

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Implantação, Operação e Instrumentação de Sistema Híbrido  
Eólico/Diesel / no Território de Fernando de Noronha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
PERNAMBUCO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Renato Wagner da Silva Barros

Recife, Fevereiro / 2002

## RESUMO

O sistema híbrido eólico/diesel do Território de Fernando de Noronha é composto por uma turbina eólica de 225 kW, uma turbina eólica de 75 kW e uma Usina Termelétrica com capacidade total de 3 MW. Este sistema representa o maior sistema híbrido em operação na América Latina.

Em função do pioneirismo e das repercussões da implantação deste projeto, este trabalho de tese enfatiza todas as etapas necessárias à especificação e implantação de turbinas eólicas em sistemas isolados. Aspectos de engenharia como o projeto de infra-estrutura de engenharia civil, elétrica e estrutural são abordados. Considerações técnicas nas etapas de comissionamento e operação são apresentadas, de forma a subsidiar futuros projetos no Brasil.

Os efeitos do sistema termelétrico existente (aspectos elétricos) na operação da turbina são analisados. Vários parâmetros de operação da turbina foram medidos tais como: fluxo de energia produzida e consumida pela turbina de 225 kW, números de desligamentos devido a problemas na rede, etc. Preliminarmente, no período de janeiro a julho de 2000, foi constatada a economia de 35.000 litros de diesel pela turbina eólica, com grandes repercussões positivas em termos econômicos e ambientais.

O trabalho de tese descreve a instrumentação utilizada para realização das medidas experimentais em Fernando de Noronha. Foram coletadas as grandezas de tensão e corrente nas três fases, simultaneamente na usina térmica e na turbina eólica de 225 kW. Resultados com condições de operação diversas são apresentados.

## ABSTRACT

The wind/diesel hybrid power system of the Territory of Fernando de Noronha is composed by an wind turbine 225 kW, an wind turbine 75 kW and a Power Station with total capacity of 3 MW. It comprises the greatest operating wind/diesel hybrid power system in Latin America.

Since it is being the pioneer and due to the repercussions of the implantation of this project, this thesis work emphasizes all the necessary stages to the specification and implantation of wind turbines in standalone systems. Insight in engineering as the civil infrastructure project, as well as electrical and structural engineering are handled with. Technical considerations in management, contract and operation are presented to subsidize futures projects in Brazil.

The effects about the influence on the thermoelectrical system had been done to the wind turbine 225 kW witch operational data were analyzed. Some operational parameters of the turbine had been measured such as: energy output and energy consumption of the turbine 225 kW, disconnecting events of due to problems in the grid, *etc.* Preliminarily, during the range comprising January to July / 2000, savings of about 35.000 liters of diesel were achieved due to the wind turbines 225 kW and 75 kW, with great positive repercussions in economics and environmental terms.

This thesis work describes the instrumentation used for accomplishment of the experimental measurements in Fernando de Noronha Island. The magnitude of tension and current in each of the three phases had been collected, simultaneously in the Power Station and in the common point of coupling with the wind turbine 225 kW. Results with diverse readinenses are presented.

# IMPLANTAÇÃO, OPERAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL / NO TERRITÓRIO DE FERNANDO DE NORONHA

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Sistemas Híbridos Eólico/Diesel	1
1.2 Projetos Representativos de Sistemas Híbridos no Mundo	2
1.3 Energia Eólica no Brasil	3
1.4 Sistema Isolados	3
1.5 Apresentação dos Conceitos de Sistemas Híbridos Eólico/Diesel	4
1.6 Sistema Híbrido Eólico/Diesel da Ilha de Fernando de Noronha	6
1.7 Objetivo do Trabalho de Dissertação	7
1.7.1 Objetivos Específicos do Trabalho de Dissertação	7
<b>2. TECNOLOGIA DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL</b>	<b>8</b>
2.1 Configuração de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal	8
2.2 Descrição dos Componentes de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal	9
2.3 Características dos Componentes Principais para Geração Elétrica	11
2.4 Sistema de Controle	15
2.5 Conexão à Rede Elétrica	16
2.5.1 Conexão Suave à Rede Elétrica	17
2.6 Compensação de Reativo	17
<b>3. TECNOLOGIA DE GERADORES DIESEL</b>	<b>18</b>
3.1 Geradores Diesel	18
3.2 Geradores Síncronos aplicados à Usina Termelétrica	18
3.2.1 Operação dos Geradores Síncronos em Paralelo	19
3.3 Componente de Controle de Potência de Geradores Síncronos	19
3.3.1 Regulação de Tensão	19
3.4 Curva Característica do Gerador Diesel	22
3.5 Motores Diesel	23

3.6	Regulação de velocidade	24
3.6.1	Regulador de Velocidade do Motor	25
3.7	Componentes de Supervisão e Controle	26
<b>4.</b>	<b>SISTEMAS ISOLADOS NO BRASIL – OPERAÇÃO COM DIESEL</b>	<b>28</b>
4.1.	Valores de Produção e Consumo de Óleo Diesel no Brasil	28
4.2.	Sistemas Isolados – Unidades Termelétricas a Óleo Diesel	28
4.3.	Projetos de Unidades Termelétricas a Óleo Diesel	28
4.4	Legislação Aplicada ao Mercado de Energia Elétrica do Brasil	29
4.5	Origem das Contas de Consumo de Combustível	30
4.5.1	Contas de Consumo de Combustíveis	30
4.5.2	Aquisição dos Benefícios da Contas de Consumo de Combustível – Fontes Renováveis de Energia Elétrica	31
4.6	Procedimentos para o Gerenciamento da Contas de Consumo de Combustível	31
4.7	Perspectivas de Evolução da Contas de Consumo de Combustível	31
<b>5.</b>	<b>SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL: CONCEITOS</b>	<b>33</b>
5.1	Configurações de Sistemas Híbridos Eólico/Diesel	33
5.1.1	Turbina Eólica/Grupo gerador Diesel – Configuração 1	33
5.1.2	Turbina Eólica/Grupo Gerador Diesel Modificado – Configuração 2	34
5.1.3	Turbina Eólica/Grupo Gerador Diesel Modificado/ Armazenagem – Configuração 3	35
5.1.4	O Sistema Integrado: Configuração 4	36
<b>6.</b>	<b>SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO/DIESEL DE FERNANDO DE NORONHA- SITUAÇÃO ATUAL</b>	<b>38</b>
6.1	Configuração 1: Turbinas Eólicas de 75 kW e de 225kW/Motores Diesel 400kW	39
6.2	Turbina Eólica de 75 kW	40
6.2.1	Características da Turbina Eólica de 75 kW	41
6.2.2	Pás da Turbina Eólica	42
6.2.3	Rotor	42

6.2.4 Manutenção	42
6.3 Gerador Diesel 400 kW	43
6.4 Configuração 2: Turbina Eólica 225 kW/Gerador Diesel de 910 kW (turbina de 75 kW em manutenção)	44
6.5 Turbina Eólica V27 - 225 kW	46
6.5.1 Controle de Potência por Regulação do Ângulo de Passo das Pás	47
6.5.2 A Estrutura da Turbina Eólica V27 – 225 kW	47
6.5.3 Descrição dos Componentes da Turbina Eólica de 225 kW	48
6.5.4 Características Básicas da Turbina Eólica de 225 kW	50
6.5.5 Gerador Assíncrono da Turbina de 225 kW	51
6.6. Gerador Diesel 910kW	52
6.7 Estratégia de Operação – CELPE	54
6.7.1 Rede de Distribuição	55
6.7.2 Característica da Carga	58
6.7.3 Curva de Carga	58
6.7.4 Cargas Principais e Cargas Especiais	59
<b>7. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL DE FERNANDO DE NORONHA</b>	<b>60</b>
7.1 Análise Experimental- Fase 1	60
7.1.1 Produção e Consumo de Energia Diária da Turbina Eólica de 225 kW	60
7.1.2 Produção e Consumo de Energia da Turbina Eólica de 225 kW	64
7.1.3 Penetração Eólica	64
7.1.4 Tempo de Disponibilidade da Turbina Eólica de 225 kW	65
7.1.5 Tempo de Funcionamento dos Geradores da Turbina Eólica de 225 kW	66
7.1.6 Falhas Proporcionadas pela Rede Elétrica	68
7.2 Economia do Consumo de Combustível	70
<b>8. ANÁLISE EXPERIMENTAL – FASE 2</b>	<b>72</b>
8.1 Descrição Básica	72

8.2 Desconexão da Turbina Eólica de 225 kW da Rede Elétrica/ Parada Emergencial da Turbina de 225 kW	75
8.2.1 Gráfico da Potência Ativa	75
8.2.2 Gráfico da Potência Reativa	76
8.2.3 Gráfico de Tensão	76
8.2.4 Gráfico de Frequência	78
8.3 Conexão da Turbina Eólica de 225 kW à Rede Elétrica	78
8.3.1 Gráfico da Potência Ativa	78
8.3.2 Gráfico da Potência Reativa	79
8.3.3 Gráfico de Tensão	80
8.3.4 Gráfico de Frequência	81
<b>9. CONCLUSÃO</b>	<b>83</b>
<b>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO1</b>	

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Sistemas Híbridos Eólico/Diesel

Algumas localidades não apresentam condições de serem atendidas pela rede elétrica convencional, devido às instalações de suas cargas ocuparem posições geográficas remotas. Uma grande distância entre a localidade e a rede pode conduzir a um investimento elevado, empregado na implantação da rede elétrica. Por isso, os sistemas autônomos de geração de energia, podem atender às cargas situadas em localidades remotas, à custos mais baixos - Costa [6].

Em várias partes do mundo, existem comunidades que se utilizam da energia elétrica gerada localmente por geradores diesel, sem ligação com as grandes redes distribuidoras de energia elétrica. Apesar de ser uma solução para o suprimento das cargas, a geração à diesel apresenta um custo elevado para a produção de eletricidade, devido ao custo do próprio combustível, à logística do suprimento de combustível e à sua manutenção. Isso torna a utilização de turbinas eólicas nestes locais uma opção bastante atraente, com a utilização do combustível vento gratuito. Outra solução, seria a implantação de um Sistema Híbrido.

O Sistema híbrido é aquele que combina duas ou mais fontes de energia para produzir eletricidade, atendendo aos sistemas autônomos de eletricidade e ao sistema convencional. O sistema híbrido eólico/diesel, utilizando-se de geradores diesel de grande porte, por exemplo, explora o avanço tecnológico e a ampla utilização de turbinas eólicas ligadas às redes elétricas de distribuição convencionais, pelo que se assemelham em condições de operação e controle.

A figura 1.1 apresenta o sistema híbrido eólico/diesel da Ilha de Fernando de Noronha, objeto de estudo deste trabalho de dissertação.

