,528	0,988 ind
Fora de ponta	2,430 k	0,000	423,962	0,985 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,261 k	0,000	551,490	0,986 ind

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]		Ponta [kW]	
14/01/2011	11:29:52,06 180,451	14/01/2011	19:40:43,29 193,939
14/01/2011	09:37:28,56 175,836	14/01/2011	19:40:43,39 191,164
14/01/2011	11:29:42,46 175,577	14/01/2011	19:54:03,59 173,371

Fora de ponta [kVAr]		Ponta [kVAr]	
14/01/2011	11:29:52,06 58,278	14/01/2011	19:40:43,39 97,324
14/01/2011	11:29:42,46 56,920	14/01/2011	19:40:43,29 84,782
14/01/2011	11:36:17,27 53,608	14/01/2011	19:54:03,59 63,979

SÁBADO 15/01/2011

Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVArh]	FP
Ponta	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Fora de ponta	3,046 k	0,000	545,316	0,984 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,046 k	0,000	545,316	0,984 ind

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]		Ponta [kW]	
15/01/2011	18:41:29,46 156,197		
15/01/2011	23:23:20,18 155,993		
15/01/2011	20:08:35,47 156,674		

Fora de ponta [kVAr]		Ponta [kVAr]	
15/01/2011	17:38:07,26 57,199		
15/01/2011	10:08:51,84 54,881		
15/01/2011	10:08:42,24 54,272		

DOMINGO 16/01/2011

Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVArh]	FP
Ponta	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Fora de ponta	3,056 k	0,000	503,615	0,986 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,056 k	0,000	503,615	0,986 ind

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]		Ponta [kW]	
16/01/2011	19:46:34,74 158,459		
16/01/2011	09:09:01,71 156,444		
16/01/2011	12:05:42,52 155,893		

Fora de ponta [kVAr]		Ponta [kVAr]	
16/01/2011	03:09:23,89 46,611		
16/01/2011	02:17:36,89 46,373		
16/01/2011	01:54:03,38 45,984		

SEGUNDA-FEIRA 17/01/2011

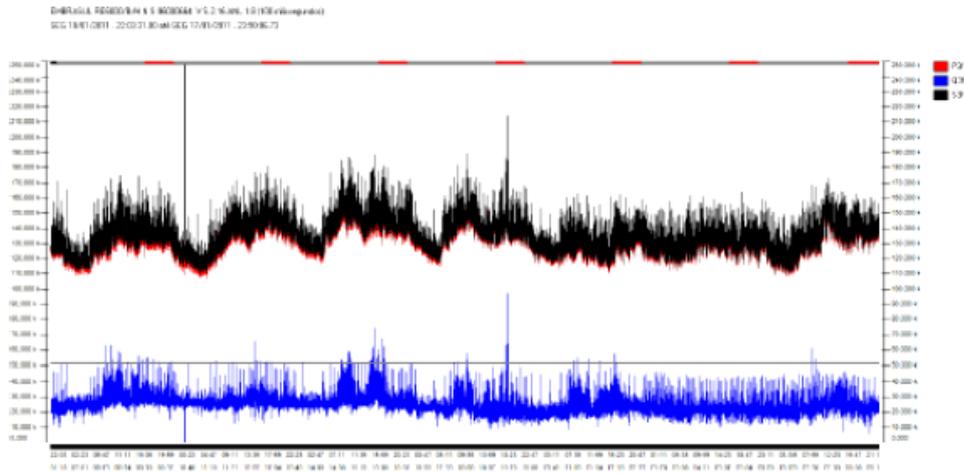
Horário	Consumo [kWh]	Geração [kWh]	Reativa [kVArh]	FP
Ponta	808,260	0,000	131,677	0,986 ind
Fora de ponta	2,323 k	0,000	397,326	0,985 ind
Reservado	0,000	0,000	0,000	1,000 ind
Total	3,132 k	0,000	529,004	0,986 ind

Demandas máximas por horário

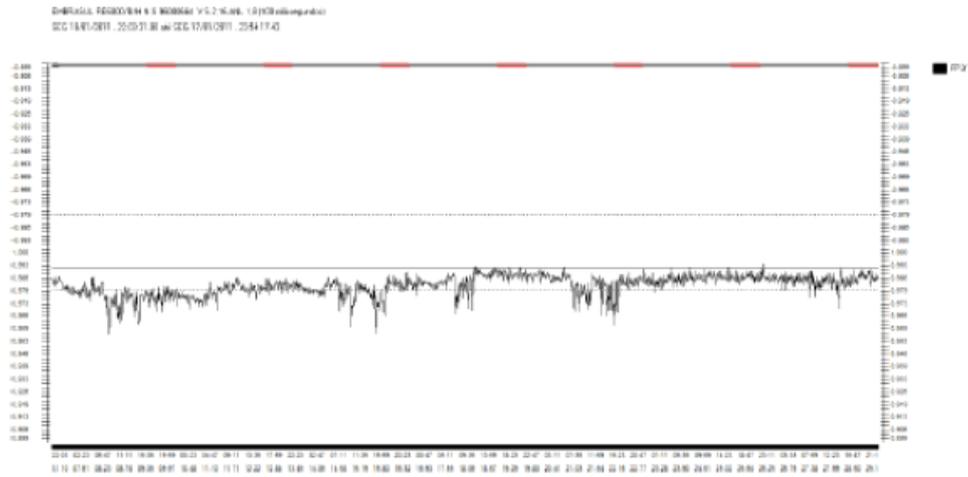
Fora de ponta [kW]		Ponta [kW]	
17/01/2011	13:27:36,20 167,639	17/01/2011	18:48:34,21 159,665
17/01/2011	13:17:39,79 164,634	17/01/2011	21:54:59,42 158,408
17/01/2011	12:30:35,29 163,807	17/01/2011	20:26:14,02 156,765

Fora de ponta [kVAr]		Ponta [kVAr]	
17/01/2011	09:44:47,38 61,126	17/01/2011	18:43:03,91 44,382
17/01/2011	10:36:37,19 54,065	17/01/2011	18:10:03,21 43,679
17/01/2011	10:36:37,29 52,214	17/01/2011	22:41:09,12 43,378

Item 4 - Gráfico de Potências Ativa, Reativa e Aparente

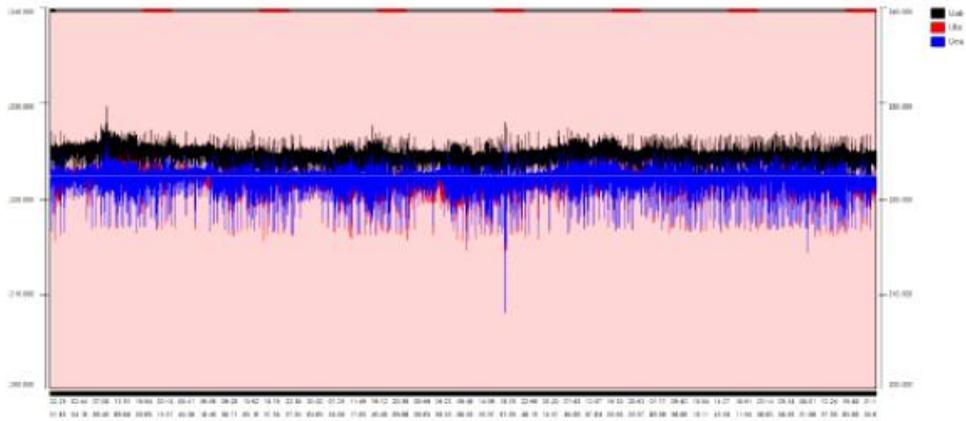


Item 5 - Gráfico de Fator de Potência



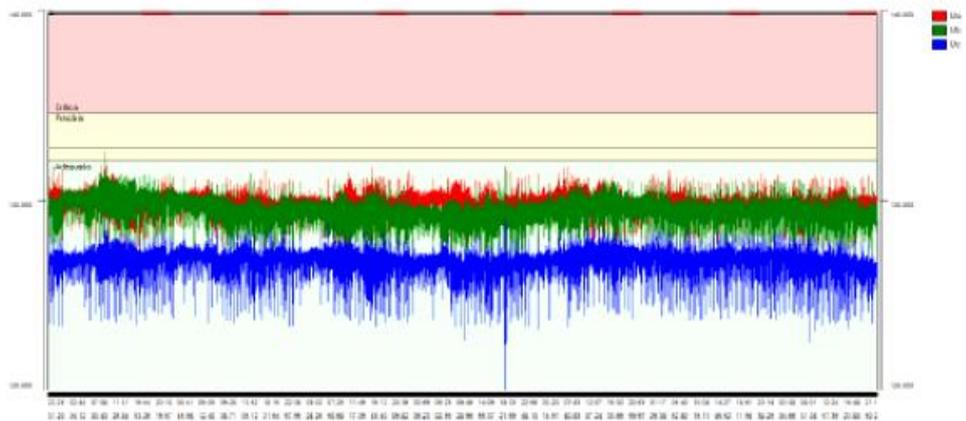
Item 6 - Gráfico das tensões de linha

D:\BFGA_0000004_4_5_000004_V.5.2.14.04_1.0100.voltagem.dat
 SGG 18/01/2011 - 22:26:31.04 SGG 17/01/2011 - 22:54:17.42



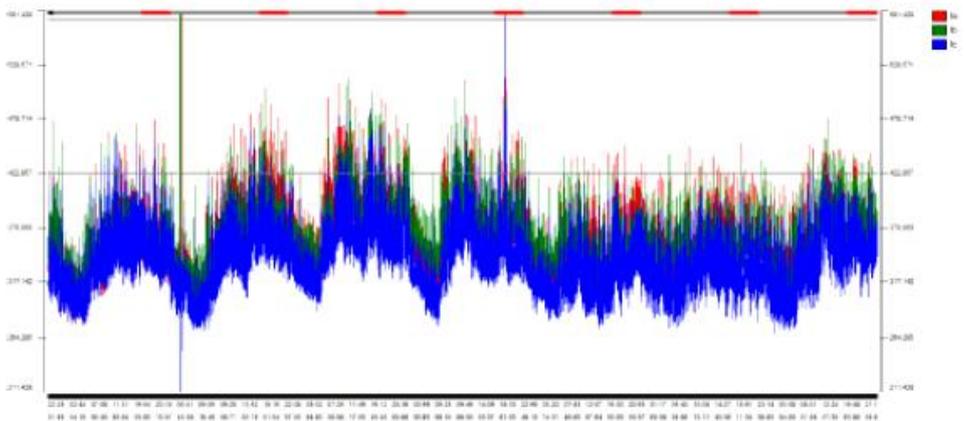
Item 7 - Gráfico das tensões de fase

D:\BFGA_0000004_4_5_000004_V.5.2.14.04_1.0100.voltagem.dat
 SGG 18/01/2011 - 22:26:31.04 SGG 17/01/2011 - 22:54:17.42

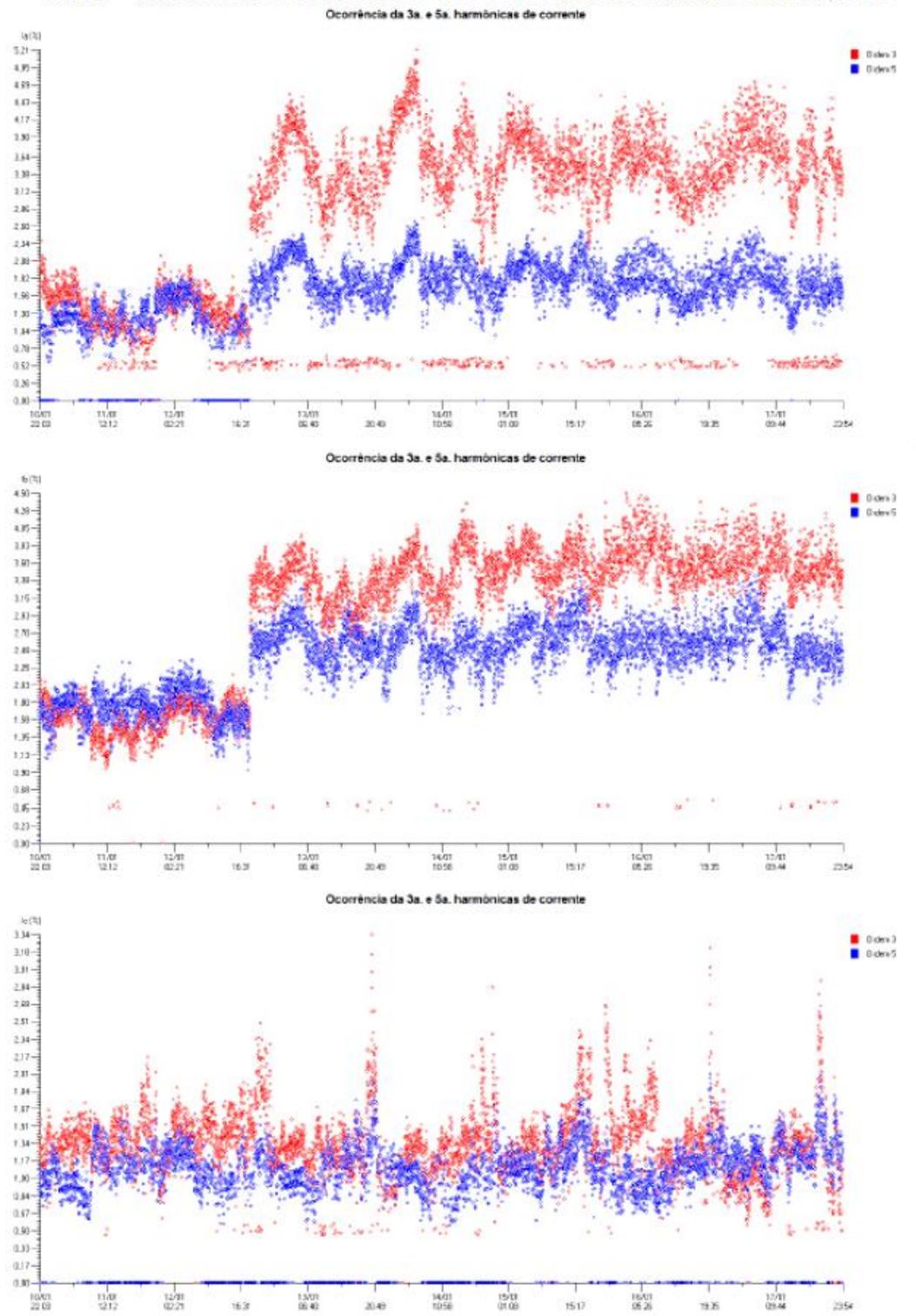


Item 8 - Gráfico das correntes de fase

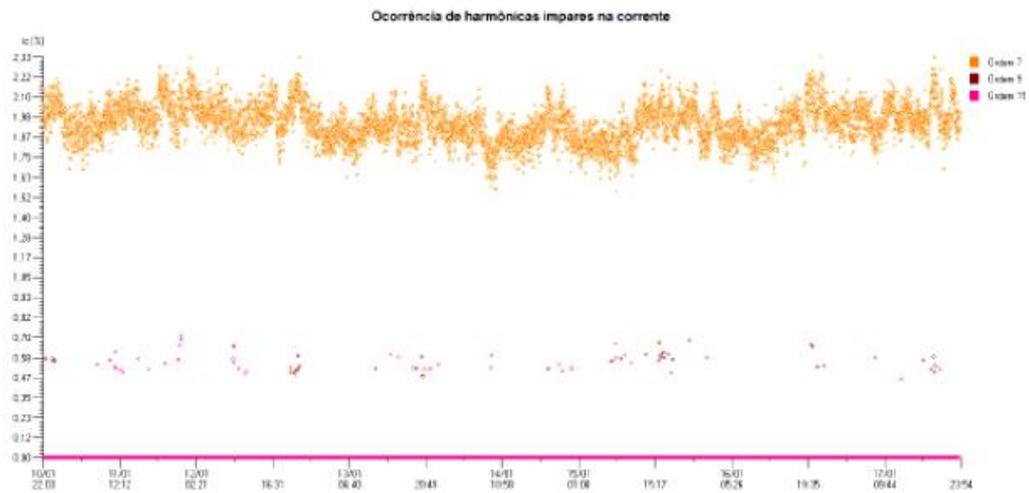
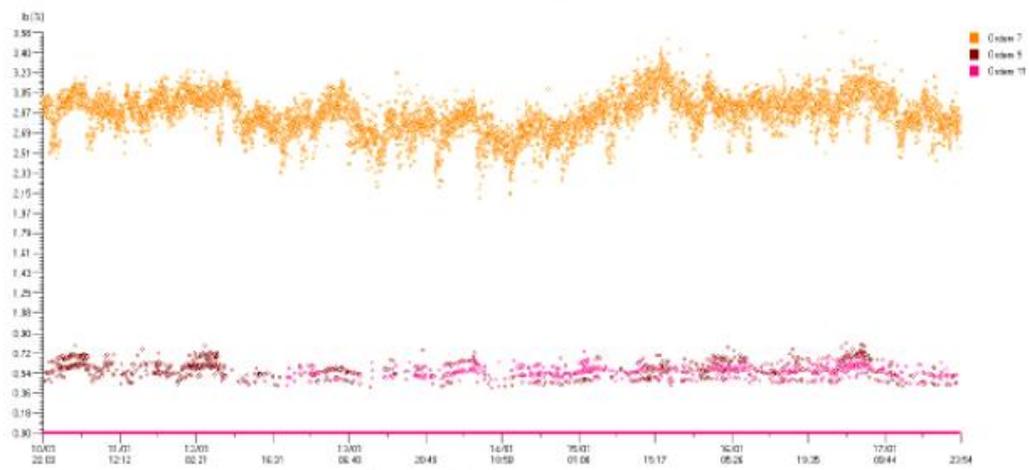
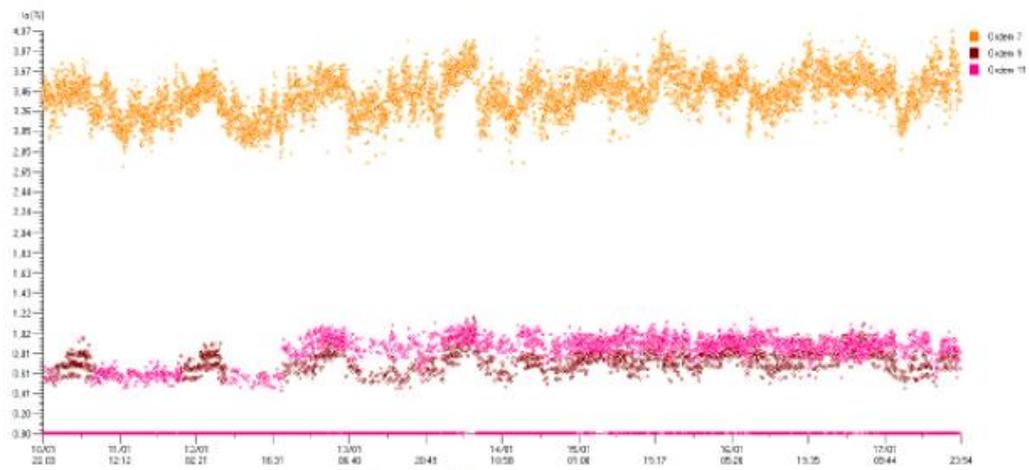
D:\BFGA_0000004_4_5_000004_V.5.2.14.04_1.0100.voltagem.dat
 SGG 18/01/2011 - 22:26:31.04 SGG 17/01/2011 - 22:54:17.42