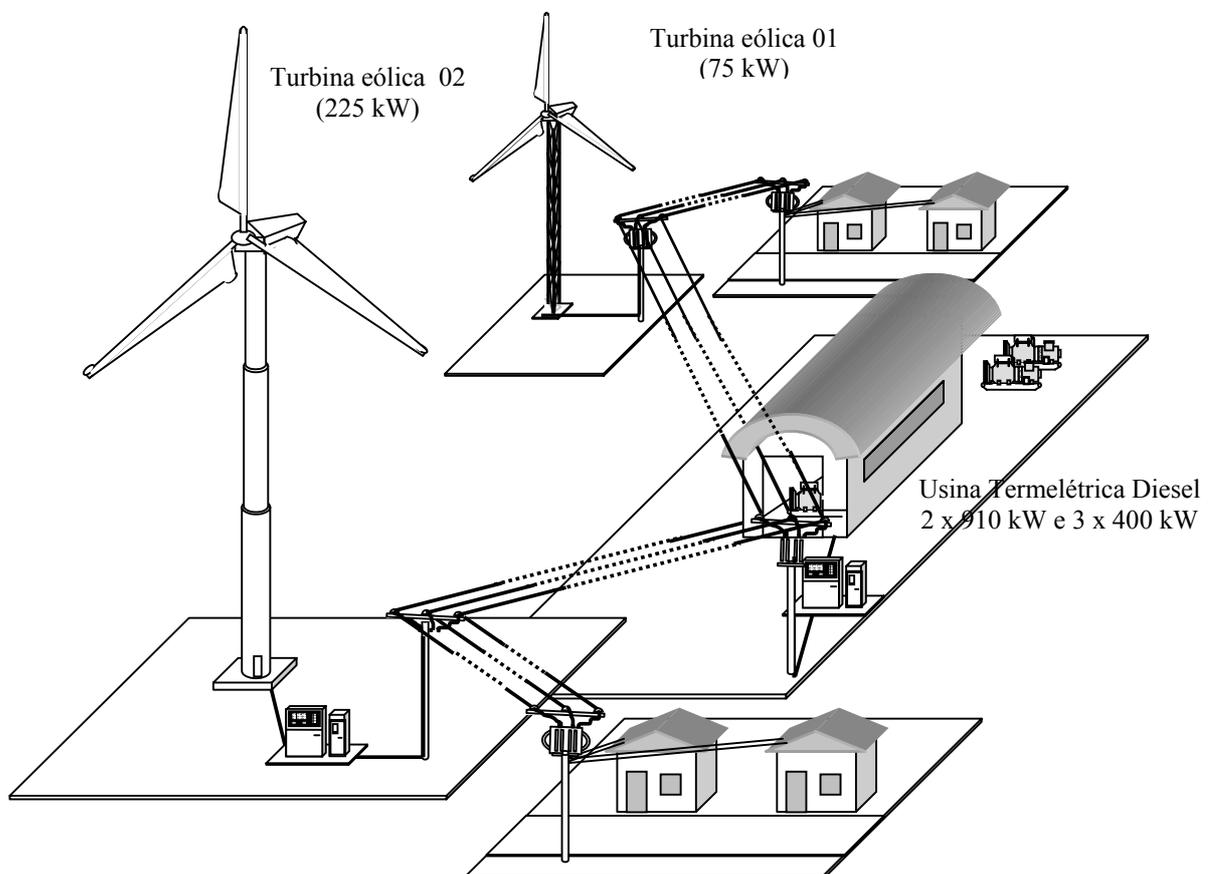


Figura 1.1 – Sistema de Geração e Distribuição da Ilha de Fernando de Noronha .

## 1.2 Projetos Representativos de Sistemas Híbridos no Mundo

A utilização dos sistemas híbridos eólico/diesel aplicados à locais isolados, no mundo, está aumentando, como um meio de reduzir a dependência sobre o consumo de combustível fóssil na produção de eletricidade.

A tabela 1.1 – Pereira [22], apresenta os projetos comerciais mais representativos que utilizam o sistema híbrido eólico/diesel para o fornecimento de eletricidade em locais isolados.

Tabela 1.1 – Lista de sistemas híbridos eólico/diesel instalados no mundo.

Localização / País	Grupo Gerador Diesel (kW)	Turbina Eólica (kW)	Penetração Eólica	Data de Operação
Sal / Cabo Verde	2 x 500 1 x 800 1 x 620 1 x 400	2 x 300	22% (mês) 14% (3 anos)	(1994 - )
Mindelo / Cabo Verde	2 x 300 2 x 300	3 x 300	17% (mensal) 14% (3 anos)	(1994 - )
Forte Ventura / Ilhas Canárias	2 x 75	1 x 225	-	(1992 - )
Ilhas Foula / Shetland Island	1 x 28	1 x 60	70% (3 meses)	(1990 - )
La Desirade / Guadalupe	1 x 160 3 x 240	12 x 12	40% (instantâneo)	(1993 - )
Marsabit / Kenia	1 x 100 1 x 200	1 x 150	46% (3 anos)	(1988 - )
Ilha Kythnos / Grécia	3 x 125 2 x 250 3 x 633	5 x 33 1 x 150	-	(1995 - )
Denham/ Austrália	2 x 228 2 x 580	1 x 230	70% (instantâneo) 23% (6 meses)	(1998 - )
Ilha de Lemnos/ Grécia	2 x 1200 2 x 2700 1 x 2600	8 x 55 7 x 100	-	(1995 - )
Ilha de Fernando de Noronha / Brasil	2 x 910	1 x 75 1 x 225	20%	(1992 - )

Apesar da necessidade do mercado, em vários países do Mundo, em absorver os benefícios que podem ser oferecidos pelos sistemas híbridos eólico/diesel, os investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em tecnologia aplicada à esse campo são ainda pequenos, comparando-se à aplicação de larga escala – Hansen et al [12]. Não há registros suficientes de sucesso de aplicabilidade desses sistemas, que venham a dar segurança aos consumidores e aos investidores em sistemas híbridos eólico/diesel. Embora, seja reconhecido que tais sistemas contribuem com a economia de combustível fóssil utilizado pelas termelétricas, pouco se sabe sobre um projeto de sistema híbrido que esteja em pleno funcionamento durante um período próximo ao tempo de vida útil das turbinas eólicas, devido à pouca documentação publicada. Devido à utilização do recurso de fonte renovável de energia eólica, esse sistema pode colaborar com a diminuição das operações dos geradores diesel e possibilitar diminuição nos

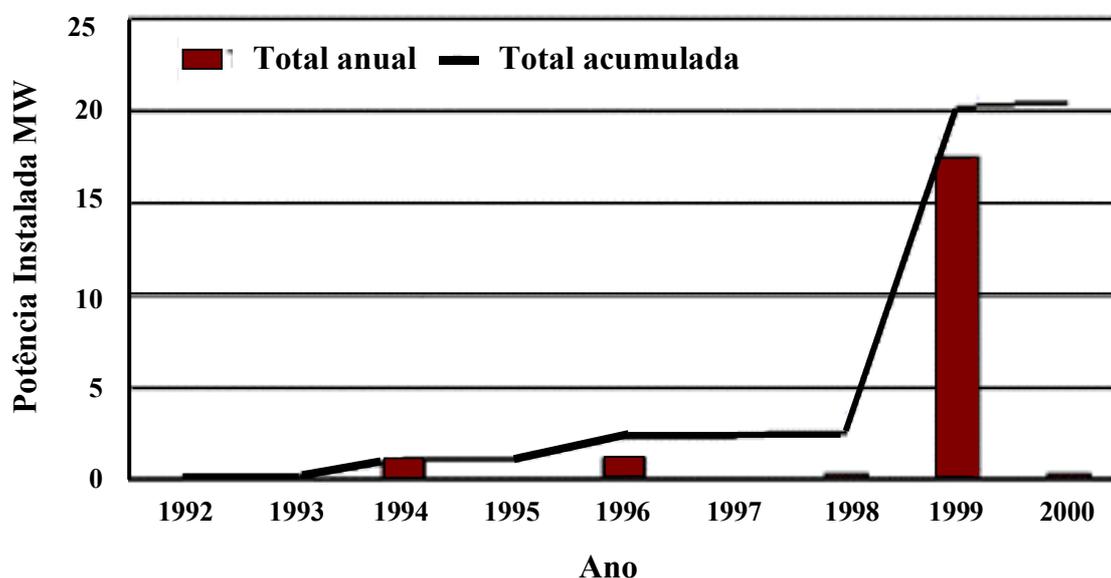
custos de operação e manutenção, além da poder fornecer uma vida útil maior para os geradores diesel.

### 1.3 Energia Eólica no Brasil

No Brasil, o aumento da participação da energia eólica para produção de eletricidade é uma resposta à saída da crise de energia do setor elétrico, constatada no início do ano de 2001. A crise ocorreu ou por falta de investimento no setor ou devido à diminuição dos mananciais utilizados pelas hidrelétricas, ou ambos. Atitudes como a criação do projeto do Governo Federal, denominado Proeólica, que prevê a geração de 1.050 MW com energia eólica, até 2003, e da Resolução nº 112/96, da ANEEL, que facilita o acesso de capital privado, através de produtores independentes de energia são estratégias que viabilizam o crescimento econômico do país, incentivam a produção de energia e proporcionam maiores investimentos difundidos em diversas áreas de trabalho.

Considerando as medidas e as análises dos recursos eólicos, em vários locais do Brasil, apresenta-se um grande potencial eólico a ser explorado e avalia-se a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$ 70 – US\$ 80 por MWh – CBEE [2]. Portanto, é possível produzir eletricidade à custos competitivos, via energia eólica, quando comparados aos custos das centrais termelétricas, nucleares e hidroelétricas.

A evolução da capacidade de geração eólica instalada no Brasil, desde 1992 até o ano 2000, está apresentada na figura 1.2. Observa-se que grande parte da capacidade eólica existente, foi instalada no ano de 1999, ocorrendo nesse ano os primeiros projetos de venda de eletricidade por produtor independente.



Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE.

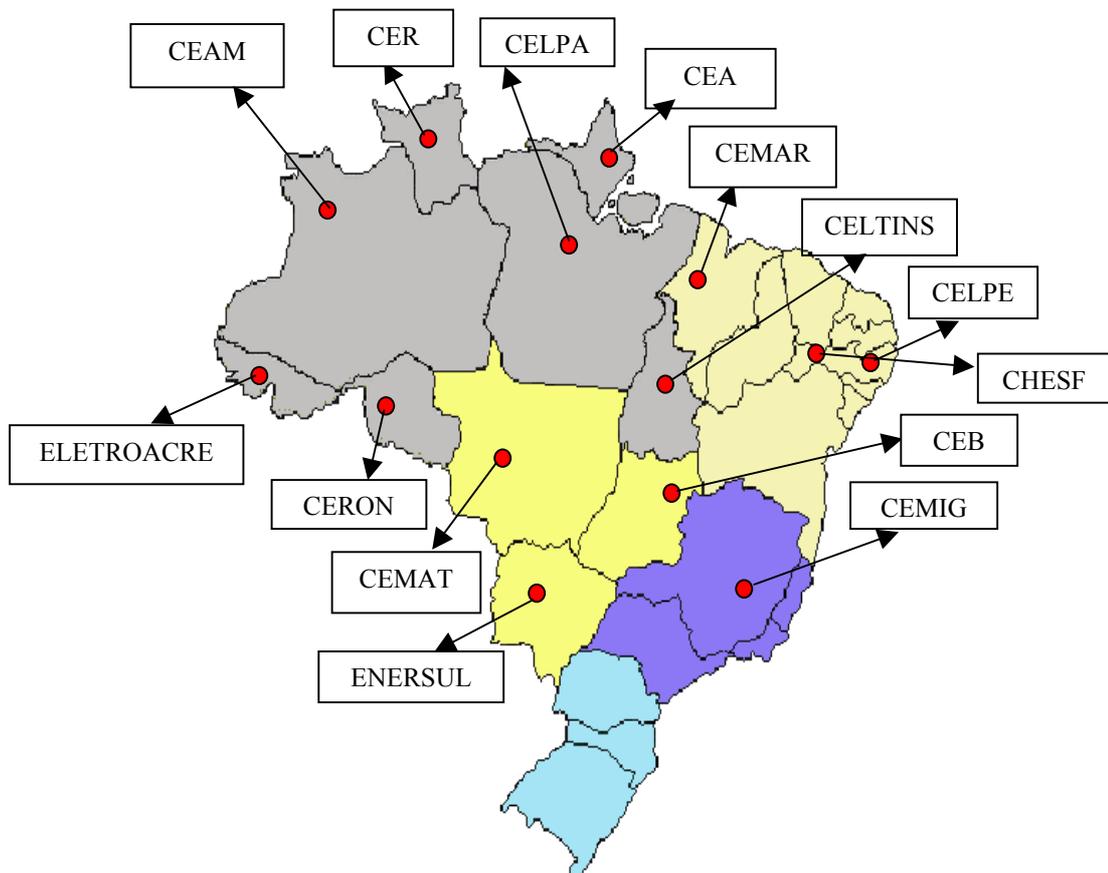
Figura 1.2 – Capacidade de geração eólica instalada no Brasil, até 2000.

### 1.4 Sistemas Isolados

O Governo brasileiro entendeu a necessidade de acabar com o dispêndio relativo ao subsídio destinado às geradoras e distribuidoras de energia elétrica através das Contas de Consumo de Combustível – CCC. Esta Conta cobre os custos relativos ao consumo de combustível fóssil utilizado na produção de eletricidade. O Governo determinou que a

geração elétrica, a partir de fontes renováveis de energia, pode usufruir dos benefícios do método de rateio das Contas de Consumo de Combustível dos Sistemas Isolados – CCC – ISOL. Tem-se por objetivo a substituição da geração das unidades termelétricas que utilizam derivados de petróleo nos Sistemas Isolados. Essa determinação abre um campo de investimentos para Produtores Independentes de Energia Elétrica ou Autoprodutores de Energia Elétrica às implantações de sistemas híbridos eólicos/diesel, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) e outras fontes renováveis.