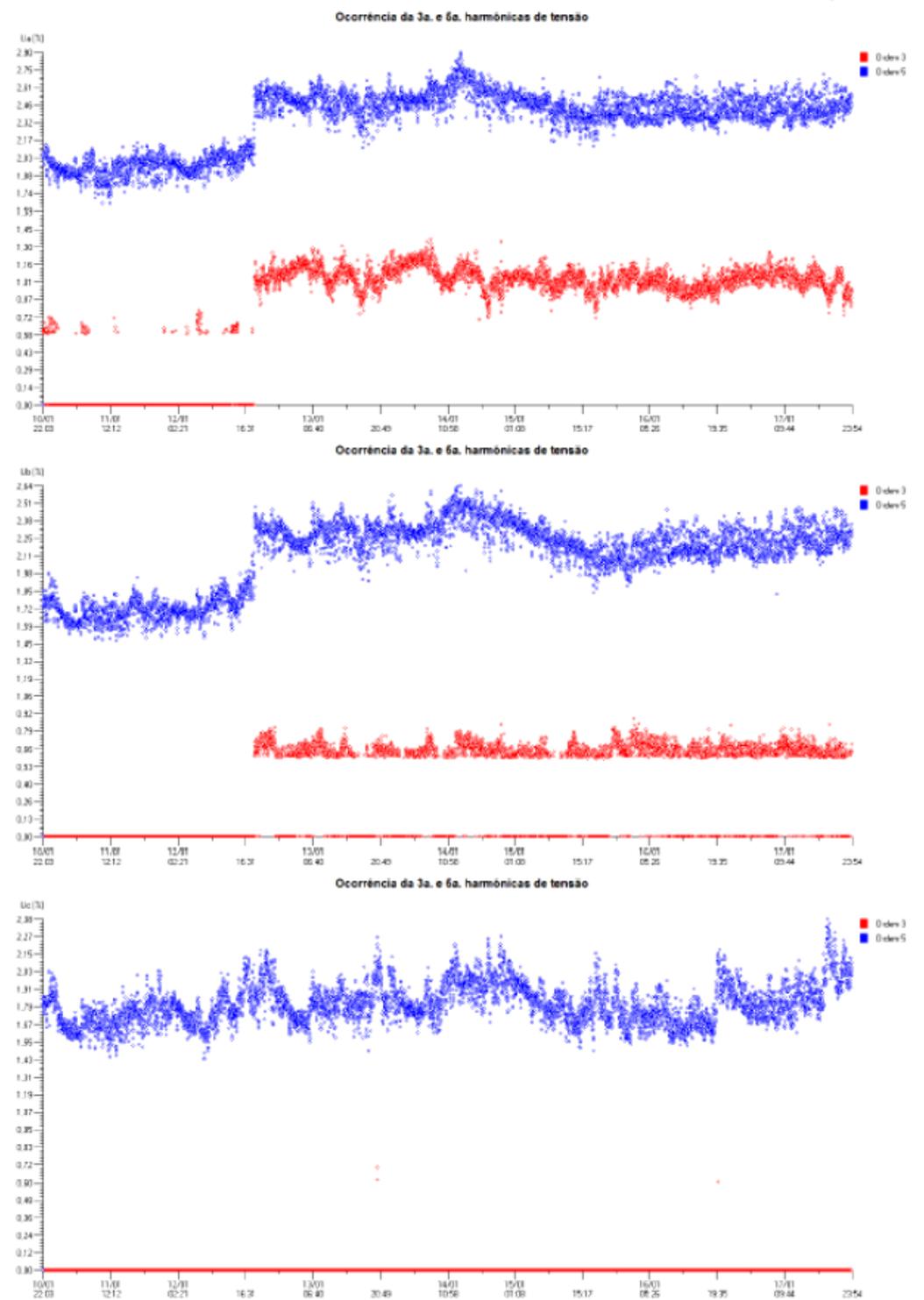
Item 9 - Harmônicas: Ocorrência das 3ª e 5ª harmônicas de corrente nas fases A, B e C



Item 10 - Harmônicas: Ocorrência das 7ª, 9ª e 11ª harmônicas de corrente nas fases A, B e C
Ocorrência de harmônicas ímpares na corrente



Item 11 - Harmônicas: Ocorrência das 3ª e 5ª harmônicas de tensão nas fases A, B e C

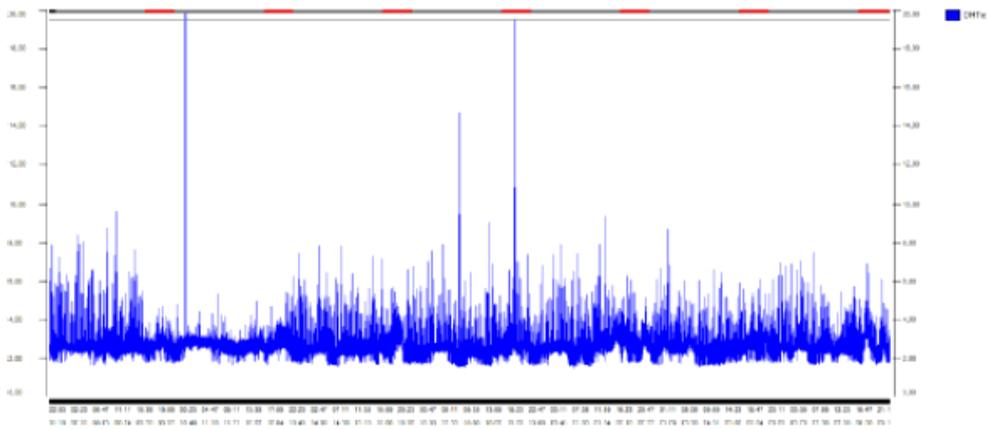
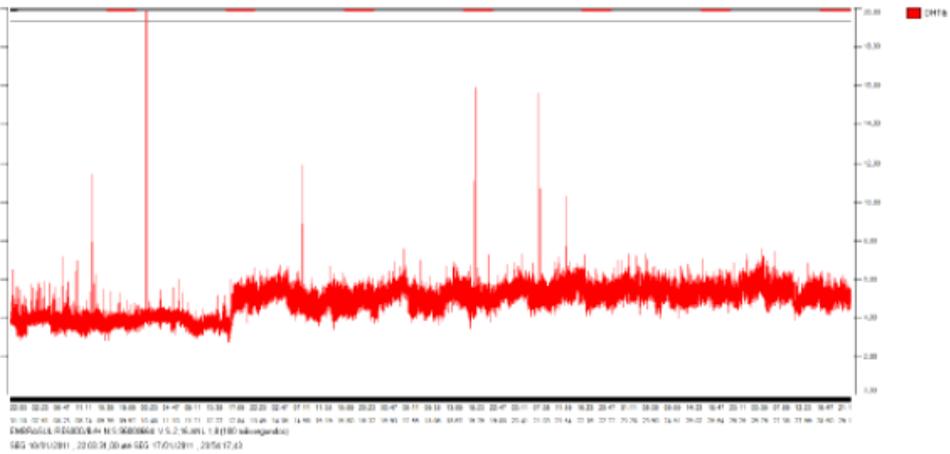
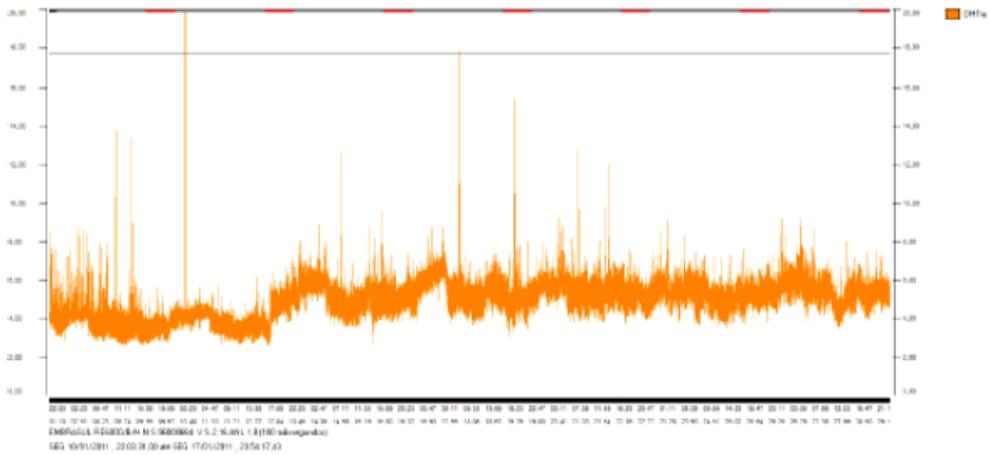


Item 12 - Harmônicas: Ocorrência das 7ª, 9ª e 11ª harmônicas de tensão nas fases A, B e C



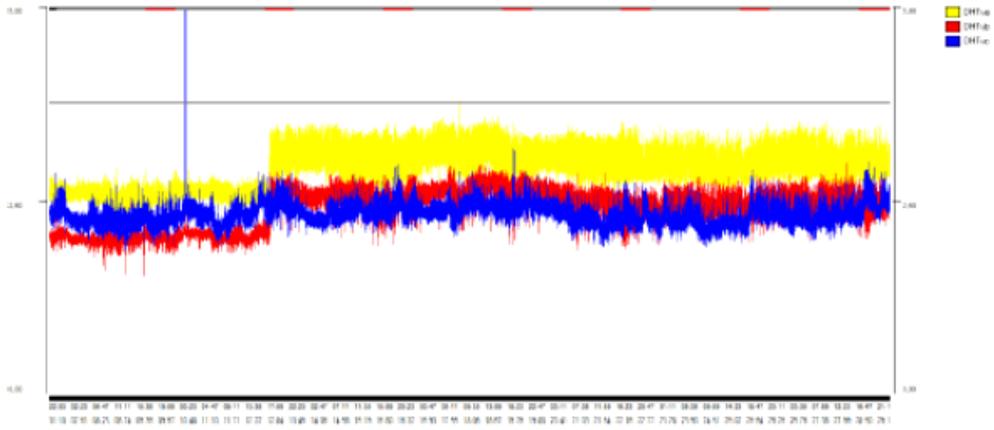
Item 13 - Distorção harmônica total de corrente nas fases A, B e C