A figura 1.3 apresenta os estados com as concessionárias e distribuidoras que utilizam-se das Usinas Termelétricas a óleo diesel em operação no País.



Fonte: Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS

Figura 1.3 - Usinas Termelétricas a diesel em operação no País.

### 1.5 Apresentação dos Conceitos de Sistemas Híbridos Eólico/Diesel

Para implementação de projetos de sistemas híbridos eólico/diesel há várias configurações que podem ser utilizadas. Combinações de diferentes princípios de controle e operação são adequadas às necessidades das demandas dos consumidores. Por exemplo, um projeto de sistema híbrido eólico/diesel pode conter, operando conjuntamente, um volante de inércia e um controlador de carga. Um outro projeto pode incluir duas ou mais unidades de geradores diesel e acrescentar a estratégia de armazenamento de energia através da instalação de um banco de baterias. O fato de se optar por um tipo determinado de estratégia é devido às

altas flutuações do vento, como também às rápidas mudanças nos requerimentos de potência dentro de uma rede elétrica.

O sistema híbrido eólico/diesel em operação na Ilha de Fernando de Noronha, por exemplo, é composto por vários geradores diesel e por duas turbinas eólicas. Essas turbinas injetam potência elétrica diretamente na rede elétrica sem a necessidade de estratégias de armazenamento de energia ou utilização de cargas controladas aplicadas para dissipação de potência.

A figura 1.4 apresenta as configurações desse sistema híbrido, durante o desenvolvimento desse trabalho. A passagem da configuração 1 para a configuração 2 do sistema híbrido da Ilha de Fernando de Noronha ocorreu, devido à repotenciação do sistema de geração termelétrica.

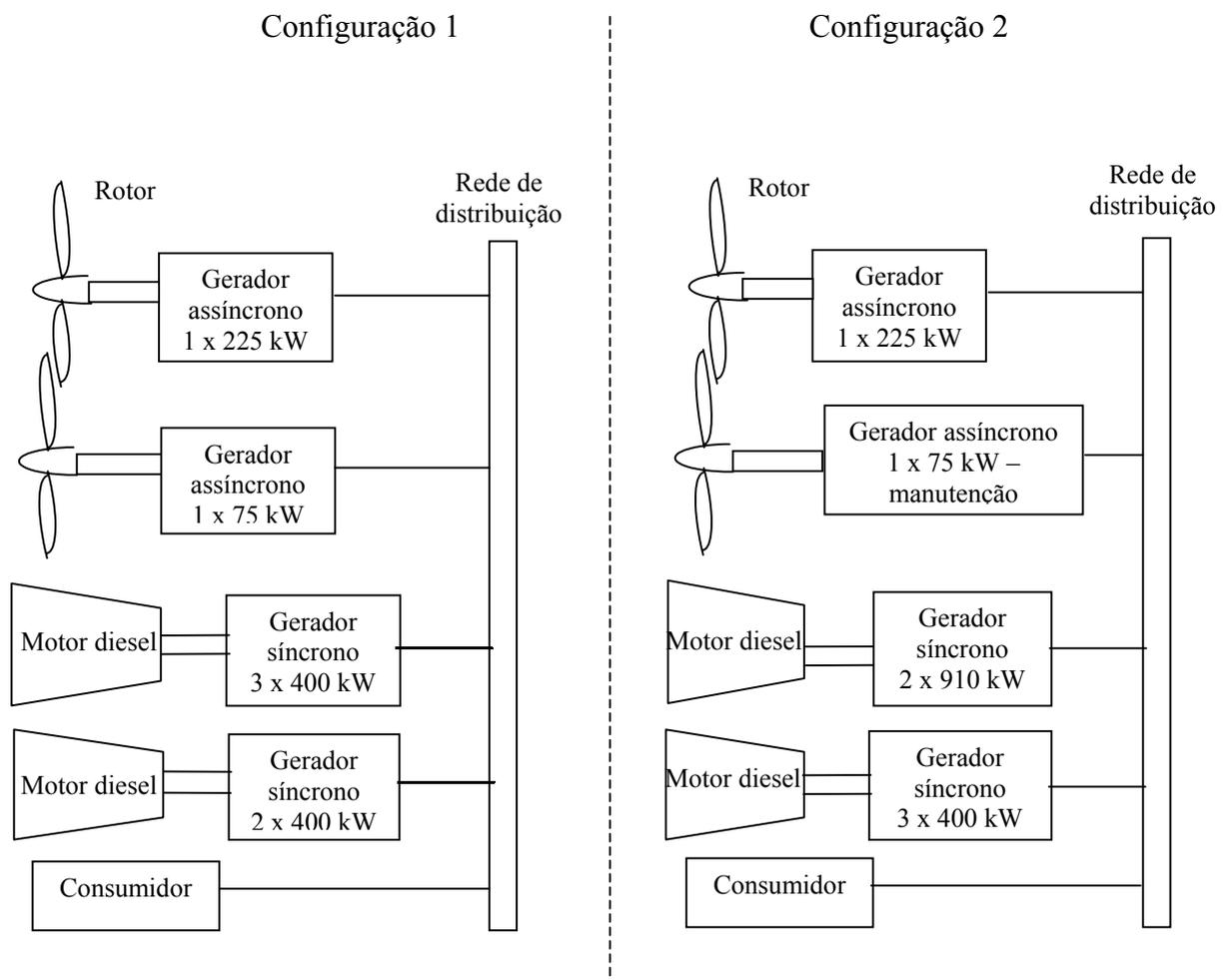


Figura 1.4 - Configuração do sistema híbrido eólico diesel da Ilha de Fernando de Noronha.

### 1.6 Sistema Híbrido Eólico/Diesel da Ilha de Fernando de Noronha

O arquipélago de Fernando de Noronha (figura 1.5) localiza-se no atlântico equatorial. A Ilha principal, Fernando de Noronha, tem 16,9 km<sup>2</sup> e uma população de 2500 habitantes. Os aspectos econômicos da Ilha estão basicamente relacionados as atividades turísticas, de natureza ecológica, referentes à preservação da fauna e da flora pertencentes à Ilha.

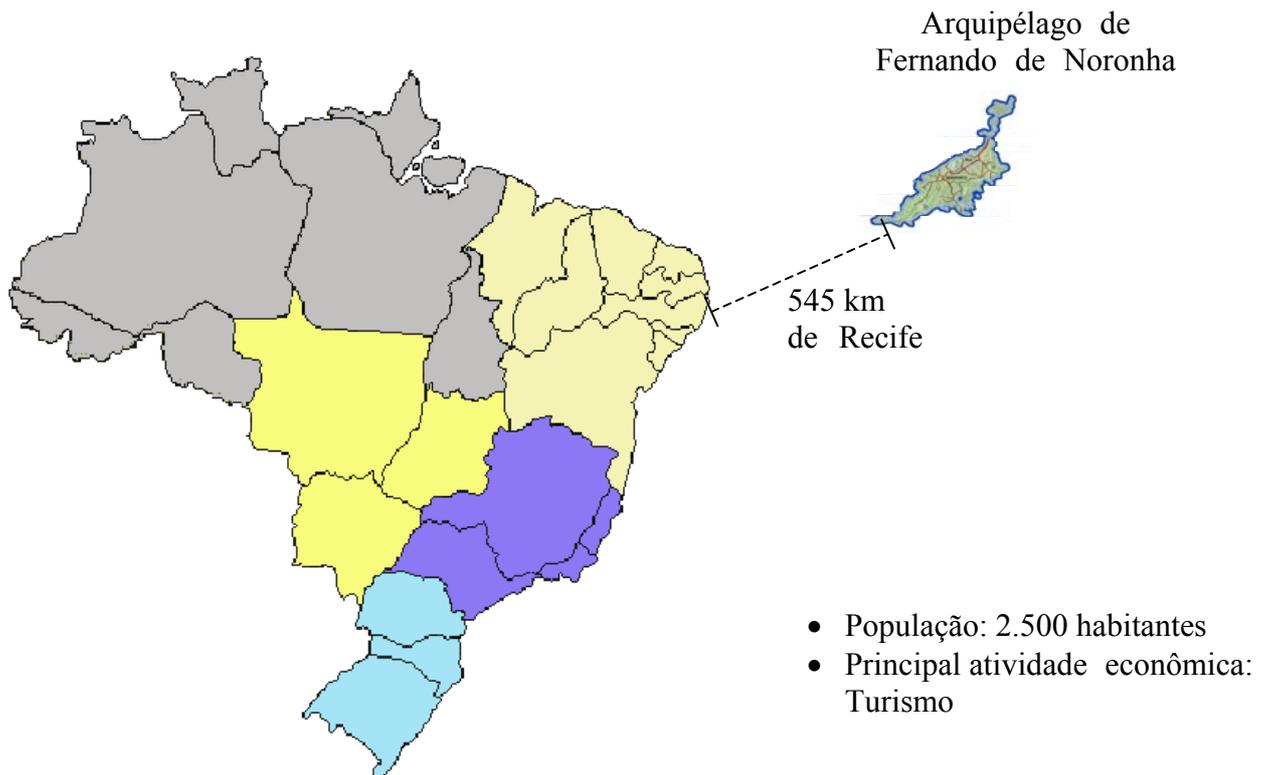


Figura 1.5 - Ilha de Fernando de Noronha

A partir do levantamento do perfil da carga, fornecido pela Usina Termelétrica Tubarão e, conhecendo-se as condições favoráveis do regime de vento do local – CBEE [3], tornou-se possível ampliar a penetração eólica, através da conexão da turbina eólica de 225 kW à rede de distribuição da Ilha, somando-se à potência da turbina eólica de 75 kW, já em operação nesse sistema.

Esse trabalho baseou-se em análises efetuadas sobre duas configurações do sistema híbrido da Ilha. Apresenta-se a configuração 1 instituída entre os meses de maio à julho de 2000, onde são expostas as descrições e as características de funcionamento dos componentes do sistema eólico/diesel, tais como a turbina eólica de 75 kW, os geradores diesel de 400 kW (termelétrica com capacidade instalada de 2 MW) e a turbina eólica de 225 kW. Apresenta-se a configuração 2, instituída a partir do mês de junho de 2001, com a turbina eólica de 225 kW, com os geradores diesel de 910 kW e os geradores de 400 kW (termelétrica com capacidade instalada de 3 MW). A turbina de 75 kW esteve em manutenção durante as análises realizadas na fase 2.

A implantação da turbina de 225 kW, no mês de maio de 2000, elevou a penetração eólica na Ilha de Fernando de Noronha. O sistema híbrido em operação na Ilha, tornou-se com a inclusão dessa turbina o maior sistema híbrido eólico/diesel da América Latina.

Uma breve explanação expõe a estratégia de operação da Usina Termelétrica Tubarão, para uma melhor compreensão do funcionamento sobre o fornecimento de eletricidade na Ilha. São fornecidas, também, informações sobre o sistema de distribuição e as características da carga.

Aspectos de engenharia como o projeto de infra-estrutura de engenharia civil, elétrica e estrutural relacionados à turbina eólica de 225 kW foram apresentados (Anexo1).

## 1.7 Objetivo Geral do Trabalho de Dissertação

O objetivo desse trabalho de dissertação é enfatizar todas as etapas necessárias à especificação e implantação de turbinas eólicas em sistemas isolados, em função da implantação da turbina eólica de 225 kW, na Ilha de Fernando de Noronha, oferecendo recursos para a implantação e conexão de turbinas eólicas à Sistemas Isolados no Brasil, que utilizam a geração de energia elétrica à óleo diesel.

### 1.7.1 Objetivos Específicos do Trabalho de Dissertação

- descrever a instrumentação utilizada para realização das medidas experimentais na Ilha de Fernando de Noronha (configuração 1 e 2);
- quantificar a produção de energia ativa injetada na rede elétrica pela turbina eólica de 225 kW e o consumo de energia reativa, requerida pela mesma (configuração 1);
- avaliar o tempo de disponibilidade da turbina eólica de 225 kW e do sistema de distribuição termelétrico (configuração 1);
- investigar as ocorrências de falhas ocorridas no sistema elétrico da Ilha (configuração 1);
- quantificar a economia de combustível (óleo diesel ) proporcionada pelas turbinas eólicas de 75 kW e de 225kW (configuração 1);
- analisar a influência causada pela turbina eólica de 225 kW à qualidade de energia do sistema elétrico (configuração 2);

## 2. TECNOLOGIA DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

### 2.1 Configuração de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

As turbinas eólicas conhecidas como Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (*HAWT*), utilizam essa terminologia para expressar o aspecto geométrico do eixo sobre o qual o rotor da turbina está montado. Os componentes que fazem parte de sua estrutura são: a nacelle (onde está montado o gerador elétrico), o rotor (formado pelas pás e pelo cubo (*hub*)) e a torre. As suas aplicações são baseadas, conforme às necessidades previstas no planejamento do projeto. O fornecimento de energia elétrica das turbinas eólicas conectadas diretamente à rede elétrica convencional é a forma de aplicação mais difundida. Podem ser utilizadas em sistemas isolados para fornecimento de energia elétrica, em combinação, ou não, à outras fontes de energia, tais como a solar, o combustível fóssil e o hidráulico, com ou sem armazenamento de energia, como por exemplo, banco de baterias ou volantes de inércia. Também, a produção de eletricidade das turbinas eólicas combinadas à produção de geradores diesel de grande porte (sistemas híbridos eólico/diesel) pode atender aos consumidores de até uma cidade, como sistemas autônomos de eletricidade de serviço público ou privado.

Em relação ao modo de operação, a extração de energia cinética do vento por uma turbina eólica é convertida em energia mecânica de rotação, através do seu rotor. Um sistema de transmissão mecânica, que consiste de uma caixa de engrenagens, acopla esse eixo em rotação, à um gerador elétrico, o qual transforma a energia mecânica em energia elétrica.

A figura 2.1 apresenta uma turbina de eixo horizontal, caracterizando os componentes principais de sua estrutura – Walker [26].

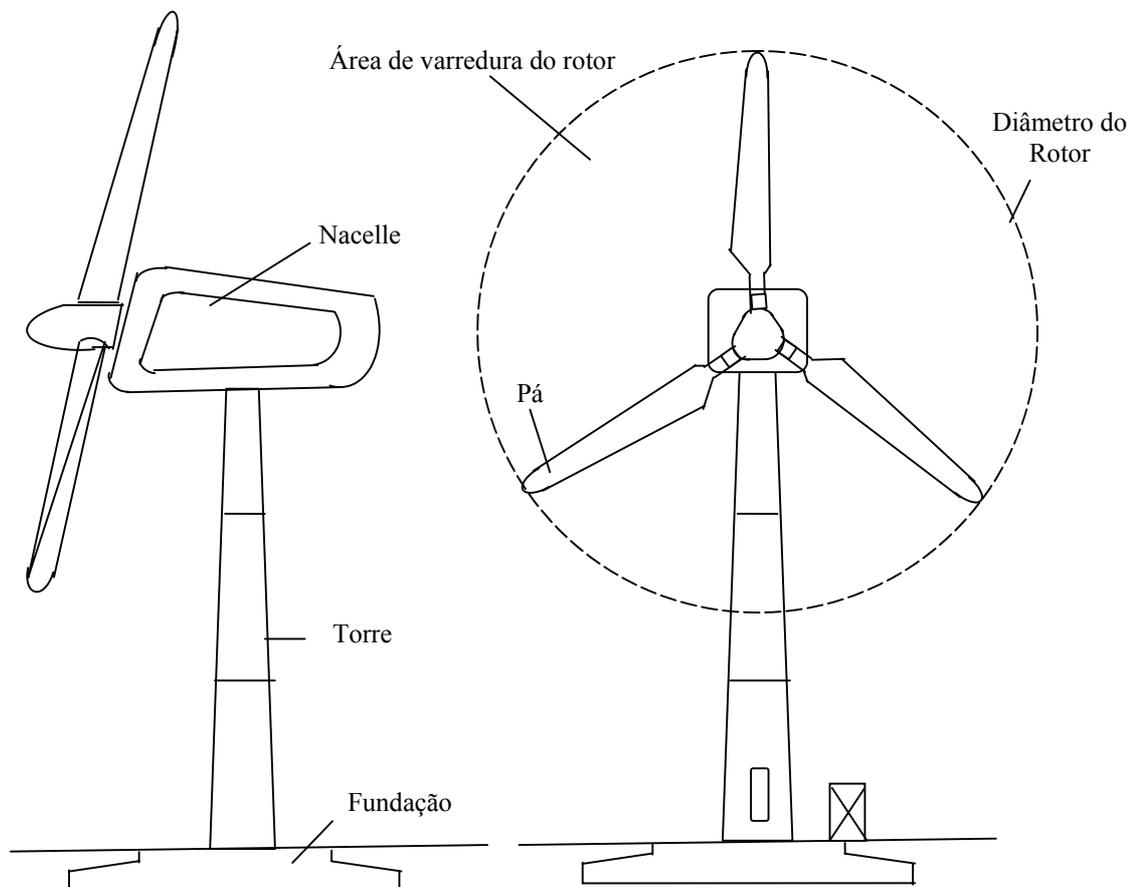


Figura 2.1 Componentes da estrutura de uma turbina eólica de eixo horizontal.

## 2.2 Descrição dos Componentes de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal

### 1) Nacelle

A nacelle (figura 2.2) possui uma estrutura de ferro em sua base, a qual está aparafusada na parte superior da torre. Sobre essa estrutura são fixados os mecanismos de transmissão, o gerador elétrico, componentes do sistema hidráulico e de ventilação e o sistema de controle situado na nacelle. A função da nacelle é proteger esses componentes. Em resposta a mudança da direção do vento, as turbinas utilizam-se do sistema de giro (*yaw*), que recebe informações dos sensores de velocidade e de direção do vento, instalados na nacelle, o qual atua no seu posicionamento, conforme a solicitação programada. O sistema de giro da turbina é responsável pela rotação da turbina à medida que o vento tenha sofrido alguma alteração na sua direção de escoamento e seja conveniente posicionar a área de varredura do rotor perpendicularmente à essa direção, com o objetivo de proporcionar o melhor rendimento do rotor, durante a operação normal da turbina. A atuação do sistema de giro é realizada através de uma lenta rotação da nacelle. O sistema é também ativado por motivo de segurança, devido aos esforços provocados sobre o equipamento quando a velocidade do vento atinge valores acima da velocidade de saída (*cut-out*). Por esse motivo, faz-se com que o eixo do rotor permaneça em um ângulo de noventa graus em relação à direção do vento.



Figura 2.2 – Nacelle de uma turbina eólica de eixo horizontal.

### 2) Rotor

A concepção do rotor (figura 2.3) é caracterizada pela formação adquirida após a conexão das pás ao cubo. O rotor é conectado ao eixo de transmissão mecânica, o qual está acoplado a um gerador elétrico. É um dos componentes de maior importância, devido estar diretamente relacionado com a geração de energia elétrica. O seu desempenho, sob condições variadas de velocidade de vento, influencia tanto a qualidade quanto a quantidade da energia que pode ser fornecida pela turbina eólica. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*), que atuam perpendicularmente ao escoamento do fluxo de ar e forças de arrasto (*drag*), que atuam na direção do escoamento – Lysen [18]. Essas forças são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. As forças de sustentação dependem da geometria da pá e do ângulo de ataque.



Figura 2.3 – Rotor acoplado à nacelle da turbina eólica de eixo horizontal.

A pá (figura 2.4) do rotor extrai a energia cinética do vento e o seu desempenho aerodinâmico determina a efetiva conversão eólica. Turbinas eólicas utilizam uma, duas ou três pás, para formarem um rotor. As pás estão relacionadas com a dinâmica de conversão de energia especificamente com o momento de inércia, através do peso e de seu balanceamento. Seu desempenho aerodinâmico está sob a influência das intempéries, do efeito da temperatura, umidade, de sujeira que adere durante o período de operação e de salinidade. São utilizadas para regulação de potência e da velocidade do rotor a regulação por *stall* (passo fixo) ou a regulação do ângulo de passo das pás (*pitch*) – Freris [11].



Figura 2.4 – Pá de uma turbina eólica de eixo horizontal .

### 3) Torre

Os tipos mais comuns de torres (figura 2.5) utilizadas nas montagens de turbinas eólicas são as tubulares e as treliçadas, construídas em aço e torres que utilizam estai para auxiliar sua sustentação. São projetadas com o objetivo de suportar os esforços de cargas provocadas pela incidência do vento e as cargas devido ao efeito da gravidade exercido pela turbina situada no topo da torre. Suas fundações devem ser construídas de forma que não haja ressonância de frequência que coincida com a frequência induzida pelo rotor, evitando danificá-las .

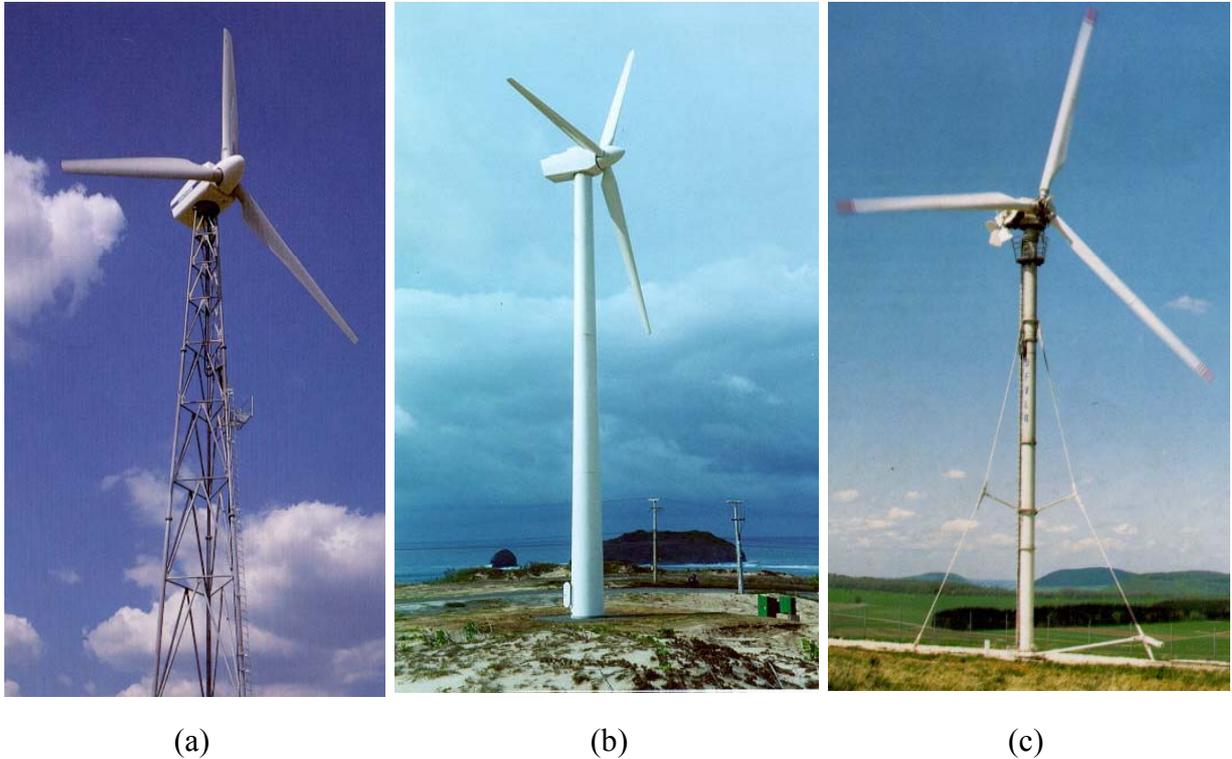


Figura 2.5 – Tipos mais utilizados de torres: (a) torre treliçada; (b) torre tubular; (c) torre com estai.

### 2.3 Características dos Componentes Principais para Geração Elétrica

São apresentadas as informações básicas que descrevem as características de um sistema de transmissão mecânica de geradores assíncronos utilizados nas turbinas eólicas de eixo horizontal.