ENERSUL REGISTRO N° 5.9000864 V 5.2.9.001.1 (100) kilowatt
 SCS 10/1/2011 - 20:03:00 ao SCS 17/6/2011 - 20:56:17.0



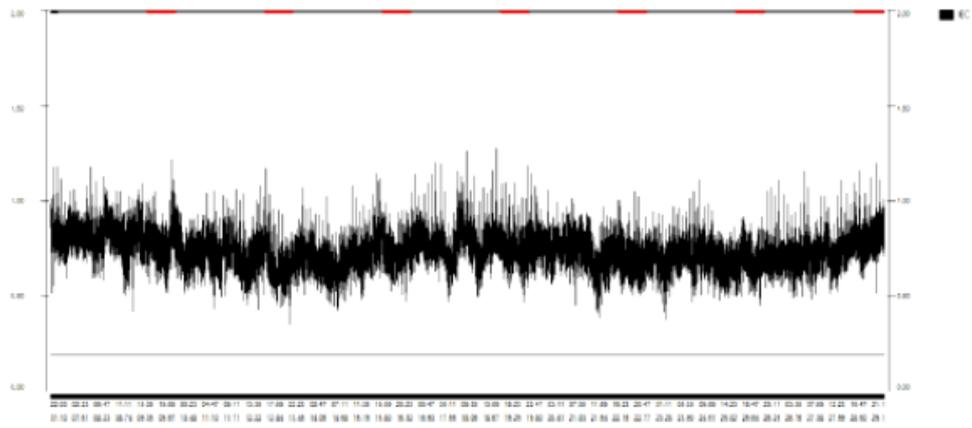
Item 14 - Distorção harmônica total de tensão nas fases A, B e C

ENERGIA REGIÃO Sudeste S 5000000 V 5,2 kV, 1,1 (10) subestações
 SG 10/1/011 - 22:02:30 em SG 17/01/011 - 22:54:17:43



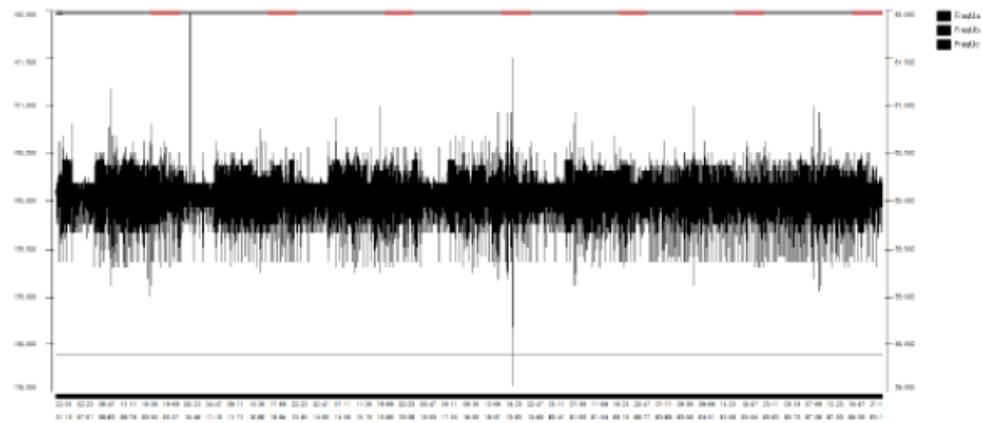
Item 15 - Desbalanceamento de tensão conforme norma IEC

ENERGIA REGIÃO Sudeste S 5000000 V 5,2 kV, 1,1 (10) subestações
 SG 10/1/011 - 22:02:30 em SG 17/01/011 - 22:54:17:43



Item 16 - Variações na Freqüência da rede

ENERGIA REGIÃO Sudeste S 5000000 V 5,2 kV, 1,1 (10) subestações
 SG 10/1/011 - 22:02:30 em SG 17/01/011 - 22:54:17:43



Item 17 - Formas de ondas de tensão e corrente das fases A, B e C

EMBRASUL RE0000/0/11 N 5 00000064 V 5 2,16 ANL 1,0 (100 microssegundos)
Sinal de Tensão - fase A / sábado 15/01/2011 13:28:54,00



Sinal de Corrente - fase A / sábado 15/01/2011 13:28:54,00



Sinal de Tensão - fase B / sábado 15/01/2011 13:28:54,00



Sinal de Corrente - fase B / sábado 15/01/2011 13:28:54,00



Sinal de Tensão - fase C / sábado 15/01/2011 13:28:54,00



Sinal de Corrente - fase C / sábado 15/01/2011 13:28:54,00



Item 18 - Distribuição de tensões

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000664 V.5.2,16 ANL 1,8 (100 milissegundos)

terça-feira 11/01/2011 00:00:00,01 até segunda-feira 17/01/2011 23:54:17,03 (100 milissegundos)

Tensão nominal: 127,00 V Tensão zero: 12,69 V

Faixa adequada: 116,67 V <= Tensão <= 132,08 V

Número de amostras válidas utilizadas para o cálculo de DRP e DRC: 6114460

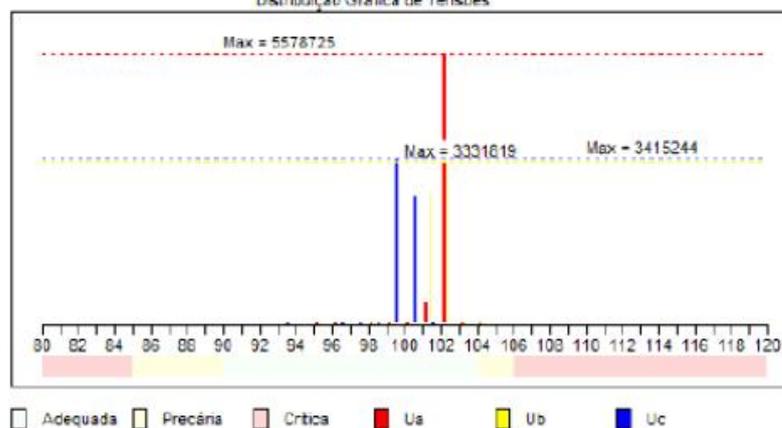
Faixas precárias: (109,22 V <= tensão < 116,67 V) e (132,08 V < tensão <= 134,62 V)

Faixas críticas: (tensão < 109,22 V) e (tensão > 134,62 V)

	Ua	Ub	Uc
Total de leituras:	6044565	6044565	6044565
Leituras em queda:	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras zero:	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras válidas:	(6044565) 100,00 %	(6044565) 100,00 %	(6044565) 100,00 %
Leituras adequadas:	(6044564) 100,00 %	(6044564) 100,00 %	(6044565) 100,00 %
Leituras precárias (inferior):	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras precárias (superior):	(1) 0,00 %	(1) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras precárias (total):	(1) 0,00 %	(1) 0,00 %	(0) 0,00 %
DRP calculado:	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Leituras críticas (inferior):	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras críticas (superior):	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras críticas (total):	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
DRC calculado:	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Tensão média:	129,99 V	129,60 V	126,94 V
Tensão máxima:	132,58 V	132,61 V	129,11 V
Tensão mínima:	121,53 V	121,69 V	118,74 V

Faixas (%) (valor)	Ua (%)	Ub (%)	Uc (%)	Faixas (%) (valor)	Ua (%)	Ub (%)	Uc (%)
< 80 % (101,60 V)	0,00	0,00	0,00	100 % (127,00 V)	0,01	0,12	43,48
80 % (101,60 V)	0,00	0,00	0,00	101 % (128,27 V)	7,63	44,73	0,00
81 % (102,87 V)	0,00	0,00	0,00	102 % (129,54 V)	52,29	55,12	0,00
82 % (104,14 V)	0,00	0,00	0,00	103 % (130,81 V)	0,07	0,02	0,00
83 % (105,41 V)	0,00	0,00	0,00	104 % (132,08 V)	0,00	0,00	0,00
84 % (106,68 V)	0,00	0,00	0,00	105 % (133,35 V)	0,00	0,00	0,00
85 % (107,95 V)	0,00	0,00	0,00	106 % (134,62 V)	0,00	0,00	0,00
86 % (109,22 V)	0,00	0,00	0,00	107 % (135,89 V)	0,00	0,00	0,00
87 % (110,49 V)	0,00	0,00	0,00	108 % (137,16 V)	0,00	0,00	0,00
88 % (111,76 V)	0,00	0,00	0,00	109 % (138,43 V)	0,00	0,00	0,00
89 % (113,03 V)	0,00	0,00	0,00	110 % (139,70 V)	0,00	0,00	0,00
90 % (114,30 V)	0,00	0,00	0,00	111 % (140,97 V)	0,00	0,00	0,00
91 % (115,57 V)	0,00	0,00	0,00	112 % (142,24 V)	0,00	0,00	0,00
92 % (116,84 V)	0,00	0,00	0,00	113 % (143,51 V)	0,00	0,00	0,00
93 % (118,11 V)	0,00	0,00	0,00	114 % (144,78 V)	0,00	0,00	0,00
94 % (119,38 V)	0,00	0,00	0,00	115 % (146,05 V)	0,00	0,00	0,00
95 % (120,65 V)	0,00	0,00	0,00	116 % (147,32 V)	0,00	0,00	0,00
96 % (121,92 V)	0,00	0,00	0,00	117 % (148,59 V)	0,00	0,00	0,00
97 % (123,19 V)	0,00	0,00	0,00	118 % (149,86 V)	0,00	0,00	0,00
98 % (124,46 V)	0,00	0,00	0,02	119 % (151,13 V)	0,00	0,00	0,00
99 % (125,73 V)	0,00	0,00	56,50	>120 % (152,40 V)	0,00	0,00	0,00

Distribuição Gráfica de Tensões



Item 19 - DEFINIÇÕES

AS INFORMAÇÕES E CONCEITOS CONTIDOS NESTE TEXTO REFEREM-SE À RESOLUÇÃO No. 505, DE 26 DE NOVEMBRO DE 2001, EDITADA PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, NÃO SENDO UMA CÓPIA INTEGRAL DA MESMA.