#### 1) Sistema de Transmissão Mecânica

O sistema de transmissão, após a conversão da energia mecânica extraída do vento através das pás em energia mecânica de rotação, tem função de transmitir essa rotação ao gerador elétrico utilizando um conjunto de componentes, que formam esse sistema, tais como os eixos de baixa e alta velocidades de rotação, o multiplicador de velocidade e o sistema de freio do rotor da turbina. Através do multiplicador de velocidade é proporcionado o aumento de velocidade de rotação do rotor, cuja frequência assume os valores de 30 e 50 rotações por minuto (rpm), para frequências de rotação usuais, no eixo do gerador, de 900 rpm ou 1200 rpm. O sistema de frenagem deve parar o rotor em caso de emergência.

O sistema de transmissão apresenta entre o rotor e o gerador, acoplamentos elásticos, momentos de inércia e amortecimento relacionados ao multiplicador e aos eixos de baixa e

alta velocidades, referindo-se às transferências de vibrações do rotor e de amortecimento ao funcionamento dinâmico da turbina – Estanqueiro [8].

A figura 2.6 apresenta as características de um modelo típico, por exemplo, relativo ao desempenho dos eixos de baixa e alta velocidade de um sistema de transmissão de uma turbina eólica, referindo as grandezas velocidade e torque ao eixo de alta velocidade – Estanqueiro [8].

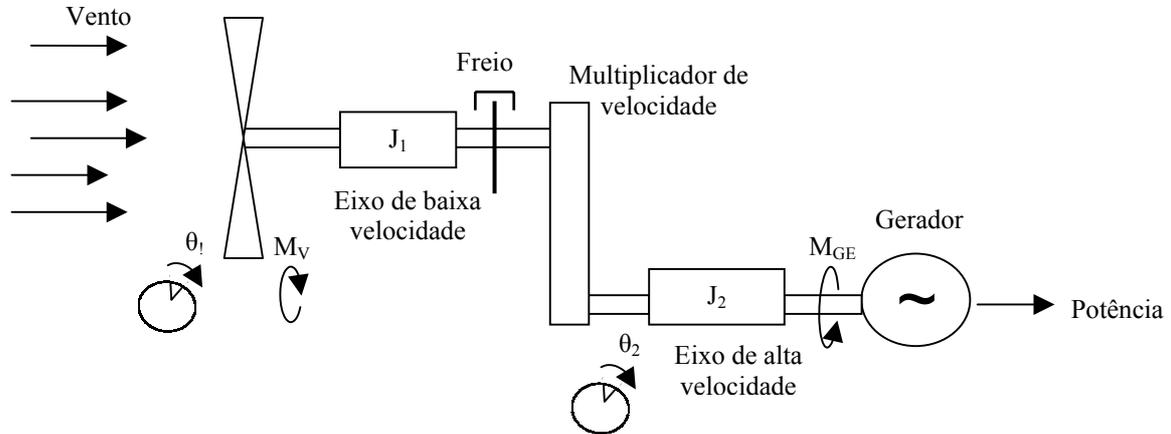


Figura 2.6 – Sistema de transmissão.

O comportamento do sistema de transmissão, considerando as grandezas transferidas ao eixo de alta velocidade, pode ser representado pela transmissão mecânica através da Eq.2.1 e da interação entre o rotor e o gerador, presente na Eq. 2.2

$$J_1 \theta_1^{**} = Q_1 - Q_3 \quad (2.1)$$

$$J_2 \theta_2^{**} = \frac{Q_3}{K} - Q_2 \quad (2.2)$$

$J_1$  – momento de inércia relativo ao eixo de baixa velocidade;

$J_2$  – momento de inércia relativo ao eixo de alta velocidade;

$\theta_1$  - ângulo de torção no eixo de baixa velocidade;

$\theta_2$  – ângulo de torção no eixo de alta velocidade;

$K$  – relação de transmissão do multiplicador;

$Q_1$  – torque no eixo de baixa velocidade;

$Q_2$  – torque no eixo de alta velocidade;

$Q_3$  – torque no multiplicador.

## 2) Geradores

As turbinas eólicas conectadas à rede elétrica utilizam dois tipos de classes de geradores trifásicos de corrente alternada, para realizar a conversão de energia mecânica em energia elétrica. As características de cada gerador são apresentadas a seguir :

### a) Geradores Síncronos

O gerador síncrono é constituído por duas partes principais: uma fixa, que é a carcaça, onde se encontram os pés de fixação, e a outra móvel (girante). A parte fixa chama-se estator e a parte móvel chama-se rotor.

Em máquinas rotativas são geradas tensões em enrolamentos, pela rotação mecânica destes em um campo magnético girante, que os atravessa. Um grupo de bobinas, interligadas de modo que todas as tensões nelas geradas contribuam positivamente ao resultado final, é chamado de enrolamento de armadura. O circuito magnético é completado através do ferro de outra peça do gerador. Os enrolamentos de campo, são colocados sobre essa peça para agir como fontes primárias de fluxo. O enrolamento de armadura de uma máquina síncrona está quase sempre no estator e o enrolamento de campo está no rotor.

A frequência em ciclos por segundo (Hertz) é igual à velocidade do rotor em rotações por segundo, isto é, a frequência elétrica esta sincronizada com a velocidade mecânica, e esta é a razão para a designação de máquina síncrona.

A tensão de bobina de uma máquina de P pólos passa por um ciclo completo toda vez que um par de pólos passa por ela, ou P/2 vezes cada rotação. A frequência da onda de tensão do gerador síncrono foi correlacionada à sua construção, uma vez que a frequência varia com o número de pólos - Fitzgerald [10] e é fornecida na Eq. 2.3

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \quad \text{Hz} \quad (2.3)$$

f – frequência;

n - velocidade mecânica em revolução por minuto;

P – número de pólos.

Quando um gerador síncrono fornece potência elétrica a uma carga, a corrente na armadura cria uma onda de fluxo no entreferro, que gira à velocidade síncrona. Este fluxo reage com o fluxo criado pela corrente de campo e resulta daí um conjugado eletromagnético, devido à tendência dos dois campos magnéticos se alinharem. Em um gerador, este conjugado se opõe à rotação, e a máquina motriz deve aplicar conjugado mecânico a fim de sustentar a rotação. O conjugado eletromagnético é o mecanismo através do qual maior potência de saída exige potência mecânica de entrada maior.

Praticamente toda a produção de eletricidade é fornecida por geradores dessa classe. Um dos motivos, é que devido à possibilidade de se controlar a sua corrente de excitação, o gerador síncrono pode gerar potência reativa e, fornecer essa potência às necessidade dos consumidores de uma rede elétrica.

## b) Geradores assíncronos

Para que haja torque eletromagnético, dois campos magnéticos devem interagir. O estator do gerador assíncrono produz um campo magnético girante, que rotaciona à velocidade síncrona, tal qual no gerador síncrono. Entretanto, o seu rotor é que difere por não utilizar uma fonte de excitação externa. É preciso que seja induzida uma força eletromotriz em virtude do movimento relativo entre o campo magnético girante do estator e os condutores do rotor. Caso um torque externo seja aplicado ao rotor de forma que sua velocidade de rotação coincida com a velocidade síncrona igual a do estator, originada da alimentação da fonte de corrente alternada, tem-se como resultado um movimento relativo entre o campo girante e os condutores do rotor igual a zero e não a força eletromotriz é nula. Porém, com o aumento do torque, a velocidade do rotor passa a ser menor que a velocidade do campo girante, devido ao fluxo que corta os condutores, originando a força eletromotriz que é induzida no rotor, cuja frequência - Fitzgerald [10] é dada pela Eq. 2.4

$$f = \frac{w_s - w_r}{2\pi} \quad (2.4)$$

$f$  – frequência da força eletromotriz (Hz) ;

$w_s$  – velocidade de rotação do rotor (rpm);

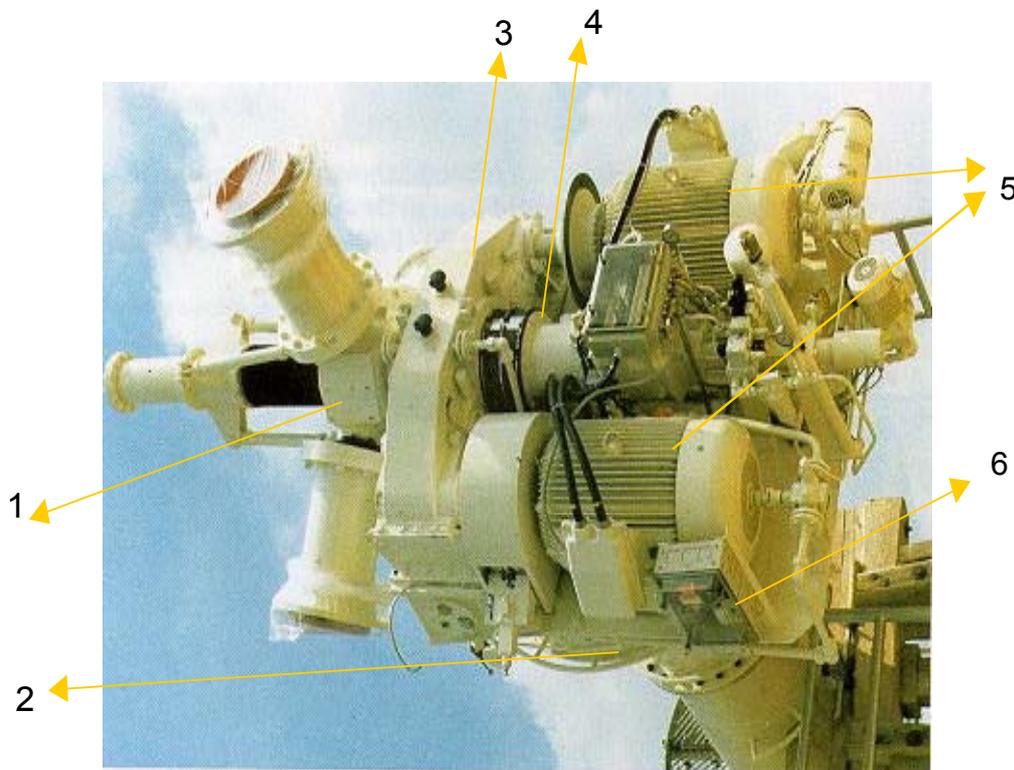
$w_s$  – velocidade síncrona do campo girante( rpm).

A corrente que circula nos condutores do rotor geram um campo que rotaciona com uma velocidade que é a diferença entre a velocidade de rotação do rotor e da velocidade do campo girante. Por isso, o torque eletromagnético originado pelo campo do rotor tende a se opor ao torque criado pelo campo girante. O ângulo de carga é agora maior que  $90^\circ$ . Supondo o rotor girando a uma velocidade fixa de " $w_r$  rpm" na mesma direção do campo girante do estator e seja " $w_s$  rpm" a velocidade síncrona do campo do estator, o rotor gira na velocidade de rotação " $w_s - w_r$  rpm" em direção contrária à do campo do estator, ou o escorregamento do rotor é " $w_s - w_r$  rpm". O escorregamento uma fração da velocidade síncrona, expresso por unidade – Fitzgerald [10], é dado pela Eq 2.5

$$s = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (2.5)$$

$s$  – escorregamento (por unidade).

Na figura 2.7, os componentes principais utilizados para a geração de eletricidade podem ser observados , a partir de uma turbina eólica de eixo horizontal, a qual representa uma turbina padrão formada pelo cubo, sistema de giro, caixa de multiplicação de velocidade, eixo principal, geradores e unidade de controle.



1 – cubo ; 2 – sistema de giro; 3 – caixa de multiplicação de velocidade ;  
4 - eixo principal; 5 – geradores; 6 – unidade de controle.

Figura 2.7 – Componentes abrigados na nacelle.

## 2.4 Sistema de Controle

O sistema de conversão de energia de uma turbina eólica está sujeito às forças externas. O fornecimento de energia elétrica pode ser afetado pelas mudanças na velocidade do vento ou devido à turbina depender de fatores, tais como a separação do fluxo de ar ao redor da torre ou por uma rede fraca conforme a variação das cargas, por exemplo. Em resposta às influências externas, consta uma unidade de controle (figura 2.8) operacional e de regulação que deve conciliar o fluxo de energia fornecido pelo sistema com a demanda obtida da rede – Heier [13].