Leituras válidas: valor de tensão obtido de leitura sem ocorrência de interrupção de energia elétrica no período de observação

Período de observação: período de tempo, expresso em horas, a ser utilizado para a medição de tensão

Ponto de conexão: conjunto de equipamentos e materiais que se destinam a estabelecer a conexão elétrica entre dois sistemas

Ponto de entrega: ponto de conexão do sistema elétrico da concessionária com as instalações elétricas da unidade consumidora, caracterizando-se com o limite de responsabilidade do atendimento.

Rede Básica: instalações de transmissão pertencentes ao Sistema Elétrico Interligado, identificadas segundo resolução específica da ANEEL

Regime Permanente: intervalo de tempo da leitura de tensão, onde não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura, definido como sendo de 10 (dez) minutos.

Tensão de Atendimento (TA): valor eficaz de tensão no ponto de entrega ou de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada em *adequada*, *precária* ou *crítica*, de acordo com a leitura efetuada, expresso em volts ou quilovolts.

Tensão Contratada (TC): valor eficaz de tensão estabelecido em contrato, expresso em volts ou quilovolts.

Tensão de Leitura (TL): valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtido de medição por meio de equipamentos apropriados, expresso em volts ou quilovolts.

Tensão Não Padronizada (TNP): valor de tensão nominal, expresso em volts ou quilovolts, não referenciado no art. 47 do Decreto no. 41.019 de 1957, com redação dada pelo Decreto no. 97.280, de 1988.

Tensão Nominal (TN): valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado, expresso em volts ou quilovolts.

Unidade Consumidora: conjunto de instalações e equipamentos elétricos caracterizado pelo recebimento de energia elétrica em um só ponto de entrega, com medição individualizada e correspondente a um único consumidor.

Unidade Consumidora atendida em Baixa Tensão: unidade consumidora atendida com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.

Unidade Consumidora atendida em Média Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV.

Unidade Consumidora atendida em Alta Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal igual ou superior a 69 kV.

TENSÕES NOMINAIS

Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN
 $0,91 \text{ TN} \leq \text{TL} \leq 1,04 \text{ TN}$

Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN
 $0,86 \text{ TN} \leq \text{TL} < 0,91 \text{ TN}$
 ou
 $1,04 \text{ TN} < \text{TL} \leq 1,06 \text{ TN}$

Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN
 $\text{TL} < 0,86 \text{ TN}$
 ou
 $\text{TL} > 1,06 \text{ TN}$

LIMITES DE DISTORÇÕES DE TENSÃO DE ACORDO COM A IEEE 519

Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

LIMITES DE DISTORÇÕES DE CORRENTE DE ACORDO COM A IEEE 519

Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g. half-wave converters, are not allowed.

* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

Where

- I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
- I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.
- TDD = Total demand distortion (RSS), harmonic current distortion in % of maximum demand load current (15 or 30 min demand).
- PCC = Point of common coupling.

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System. Project IEEE-519.

ANEXO A – Dados Coletados

Tabela A.1 - Cronograma de medidas do analisador de energia.

DATA	LOCAL
15/12/2010 a 22/12/2010	GERADOR, AMOSTRAGENS DE 3h
23/12/2010 a 26/12/2010	QUADRO ELÉTRICO PRINCIPAL (QEP)
27/12/2010	DISJUNTOR GERAL DO PAINEL DE CARGAS VITAIS NO QUADRO ELÉTRICO DE EMERGÊNCIA
28/12/2010 a 29/12/2010	QUADRO ELÉTRICO DE EMERGÊNCIA
30/12/2010 a 01/01/2011	ENTRADA DO PAINEL DE CARGAS VITAIS
02/01/2011 a 03/01/2011	PAINEL 2F01
04/01/2011 e 05/01/2011	LAGOG SUL
06/01/2011	CARPINTARIA
07/01/2011	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO
08/01/2011	AGUADA E DEPOIS LABORATÓRIO DE QUÍMICA
09/01/2011	METEORO E DEPOIS CENTRAL DE TELECOMUNICAÇÕES
10/01/2011 a 17/01/2011	GERADOR 1, REGISTRO DE UMA SEMANA
18/01/2011 a 19/01/2011	FRIGORÍFICAS 1 E 3

Tabela A.2 - Relação da documentação coletada (copiada).

Material	Tipo de cópia
Manual do Incinerador	Papel
Manual da Caldeira	Papel
Manual dos Geradores	Papel
Manual Frigoríficas	Digital
Planilha de Consumo de Combustíveis	Digital
Plantas Elétricas da Estação	Digital

Tabela A.3 - Relação dos registros fotográficos, local e tipo de registro.

Local	Tipo de registro
Aguada	Foto / Vídeo
Caldeiras	Foto / Vídeo
Carpintaria	Foto
Central de Comunicações	Foto
Caixa de Água	Foto
Estação de tratamento de Esgoto	Foto / Vídeo
Estação da Polônia (ARCTOWISK)	Foto / Vídeo
Frigoríficas	Foto
Incinerador	Foto
Infra estrutura externa	Foto / Vídeo
Kafangoria	Foto
Lagos	Foto
Praça de máquinas	Foto / Vídeo
Refúgio Norte Americano (COPACABANA)	Foto
Sala de secagem	Foto
Tanques e abastecimento	Foto / Vídeo

ANEXO B – Energia Eólica

Teorema de Betz:

Betz supôs que o vento, ao atravessar a área de captação do rotor, sofre uma ação de frenagem que se manifesta em uma expansão das linhas de corrente. As linhas de corrente, que atravessam a área “S” da turbina antes atravessam uma área inferior “S₁” e logo após a turbina, uma área superior “S₂”. Com as velocidades, ocorre o contrário, “V₁” é superior a “V” e “V₂” inferior a “V”. A Figura B.1 ilustra a situação descrita (DELEITO, 1984).

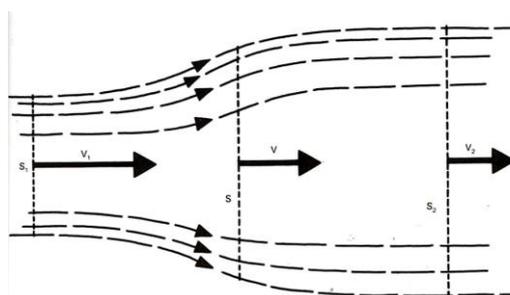


Figura B.1 - Esquema de uma corrente fluida ao atravessar a área de captação de um rotor genérico (DELEITO, 1984).

Considerando as áreas “S₁”, “S” e “S₂” e as velocidades “V₁”, “V” e “V₂”, conforme ilustradas na Figura B.1 e aplicando as equações de continuidade, tem-se:

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{B.1})$$

Seguindo a equação de quantidade de movimento, a força que se exerce sobre a área do disco é igual a variação da quantidade de movimento:

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{B.2})$$

Aplicando a equação da energia e igualando a força pela velocidade no disco:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{B.3})$$

$$E = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{B.4})$$

$$V = \frac{V_1 - V_2}{2} \quad \text{de (B.3) e (B.4)}$$

Substituindo em (B.4)

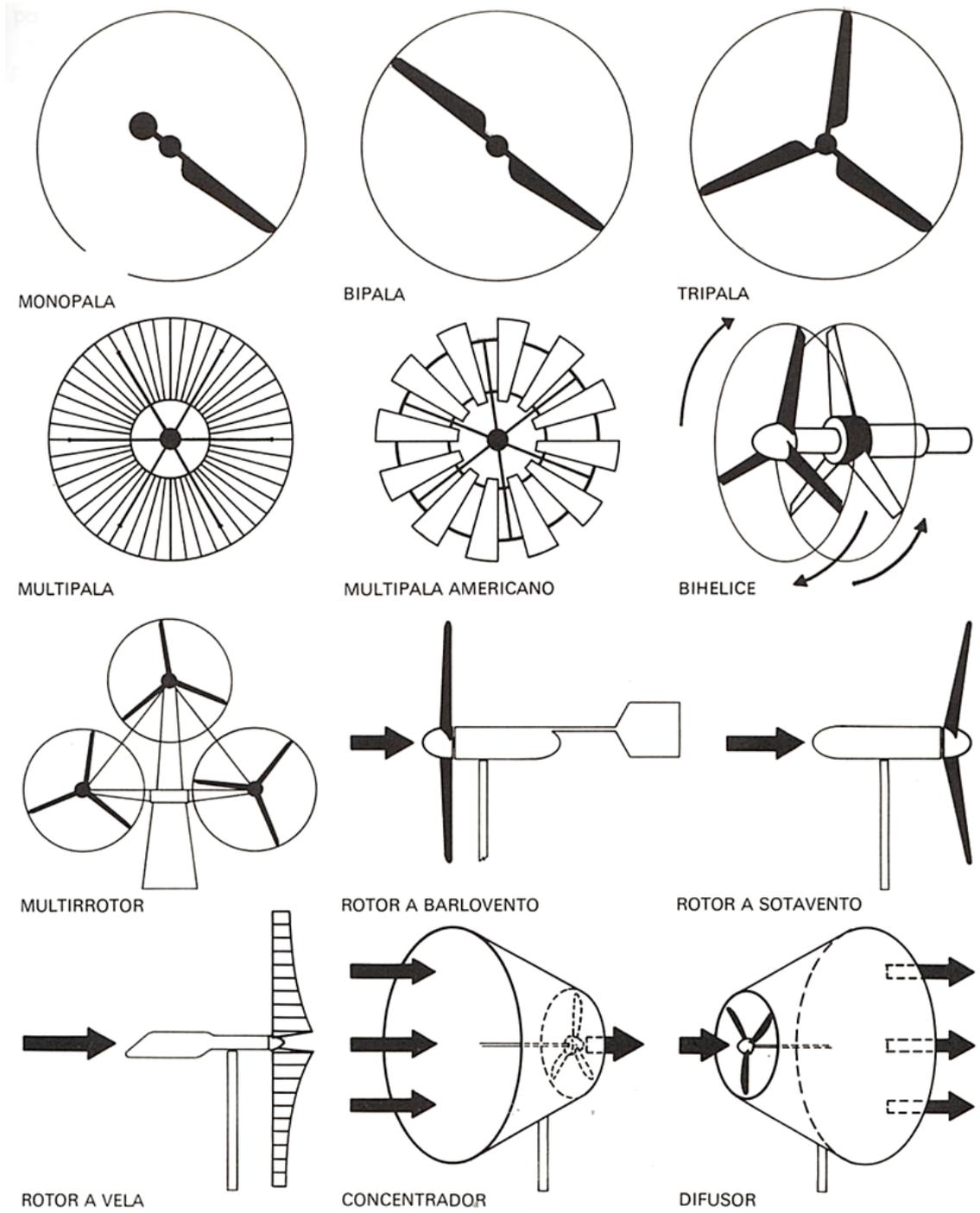
$$E = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{B.5})$$

A potência máxima é obtida quando $\frac{\partial E}{\partial V} = 0$, e isto ocorre quando $V_2 = \frac{1}{3} \cdot V_1$, ou seja, quando o vento sofre uma frenagem equivalente a 2/3 de sua própria velocidade.

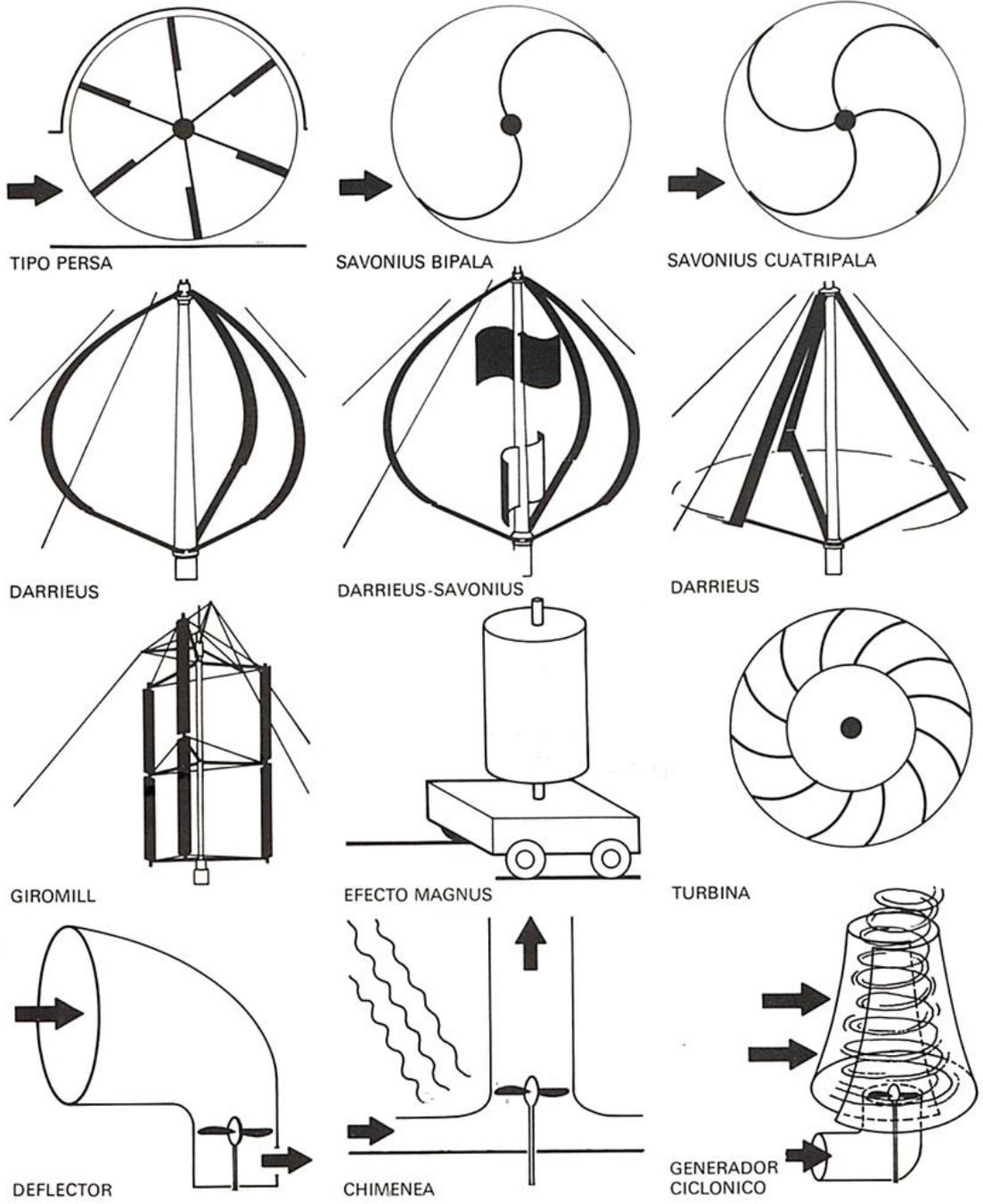
Substituindo em (B.5):

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{16}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 = \frac{16}{27} \cdot \text{Energia do vento}$$

Formatos de turbinas eólicas de eixo horizontal (DELEITO, 1984):



Formatos de turbinas eólicas de eixo vertical (DELEITO, 1984):



Mecanismos de controle aerodinâmico de turbinas eólicas:

Em uma turbina moderna para o controle da velocidade e limitação da potência, são utilizados dois tipos de mecanismos de controle aerodinâmicos, o passivo (controle por estol) e o ativo (controle por passo) (CRESESB-CEPEL, 2012).

No controle por estol, as pás do rotor são fixas em seu ângulo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de estol é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá reduza as forças de sustentação e aumente as forças de arrasto. As menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor, limitando a velocidade da turbina e protegendo o equipamento. Essa solução destaca-se pela estrutura de cubo de rotor simples e menor manutenção devido a um menor número de peças móveis (CRESESB-CEPEL, 2012).

No controle por passo, sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal, diminuindo as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador capture apenas a potência nominal. Essa solução destaca-se por permitir controle de potência ativo sob todas as condições de vento, alcançar a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar e permitir maior produção de energia sob as mesmas condições (CRESESB-CEPEL, 2012).

A Figura B.2 apresenta lado a lado a circulação do vento nas hélices e as respectivas curvas de potência para as tecnologias de controle por estol e por passo.

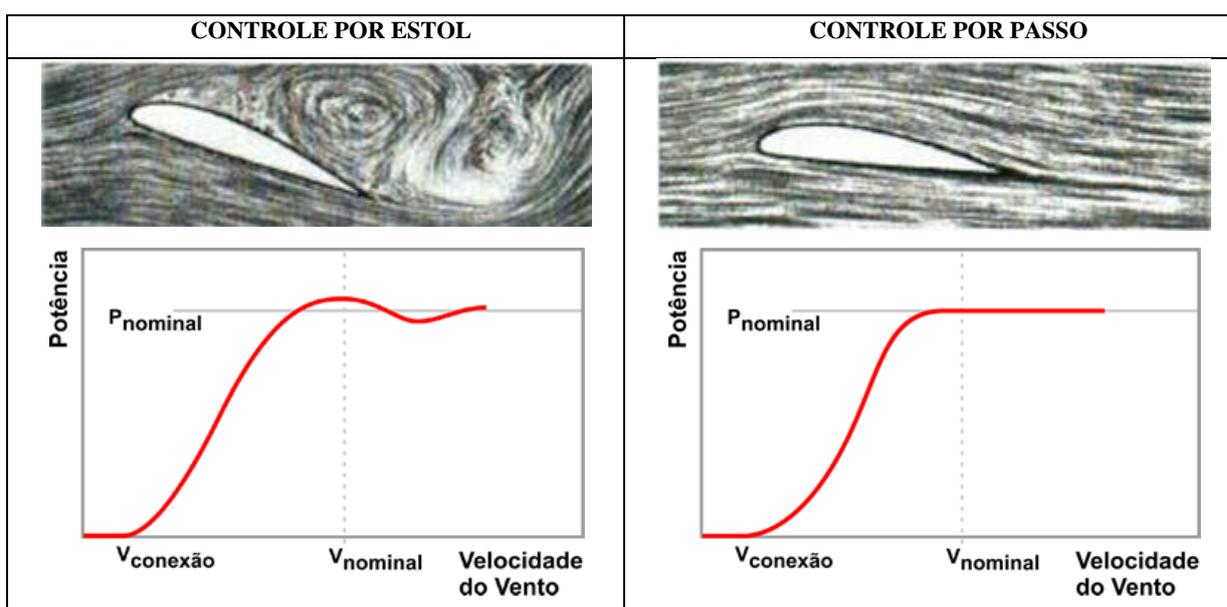
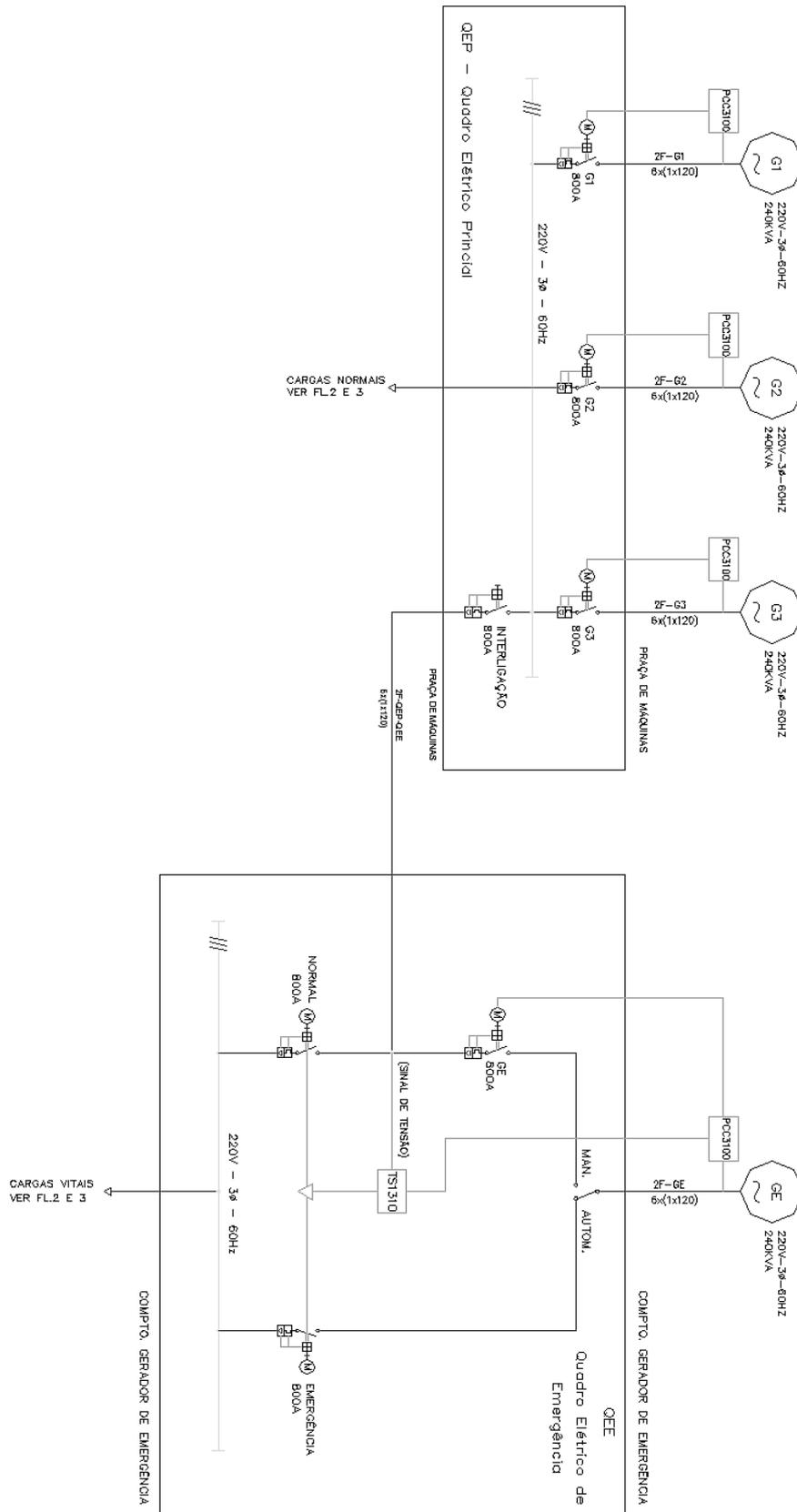