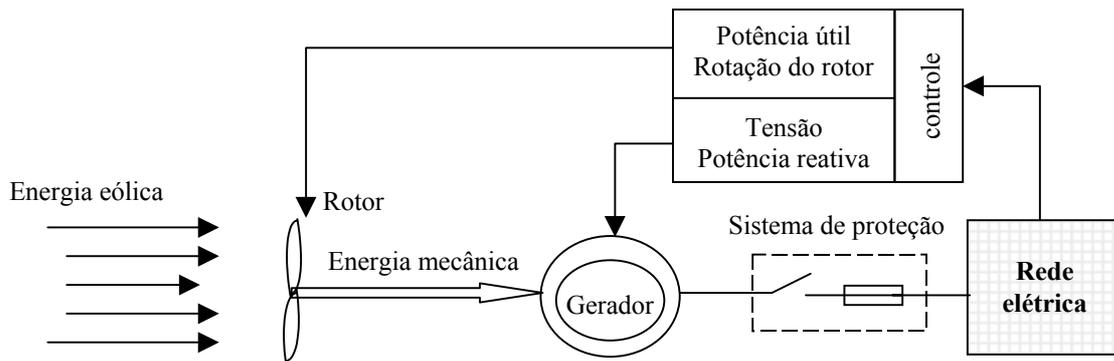


Figura 2.8 – Conversão de energia e controle de produção de eletricidade - turbina eólica conectada à rede elétrica.

A operação de turbinas eólicas, devido ao alto grau de variabilidade de energia eólica disponível em um determinado local, necessita de um sistema de controle que forneça condições confiáveis sobre as grandezas elétricas e mecânicas. Esse sistema tem funções de monitoramento e de gerenciamento para atuar sob as condições estocásticas impostas pelo comportamento do vento – Walker [26]. Além disso, a conexão da turbina eólica à rede elétrica deve ser realizada, de acordo com as perfeitas condições dessa rede.

O sistema de controle processa os dados de tensão e corrente e frequência, relativos à rede elétrica, de velocidade e de direção de vento, de vibração da nacelle, de temperatura do gerador e dos sistemas hidráulicos, com o objetivo de estabelecer o funcionamento da turbina dentro de uma determinada faixa de segurança.

Um sistema de controle consiste de um ou mais controladores comuns (bought off the shelf – encontrados no comércio), de controladores lógicos programáveis (CLP) e controladores analógicos ou híbridos, que fornecem soluções rápidas e atraentes – Heier [13].

A figura 2.9 apresenta o sistema de controle da turbina eólica V27-225 kW, o qual monitora todas as funções críticas da turbina, tais como a velocidade de rotação (rotações por minuto) do gerador, a produção de potência e o ângulo de pitch, por exemplo, com o objetivo de assegurar que o seu desempenho seja ótimo para qualquer condição de vento. O controlador é projetado, também, para executar o controle e o monitoramento remotos.

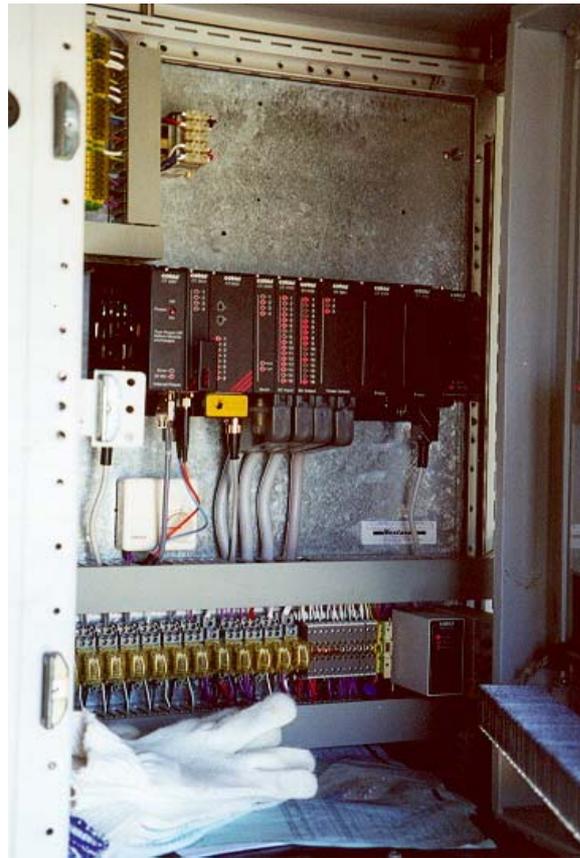


Figura 2.9 - Sistema de controle da turbina de 225 kW.

## 2.5 Conexão à Rede Elétrica

A figura 2.10 mostra a rede de distribuição de forma topológica, por exemplo, onde está instalada a turbina eólica V27-225 kW. A energia é gerada em baixa tensão (480V), pela turbina, que através de um transformador elevador de tensão 480V/13.800V – 400kVA, é conectada à rede elétrica. O transformador utilizado é do tipo ecológico em pedestal, com o objetivo de não causar impacto ao meio ambiente.

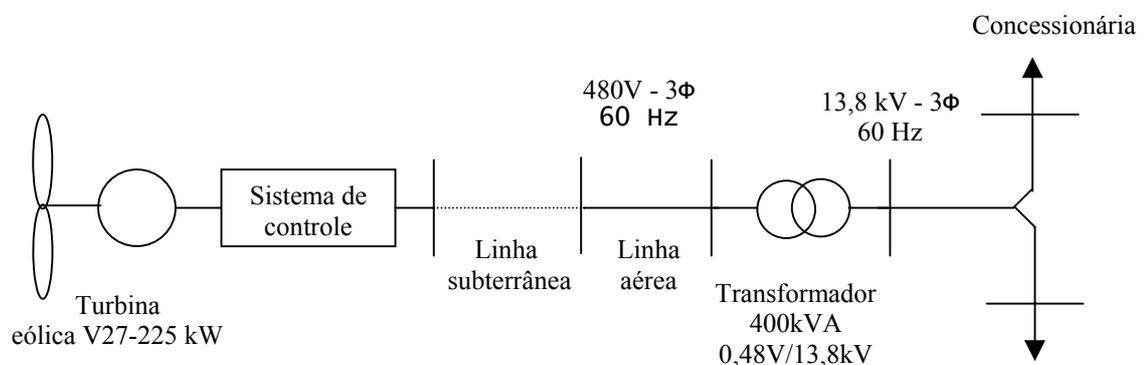


Figura 2.10 - Topologia da rede e instalação elétrica (turbina eólica V27-225 kW).

### 2.5.1 Conexão suave à Rede Elétrica

Uma dificuldade com a utilização de geradores assíncronos é que, quando conectado à rede elétrica, apresentam uma corrente chamada que pode atingir até 8 vezes o valor da corrente nominal (corrente de pico - "*inrush*"), devido ao processo de magnetização do gerador – Freris [11]. Para o estabelecimento de uma partida suave, a turbina eólica utiliza um equipamento de partida "*soft-start*", que realiza a conexão à rede elétrica de forma suave – Walker [26].

Para uma conexão suave, tanto na partida quanto para o desacoplamento da turbina, deve ser utilizado um banco de tiristores (dois tiristores por fase). O seu funcionamento está relacionado a um aumento ou diminuição do ângulo de disparo destes tiristores, os quais são controlado pelo sistema de controle.

A figura 2.11 apresenta o esquema do dispositivo de partida suave utilizado para efetuar a conexão de máquinas de indução à rede elétrica.

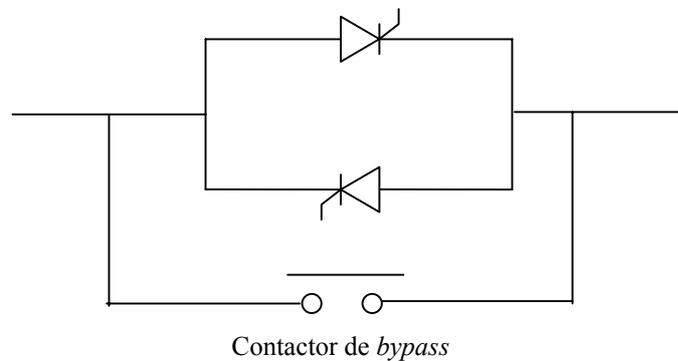


Figura 2.11 - Tiristores de partida suave para conexão da turbina eólica à rede .

### 2.6 Compensação de Reativo

O sistema de controle utiliza-se de transdutores de potência elétrica para controlar a energia reativa consumida pelo gerador e monitora a geração de energia elétrica.

O gerador de indução, embora não esteja gerando potência ativa, no momento de sua partida, está consumindo energia reativa para magnetização de suas bobinas. À medida que um torque é aplicado a potência ativa é injetada na rede elétrica, porém, mais energia reativa é absorvida da rede. Esse consumo é um problema indesejável, que leva à perdas elevadas na rede. por isso um banco de capacitores é conectado ao sistema de geração da turbina para fornecer potência reativa. O sistema de compensação é ativado após um determinado tempo da partida do gerador, verificado que os tiristores estejam desligados para que não haja problemas de autoexcitação da máquina e circulação de harmônicos nos capacitores – Freris [11].

### 3. TECNOLOGIA DE GERADORES DIESEL

São apresentadas as informações básicas que descrevem os componentes que formam o grupo gerador diesel, o modelo do regulador de tensão aplicado à um gerador síncrono e o modelo do regulador de velocidade aplicado à um motor diesel.

#### 3.1 Geradores Diesel

Os geradores diesel são constituídos por motores diesel acoplados a geradores de corrente alternada. O motor converte a energia química proporcionada pelo combustível fóssil (óleo diesel) em energia mecânica, que, por sua vez, através do acoplamento entre os eixos do motor e do gerador de corrente alternada faz com que este produza energia elétrica. O modo de funcionamento autônomo dos grupos geradores é garantido pelos equipamentos para supervisão e controle, monitorando e atuando sobre o fornecimento de energia elétrica às cargas dos consumidores. As demandas a serem atendidas, pelos geradores diesel, podem variar desde simples residências, até grandes consumidores industriais. Alguns fatores devem ser considerados, dependendo da aplicação dos grupos geradores no atendimento aos variados tipos de cargas dos consumidores, como por exemplo:

- o nível de ruído;
- a capacidade de operar em paralelo com outro grupo ou com a rede local;
- a capacidade de partida e parada automática;
- a telemetria e o controle remoto.

#### 3.2 Geradores Síncronos aplicados à Usina Termelétrica

Os geradores síncronos são máquinas que transformam a energia mecânica em energia elétrica fundamentando-se no princípio físico conhecido como Lei de Lenz ("em um meio onde há indução magnética, a direção da força eletromotriz, fem, induzida é tal, que o campo magnético dela resultante tende a se opor ao movimento que produz a força eletromotriz") – Pereira [23]. Os geradores síncronos são máquinas cuja frequência elétrica é diretamente proporcional o número de pólos magnéticos e à velocidade da rotação (frequência mecânica).

Os aspectos gerais sobre os geradores síncronos associados em paralelo alimentando uma rede elétrica fornecem dois motivos que justificam tal associação:

- economia;
- segurança.

As companhias geradoras de energia elétrica procuram produzir o quilowatt-hora pelo menor custo possível e, entre outros fatores de seu barateamento, consideram o rendimento das máquinas motrizes primárias e dos geradores. Quanto mais elevada a eficiência das máquinas, menor, conseqüentemente, será o custo da energia produzida. Como, de um modo geral, o rendimento máximo se verifica nas proximidades da plena carga – Sepúlveda [24], procuram fazer com que as máquinas trabalhem, tanto quanto possível, nessas condições. Este fato assume caráter mais importante, quando se trata de usinas termelétricas, em vista do elevado custo do combustível.

Como a demanda varia durante as várias horas do dia, principalmente comparando-se os períodos diurnos e noturnos, compreende-se que, com um único grupo gerador, não se poderia satisfazer a condição de funcionamento na região dos rendimentos elevados. Por esse motivo, a potência total da Usina deve ser fracionada em duas ou mais unidades independentes, o que permite ligar todos os geradores quando necessários ou retirar unidades na medida em que a

demanda diminui, conservando, tanto quanto possível, as unidades operando com valores próximos do ponto de rendimento máximo.