Figura B.2 - Perfil das correntes de vento e característica da curva de potência em função dos mecanismos de controle aerodinâmico de turbinas eólicas, controle por estol e controle por passo (CRESESB-CEPEL, 2012).

ANEXO C – GMG's e Caldeiras

Diagrama de interligação do motogeradores(MB, 2010):



Carta presente no site da Giacomet, fabricante das duas caldeiras que estavam instaladas na EACF(GIACOMET, 2011):

 Programa Antártico Brasileiro
Comando Antártico Comandante Fozz
Av. do Super. 2000 - F. 200 - 01188

Antártica, 10 de Novembro de 1997

Prezado Sr. Thiago,

O Prof. Dair informou-me que o senhor está se recuperando de uma cirurgia. Estimo de caracão uma rápida e franca recuperação.

Estou na Antártica desde o dia 15 de outubro. Da cidade de Pelotas (RS) a Punta Arenas (Chile) são seis (06) horas de vôo no Hercules C-130. E de Punta Arenas a Base Chilena Presidente Frei mais duas horas e meia de vôo, seguido de vinte e cinco minutos de helicóptero a a nossa Estação. Quando cheguei, a neve está praticamente cobrindo a nossa Estação e entramos através de um túnel.

O sistema de calefusão e de aquecimento tem funcionado bem e tem sido elogiado pois aumentou a segurança e o conforto da Estação Antártica Comandante Ferraz. O consumo médio diário é de 186,7 litros/dia nos últimos dez (10) meses. Conforme analisamos na tabela em anexo, o consumo de óleo diesel aumenta nos dias mais frios. De sexta para sábado aumentamos a temperatura externa foi de -16°C .

Observações sobre o sistema de calefusão:

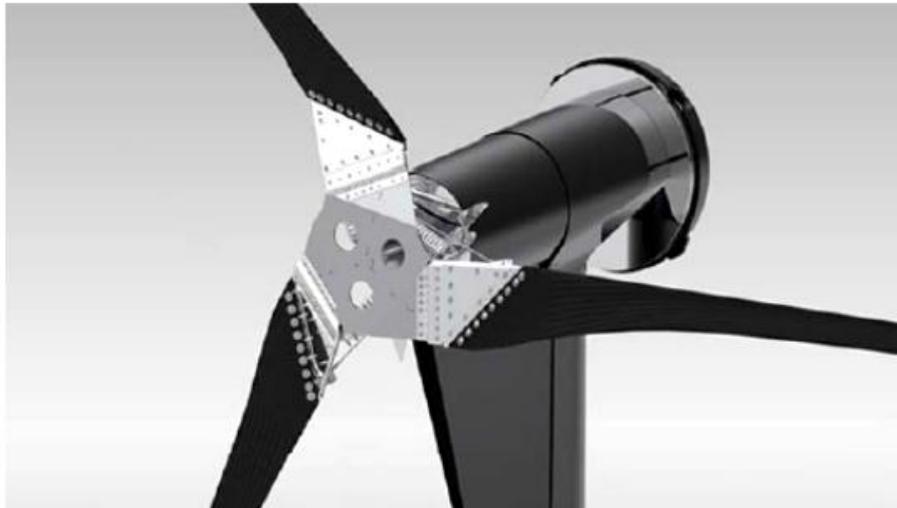
- está funcionando com 50% de anti-congelante
- se a porta do módulo de calefusão fica aberta, aument. o consumo do óleo diesel;
- Quantidade de monóxido de carbono na desc. de gases (Chamine).
- Logo após a partida da caldeira: 168 ppm de CO
- Após cinco (05) minutos de operação: 45 ppm de CO
- Quando entra no sistema (retirado de um radiador para executar uma obra), antes da purga-lo, a pressão no calefusão cai de 1,0 kgf/cm² para 0,5 kgf/cm².
Mais uma vez estimo uma boa recuperação

Atenciosamente
Rubens Rodrigues

ANEXO D – Dados do Aerogerador e Painel Solar



High Performance Wind Turbines –Manufactured by Proven Energy



Proven Energy turbines are robust, reliable and elegant producing energy under the harshest of conditions. Proven Flexible Blade System enables the wind turbine to generate power in light or strong winds. Proven Energy produces a series of 3 wind turbines, each designed to offer sustainable energy solutions across a wide range of industry sectors, from domestic to offshore.

Robust

Proven Energy provides the world's only robust, low maintenance turbine. We work closely with clients in a number of key market sectors to make sure their specific electricity generation needs are met.

Proven Energy's internationally patented turbine has undergone extensive testing under the most rigorous of climate conditions. Our market-leading installations operate successfully throughout the world.

Unlike upwind turbines, the system works with nature and not against it. It lets you get the most out of any wind speed, helping to maximise your investment.





Low Noise

A Proven Energy turbine is designed to minimise noise and maintenance. It has a direct drive generator, which operates without a gearbox. The generator load is continuously monitored to keep the blades rotating at a low speed, whilst optimising power output. Compared with other modern small turbines, the blade tip speed of a Proven Energy turbine is low. This means that noise is reduced substantially. All that can be heard is the swish of blades turning in the wind, which is virtually unnoticeable. But don't just take our word for it

Low Maintenance

Proven Energy controllers are designed to run the system automatically and display power output from the turbine. The power connectors and turbine brake are easily accessible at the base of the mast.

There is no need for specialist skills. On installation you will receive an easy-to-follow user guide, which gives you all the information you need. We recommend regular maintenance checks for optimum performance.

Proven 15 Design Features

- Axial flux generator
- Elliptical blade tip design
- Hydraulically damped blades
- Proven patented Zebedee hinge at blade roots
- New stiffened head frame
- New ergonomic brake operation
- Fail safe cable operation of blade control mechanism
- Updated generator geometry
- First Proven turbine to be tested to the brand new BWEA wind turbine standard





Technical Specifications

Model	Proven 2.5 – 2.5W	Proven 6 – 6KW	Proven 15 – 15KW
Rated Output	2500 W	6000 W	15000 W
Voltage available	12V / 24V / 48V / 120V / 240V / 300V	48V / 120V / 240V / 300V	48V / 300V
Off grid	Yes	Yes	Yes
On grid	Yes	Yes	Yes
Cut in	2.5 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s
Cut out	None	None	None
Survival	70 m/s	70 m/s	70 m/s
Rated	12 m/s	12 m/s	12 m/s
Rotor type	Down wind, self regulating	Down wind, self regulating	Down wind, self regulating
No of blades	3	3	3
Blade material	Polypropylene	Glass thermoplastic Composite	Glass thermoplastic Composite
Rotor diameter	3.5 m	5.5 m	9 m
Generator type	Brushless, direct drive and Permanent magnet	Brushless, direct drive and Permanent magnet	Brushless, direct drive and Permanent magnet
Battery charging	24 or 48V DC	48 VDC	48V DC
Grid connect	230VAC 50Hz or 240VAC 60Hz	230VAC 50Hz or 240VAC 60Hz	230VAC 50Hz or 240VAC 60Hz
Direct heating	240 VAC	240 VAC	240 VAC
Rated RPM	300	200	150
Annual output ¹	2500 – 5000 KWh	6000- 12000KWh	15000-30000 KWh
Head weight	190 kg	600 kg	1100 kg
Mast type	Tilt up, tapered, self supporting, no guy wires	Tilt up, tapered, self supporting, no guy wires	Tilt up, tapered, self supporting, no guy wires
Hub height	6.5 or 11 m	9 or 15 m	15 or 25
WT found	1.6 x 1.6 x 1 or 2.5 x 2.5 x 1 m	2.5 x 2.5 x 1 or 3 x 3 x 1.2	3.7 x 3.7 x 1.2 or 1.5 x 1.5 x 1.2
Winch found	0.65 x 0.65 x 0.65 or 1 x 1 x 1 m	1 x 1 x 1 or 1.5 x 1.5 x 1	No anchor foundation for 25m
Tower weight	241 or 445 kg	360 or 656 kg	1478 or 2794 kg
Mechanical brake	Yes	Yes	Yes
Noise ² level at 5m/s	40 dBA	45 dBA	48 dBA
Noise level at 20m/s	60 dBA	65 dBA	65 dBA
Rotor thrust	5 KN	10 KN	26KN