Percebe-se que há muito maior garantia e um perfeito e contínuo fornecimento de energia elétrica, quando se dispõe de duas ou mais máquinas, ao invés de uma só. Neste último caso, qualquer defeito no conjunto, na máquina motriz ou no gerador, interrompe completamente o fornecimento de energia, o que não acontece no outro caso, quando, no máximo, se limita a quantidade de energia a ser fornecida.

Também, para que se possa fazer a manutenção preventiva das máquinas e equipamentos da central geradora sem interrupção do fornecimento, é necessário que a central possua pelo menos duas máquinas.

### 3.2.1 Operação dos Geradores Síncronos em Paralelo

Os geradores síncronos que operam em paralelo devem repartir a carga total em proporção às suas capacidades de saída em quilowatt. Para sincronizar a máquina à rede, estas devem ser submetidos às condições necessárias – Elgerd [7], tais como:

1. o gerador deve girar com uma velocidade igual à do sistema, e no sentido apropriado. Isso é conseguido quando a tensão do gerador tiver uma frequência igual à tensão do sistema e ambas apresentarem a mesma seqüência de fases;
2. os fasores tensão, da máquina e do sistema, deverão ter módulos iguais, ou seja, por meio da corrente de campo, deve-se ajustar as forças eletromotrizes do gerador aos valores de tensão da rede;
3. as tensões da máquina e do sistema devem ter fase igual.

### 3.3 Componente de Controle de Potência de Geradores Síncronos

A potência ativa em sistema de potência é controlada por meio do controle exercido sobre os conjugados de acionamento dos geradores diesel individuais do sistema.

#### 3.3.1 Regulação de Tensão

Para induzir a força eletromotriz, necessita-se de um circuito magnético – o campo do gerador. Pode-se formar o campo por meio de ímãs permanentes naturais ou por meios eletromagnéticos, ao alimentar as bobinas que constituem os pólos com corrente contínua. Isto se denomina excitar a máquina por meio de uma fonte de corrente contínua denominada excitatriz – Pereira [23].

Para manter constante a tensão de saída do gerador, é necessário regular o sistema de excitação, através da variação da intensidade do campo magnético. Portanto, necessita-se de um regulador de tensão, que é o elemento capaz de monitorar as variações de tensão de saída do gerador e atuar diretamente na excitatriz para que essa aumente ou diminua o fluxo do campo magnético, mantendo constante a tensão para qualquer solicitação de carga. A forma construtiva, utilizada para a configuração básica do sistema de excitação do gerador é denominada excitação dinâmica. No sistema de excitação dinâmica, utiliza-se um gerador de corrente contínua montado no próprio eixo do gerador. Utiliza-se um pequeno gerador de pólos fixos, cuja corrente alternada gerada no induzido rotativo é retificada por uma ponte retificadora de onda completa, também girante, que transfere a corrente retificada diretamente ao campo do gerador, sem a necessidade de escovas – Pereira [23].

O regulador de tensão compara a tensão de saída do gerador com o valor de referência ajustado no potenciômetro de "ajuste de tensão" e efetua as correções atuando no campo da excitatriz. O diagrama da figura 3.1, por exemplo, representa o modelo do regulador de tensão para simulações no regime dinâmico – Elgerd [7].

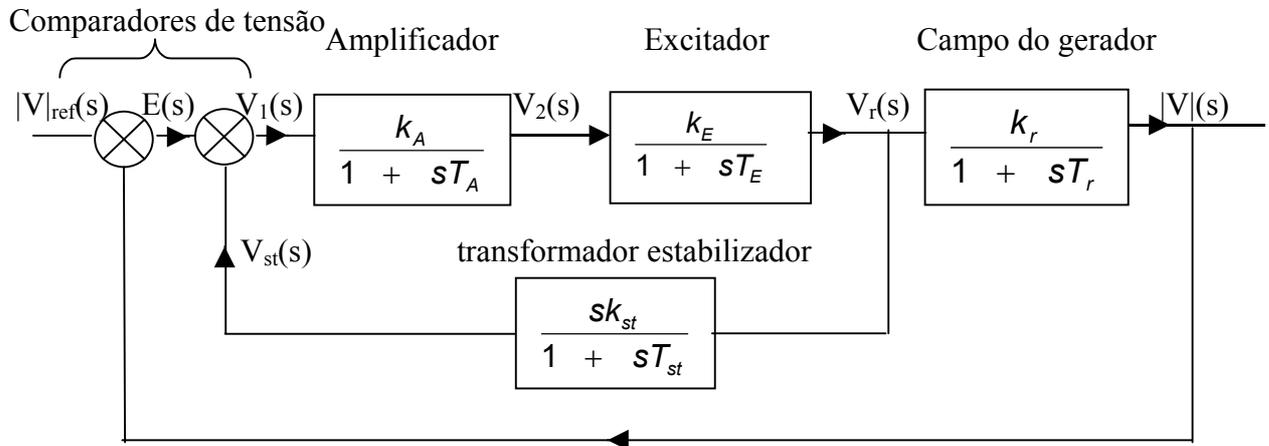


Figura 3.1. Modelo do regulador de tensão.

- comparador de tensão: a função desse dispositivo é comparar a tensão diretamente do terminal do gerador,  $|V|$ , com uma tensão de referência,  $|V|_{ref}$ . O valor do erro de tensão obtido, é dado pela Eq. (3.1).

$$E \triangleq |V|_{ref} - |V| = |V|_{ref} - (|V|_{ref} + \Delta|V|) = -\Delta|V| \quad (3.1)$$

$E$  – erro de tensão;

$|V|$  - tensão terminal do gerador;

$|V|_{ref}$  – tensão de referência.

- amplificador: pode-se caracterizar esse dispositivo através de um fator de ganho  $K_A$  e uma constante de tempo  $T_A$ , com um valor típico inferior a 100 ms. A função de transferência para o amplificador é apresentado pela Eq. (3.2)

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{k_A}{1 + sT_A} \quad (3.2)$$

$K_A$  – fator de ganho do amplificador;

$T_A$  – constante de tempo do amplificador.

- excitador: esse dispositivo, nesse sistema, atua tal qual um amplificador, apresentando uma função transferência semelhante, como visto na Eq. (3.3). A constante de tempo,  $T_E$ , do enrolamento do excitador, possui um valor aproximado de 1s.

$$\frac{V_r(s)}{V_2(s)} = \frac{k_E}{1 + sT_E} \quad (3.3)$$

$K_E$  – fator de ganho do excitador;

$T_E$  – constante de tempo do enrolamento do excitador.

- campo do gerador: deve-se encontrar uma função de transferência para relacionar a tensão do campo do rotor,  $v_r$ , com a tensão terminal  $|V|$ . Aceitando-se a idéia de que o gerador

esteja funcionando em aberto ou alimentando um circuito com uma carga muito leve, de modo que sua impedância vista dos terminais do gerador seja relativamente grande, permite-se o desprezo das correntes do estator. Como resultado, a componente do eixo direto da corrente do estator,  $i_d$  (obtida através da transformada de Blondel, aplicada às equações de Kirchoff para tensões dos circuitos da máquina síncrona – Elgerd [7]), será de valor desprezível, formando a Eq. (3.4)

$$v_r = r_r i_r + L_4 \frac{di_r}{dt} \quad (3.4)$$

$v_r$  – tensão do rotor;  
 $r_r$  – resistência do enrolamento do rotor;  
 $i_r$  – corrente de excitação do rotor;  
 $L_4$  – indutância própria do rotor;

A força eletromotriz do estator é igual à tensão terminal em condições de vazio, a partir dessa informação, pode-se observar a Eq. (3.5)

$$|V| = |E| = \frac{wL_5 i_r}{dt} \quad (3.5)$$

$|V|$  - tensão terminal do gerador;  
 $|E|$  - fem do gerador;  
 $w$  – velocidade do rotor;  
 $L_5$  – indutância mútua entre os enrolamento do rotor e do estator.

A função de transferência apresentada na Eq. (3.6) é obtida a partir das Eq. (3.4) e (3.5). A constante de tempo,  $T_r$ , igual, por definição, ao valor (constante) da indutância própria do rotor,  $L_4$ , dividida pela resistência do enrolamento do rotor  $r_r$ , apresenta, tipicamente, valor da ordem de vários segundos.

$$\frac{|V|(s)}{V_r(s)} = \frac{wL_5}{\sqrt{2}(r_r + sL_4)} = \frac{wL_5}{\sqrt{2}r_r} \frac{1}{1 + s\frac{L_4}{r_r}} \triangleq \frac{K_r}{1 + sT_r} \quad (3.6)$$

$K_r$  – fator de ganho;  
 $T_r$  – constante de tempo do enrolamento do rotor.

- circuito de estabilização: a função de transferência de malha aberta contém três pólos reais negativos, devido à malha de controle de tensão conter três constantes de tempo no denominador. A estabilidade dessa malha, seria prejudicada para altos ganhos de malha. Como a constante de tempo  $T_r$  é muito grande, necessita-se de um ganho de malha elevado que reduza a resposta de tempo da malha. Isso, tornaria o sistema instável. Para o procedimento de estabilização do sistema, utiliza-se um transformador que fornece uma realimentação derivada. Esse dispositivo fornece uma tensão  $v_{st}$ , proporcional à derivada de  $i_{st}$ , e, portanto, proporcional a  $v_r$ . Essa tensão  $v_{st}$ , é subtraída do erro de tensão e aplicada ao amplificador. O valor de  $v_{st}$ , na saída do transformador, é obtido da Eq. (3.7).

$$v_{st} = M \frac{di_{st}}{dt} \quad (3.7)$$

$v_{st}$  – tensão do transformador estabilizador;  
 $M$  – indutância mútua do transformador estabilizador;  
 $i_{st}$  – corrente do transformador estabilizador.

A corrente do primário do transformador é fornecida através da Eq. (3.8)

$$v_r = Ri_{st} + L \frac{di_{st}}{dt} \quad (3.8)$$

$R$  – resistência da bobina do primário do transformador estabilizador;  
 $L$  – indutância da bobina do primário do transformador.

Então, da Eq. (3.9), obtém-se a função de transferência do transformador estabilizador.

$$\frac{V_{st}(s)}{V_r(s)} = \frac{sM}{R + sL} \triangleq \frac{sk_{st}}{1 + sT_{st}} \quad (3.9)$$

$K_{st}$  – fator de ganho do transformador estabilizador;  
 $T_{st}$  - constante de tempo do transformador estabilizador.

### 3.4 Curva Característica do Gerador Diesel

O gerador diesel apresenta um elevado consumo de combustível funcionando em condição de vazio (à uma carga igual a zero) ou se funcionar por longos períodos com valores de cargas muito baixo, pode acarretar em uma operação indesejável por causar desgastes nos pistões e nos cilindros – Walker [26].

Uma curva linear de consumo de combustível em função da potência elétrica – Freris [10] é apresentada na figura 3.2. Observa-se que a curva característica do gerador apresenta o consumo máximo de combustível de 100 l/h atendendo à uma geração de potência de 400kW. O valor mínimo de potência está relacionado a um valor mínimo de carga recomendado à operação do motor diesel (a cerca de 40% da carga total).

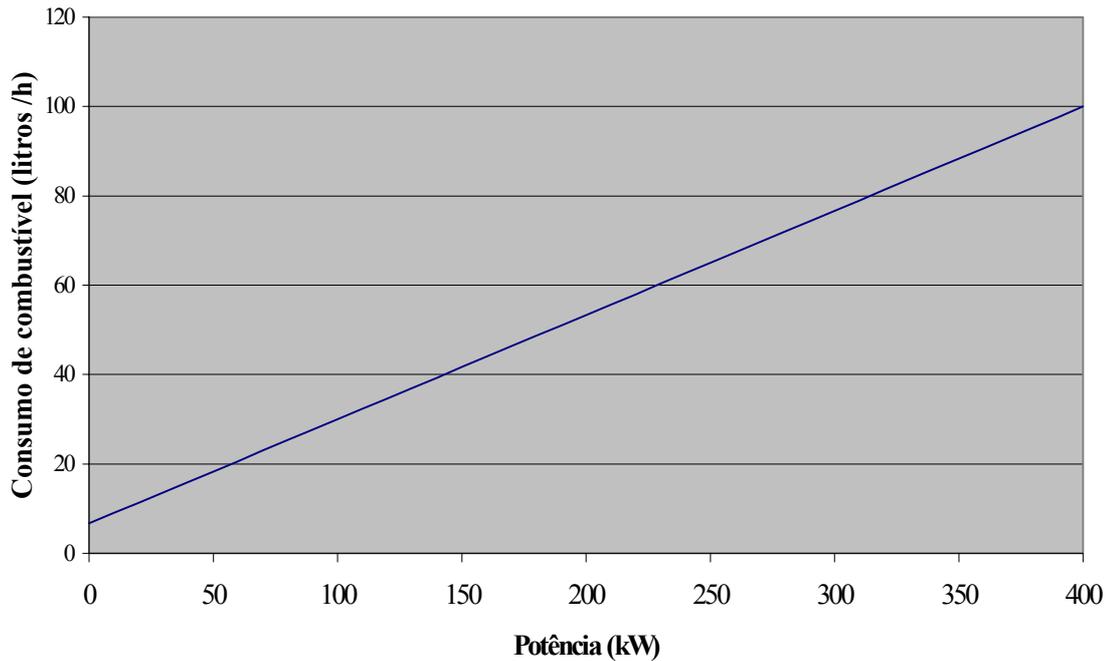


Figura 3.2 - Consumo típico de combustível de um gerador diesel.