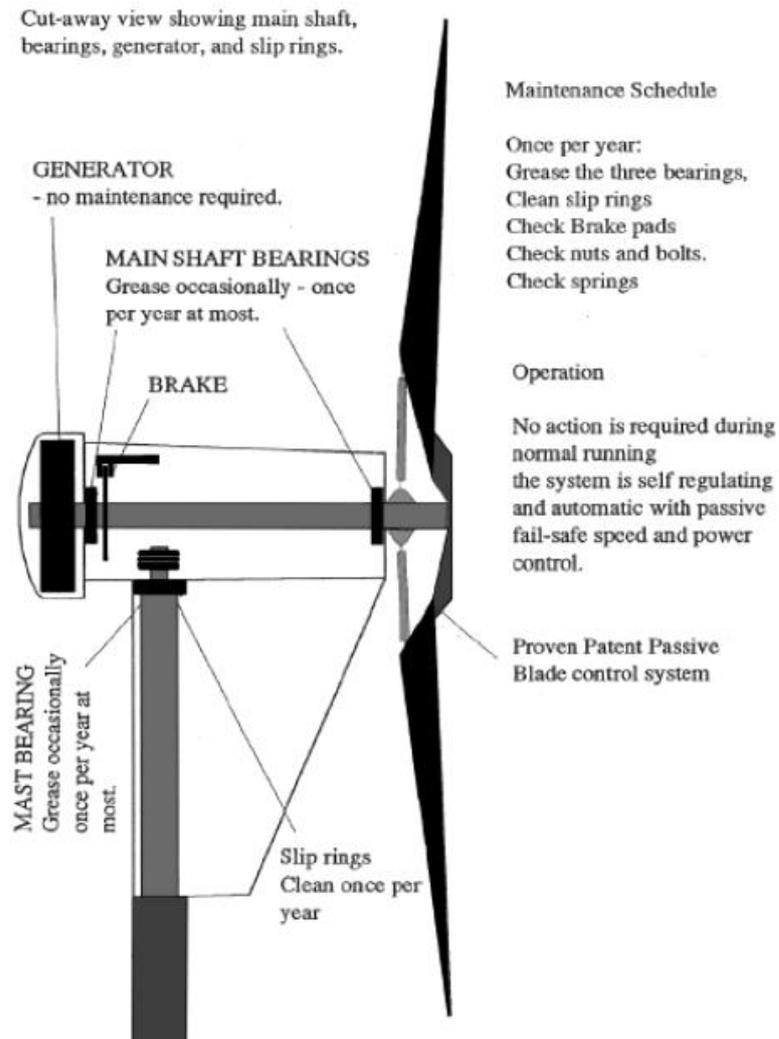
¹ Output range is quoted to cover typical average wind speed (annual). Lighter wind sites with typical 4.5m/s will produce lower end of the range, while higher wind speed

² All reading taken with an ATP SL 25dBA at the base of the tower at a height of 1.5m. A car passing 20m away at approx 65km/h is 70-80 Dba.



6.0 Wind Turbine Maintenance

6.1 Wind Turbine Maintenance Schematic



SUNPOWER

E20/327 SOLAR PANEL

20% EFFICIENCY

SunPower E20 panels are the highest efficiency panels on the market today, providing more power in the same amount of space

MAXIMUM SYSTEM OUTPUT

Comprehensive inverter compatibility ensures that customers can pair the highest efficiency panels with the highest-efficiency inverters, maximizing system output

REDUCED INSTALLATION COST

More power per panel means fewer panels per install. This saves both time and money.

RELIABLE AND ROBUST DESIGN

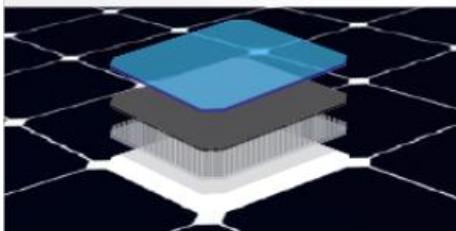
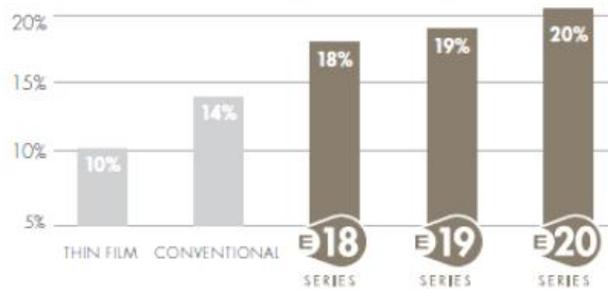
SunPower's unique Maxeon™ cell technology and advanced module design ensure industry-leading reliability



THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR™

SunPower™ E20 Solar Panels provide today's highest efficiency and performance. Powered by SunPower Maxeon™ cell technology, the E20 series provides panel conversion efficiencies of up to 20.1%. The E20's low voltage temperature coefficient, anti-reflective glass and exceptional low-light performance attributes provide outstanding energy delivery per peak power watt.

SUNPOWER'S HIGH EFFICIENCY ADVANTAGE



MAXEON™ CELL TECHNOLOGY

Patented all-back-contact solar cell, providing the industry's highest efficiency and reliability.

sunpowercorp.com



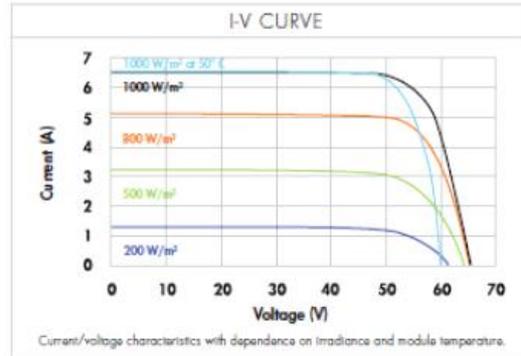
SUNPOWER

E20/327 SOLAR PANEL

MODEL: SPR-327NE-WHT-D

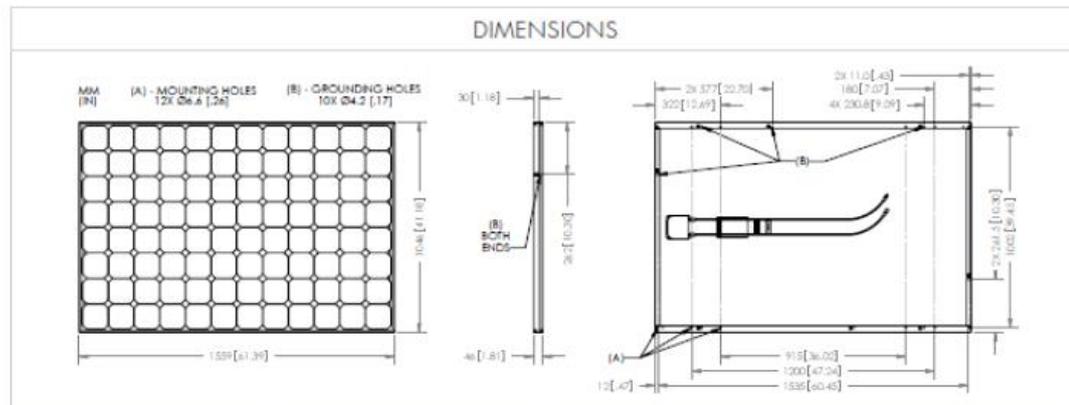
ELECTRICAL DATA		
<small>Measured at Standard Test Conditions (STC): irradiance of 1000W/m², AM 1.5, and cell temperature 25° C</small>		
Peak Power (+5/-3%)	P _{max}	327 W
Cell Efficiency	η	22.5 %
Panel Efficiency	η	20.1 %
Rated Voltage	V _{mpp}	54.7 V
Rated Current	I _{mpp}	5.98 A
Open-Circuit Voltage	V _{oc}	64.9 V
Short-Circuit Current	I _{sc}	6.46 A
Maximum System Voltage	UL	600 V
Temperature Coefficients	Power (P)	-0.38% / K
	Voltage (V _{oc})	-176.6mV / K
	Current (I _{sc})	3.5mA / K
NOCT		45° C +/-2° C
Series Fuse Rating		20 A
Grounding	Positive grounding not required	

MECHANICAL DATA	
Solar Cells	96 SunPower Maxeon™ cells
Front Glass	High transmission tempered glass with anti-reflective (AR) coating
Junction Box	IP-65 rated with 3 bypass diodes Dimensions: 32 x 155 x 128 mm
Output Cables	1000mm length cables / MultiContact (MC4) connectors
Frame	Anodized aluminum alloy type 6063 (black)
Weight	41.0 lbs (18.6 kg)



TESTED OPERATING CONDITIONS	
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +85° C)
Max load	113psf 550 kg/m ² (5400 Pa), front (e.g. snow) w / specified mounting configurations 50 psf 245 kg/m ² (2400 Pa) front and back – e.g. wind
Impact Resistance	Hail: (25 mm) at 51mph (23 m/s)

WARRANTIES AND CERTIFICATIONS	
Warranties	25-year limited power warranty 10-year limited product warranty
Certifications	Tested to UL 1703. Class C Fire Rating



Please read safety and installation instructions before using this product, visit sunpowercorp.com for more details.

© 2011 SunPower Corporation. SUNPOWER, the SunPower logo, and THE WORLD'S STANDARD FOR SOLAR, and MAXEON are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation in the US and other countries as well. All Rights Reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.