### 3.5 Motores Diesel

É realizada uma breve explanação sobre as características dos motores diesel, relevantes à sua função operacional no sistema de geração termelétrica e, por conseguinte, a sua participação no sistema híbrido.

Os motores diesel são máquinas térmicas de combustão interna, utilizadas para fornecer energia mecânica ou força motriz de acionamento. O motor diesel classificado como estacionário é destinado ao acionamento de máquinas estacionárias, tais como os geradores elétricos síncronos e é constituído de várias partes, como por exemplo:

- admissão de ar;
- sistema de combustível (incluídos os componentes de injeção de óleo diesel);
- sistema de lubrificação;
- sistema de arrefecimento;
- exaustão ou escapamento dos gases;
- sistema de partida.

Nos motores diesel, o ar aspirado é comprimido no interior dos cilindros, que recebem o combustível injetado sob pressão ao final da compressão do ar. O gás de combustão aspirado ou induzido sob pressão é tão comprimido (temperatura entre 550 e 600° C), que se dá a auto-ignição. A combustão ocorre por auto-ignição, quando o combustível entra em contato com o ar aquecido devido ser submetido à uma pressão elevada.

O óleo diesel é uma mistura de hidrocarbonetos, obtido por destilação do petróleo por hidrogenação, síntese ou craqueamento catalítico a baixas temperaturas. Apresenta poder calorífico médio de 11.000 kcal/kg e um ponto de ebulição entre 200 e 300 °C.

O motor diesel (figura 3.3) utiliza um mecanismo que transforma os movimentos alternados dos pistões em movimentos rotativos da árvore de manivelas. Através desse

movimento rotativo, é transmitida a energia mecânica aos equipamentos, tais como os geradores de corrente alternada (geradores).

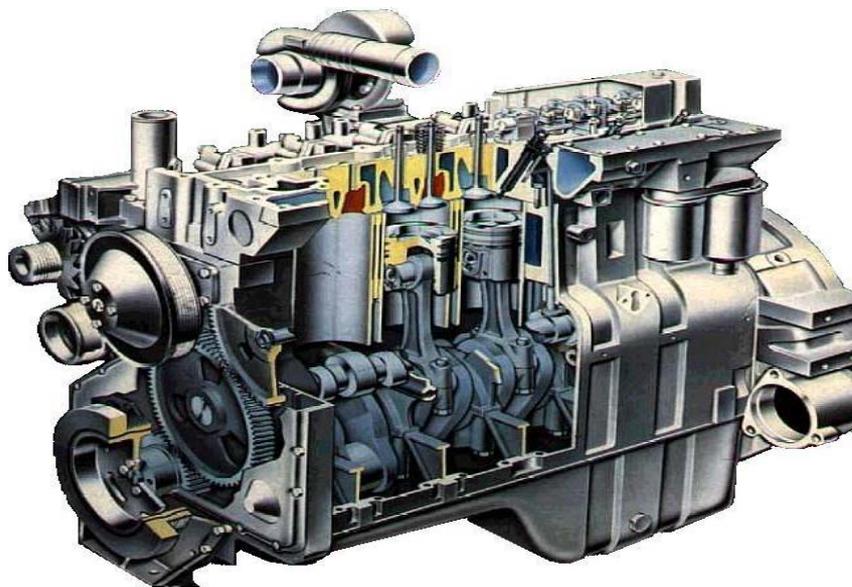


Figura 3.3 - Motor diesel e detalhe interno dos pistões.

### 3.6 Regulação de Velocidade

A regulação de velocidade se refere à capacidade do sistema de manter a velocidade pré-ajustada sob cargas variáveis. Os motores são providos de equipamentos de controle, através dos quais as suas características podem ser modificadas e as condições de funcionamento podem ser alteradas para se adaptarem às exigências particulares de carga mecânica.

Nos equipamentos de controle são incorporados circuitos para limitar o conjugado do motor durante os períodos de aceleração ou de sobrecarga para obter acelerações controladas de alta inércia, para proteger o motor e o equipamento de controle de sobrecorrente e para prevenir que o sistema atinja regiões de operação instável.

A máxima quantidade de combustível que pode ser injetada é controlada pelo sistema de controle de velocidade. Quando a rotação do motor tende a cair com o aumento da carga ou a aumentar com a sua redução, o mecanismo deve ser capaz de controlar essa rotação. São dispositivos, conhecidos como governadores de velocidade de rotação, que asseguram o controle da dosagem de combustível em função das solicitações da carga. Para os motores dos grupos geradores diesel, a regulação da velocidade é muito importante, uma vez que a frequência da tensão gerada no gerador necessita ser mantida constante, ou seja, o motor diesel deve operar em rotação constante, independente das solicitações da carga. Isto significa que para cada aparelho elétrico que se liga ou desliga, o governador deve corrigir a quantidade de combustível injetada, sem permitir variações da velocidade – Pereira [23]. Para solucionar o problema, existem três tipos básicos de governadores:

- governadores mecânicos;
- governadores hidráulicos;
- governadores eletrônicos.

Os governadores eletrônicos são mais utilizados, devido ao seu custo reduzido e por oferecerem a melhor precisão de regulação que se pode conseguir. São compostos pelos seguintes elementos:

- 1) *pick-up* magnético - é uma bobina enrolada sobre um núcleo ferromagnético e instalado na carcaça do volante, com a proximidade adequada dos dentes da cremalheira. Com o motor em funcionamento, cada dente da cremalheira, ao passar próximo ao *pick-up* magnético, gera um pulso de corrente elétrica que é captado pelo regulador;
- 2) regulador eletrônico (ou unidade de controle) - a frequência dos pulsos é comparada, pelo regulador, com o valor pré-determinado. O regulador altera o fluxo da corrente enviada para o atuador, caso detectada alguma diferença entre esses sinais;
- 3) atuador - efetua as correções do débito de combustível, para mais ou para menos, conforme a necessidade.

### 3.6.1 Regulador de Velocidade do Motor Diesel

É necessário, primeiro, constatar que houve uma variação de velocidade de rotação para, em seguida, efetuar a correção. O tempo de resposta é ajustado até um limite mínimo, a partir do qual o funcionamento do motor se torna instável, por excesso de sensibilidade. Uma vez obtido o melhor tempo de resposta, a quantidade de velocidade rotacional que pode variar dentro deste tempo depende da solicitação da carga. Uma grande variação brusca na carga induz uma variação proporcional da velocidade de rotação.

Para a regulação de velocidade, a potência ativa em um sistema de potência é controlada por meio do controle exercido sobre os conjugados de acionamento dos geradores diesel individuais do sistema. A figura 3.4, por exemplo, representa o modelo linear de primeira ordem do regulador de velocidade para simulações no regime dinâmico de um gerador diesel - Hunter [14].

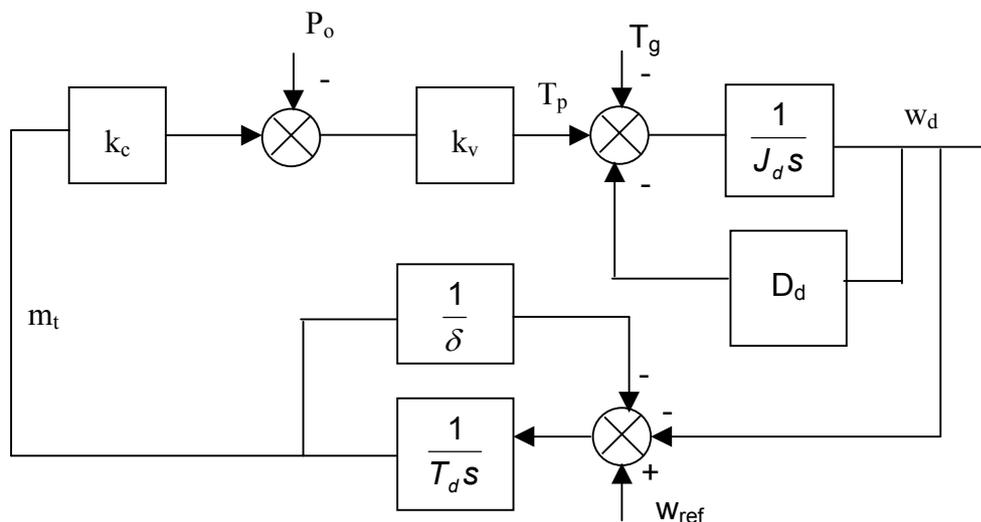


Figura 3.4 - Modelo de primeira ordem de um grupo gerador diesel com regulador de velocidade.

A equação diferencial, indicada na Eq. 3.10, descreve a velocidade do gerador diesel,

$$\frac{dw_d}{dt} = \frac{(k_v \cdot (k_c \cdot m_f \cdot -p_o) - D_d \cdot w_d - T_g)}{J_d} \quad (3.10)$$

e o consumo de combustível neste modelo está apresentada na Eq. 3.11

$$\frac{dm_f}{dt} = \frac{(w_d - w_{ref} - m_f / \delta)}{T_d} \quad (3.11)$$

$w_d$  – velocidade do motor;  
 $w_{ref}$  – velocidade de referência;  
 $\delta$  – ganho constante do regulador de velocidade;  
 $T_d$  – constante de tempo do regulador;  
 $m_f$  - consumo do óleo diesel;  
 $k_c$  – constante de eficiência da combustão;  
 $P_o$  – pressão da câmara do motor operando nas condições ideais;  
 $K_v$  – volume de combustível dos pistões;  
 $T_p$  – torque produzido;  
 $T_f$  – torque por atrito;  
 $T_g$  – torque da carga do gerador;  
 $D_d$  – constante de perdas por atrito;  
 $J_d$  – momento de inércia total do motor e do gerador.

### 3.7 Componentes de Supervisão e Controle

O funcionamento dos sistemas automáticos de geração termelétrica exige que seja requerido o mínimo de intervenção humana, nos serviços de supervisão e controle, de forma que as correções da tensão e da frequência fornecidas, devem ser realizadas automaticamente. No caso dos grupos geradores diesel, se o funcionamento dos sistemas de lubrificação ou de refrigeração apresentar alguma deficiência, o motor diesel poderá sofrer graves danos antes que seja possível uma intervenção do operador. Neste caso, são utilizados dispositivos, tais como as válvulas de pressão e termostática para atuarem respectivamente na regulação da pressão do óleo lubrificante e da temperatura da água de refrigeração.

Os motores diesel para aplicação em grupos geradores são dotados de sistemas de proteção, que incluem:

- pressostato do óleo lubrificante: tem a função de comandar a parada do motor diesel quando a pressão do óleo lubrificante cai abaixo de um valor predeterminado;
- termostato para água de refrigeração: tem a função de comandar a parada do motor diesel quando a temperatura do meio refrigerante ultrapassa um valor predeterminado;
- sensor de sobrevelocidade: utilizado para comandar a parada do motor diesel, quando a velocidade de rotação ultrapassa valores pré estabelecidos (geralmente 20% acima da rotação nominal);

- d) sensor de nível do líquido de refrigeração: indica a necessidade de completar o nível do sistema de refrigeração;
- e) relé taquimétrico: tem a finalidade de desligar o motor de partida quando a rotação do motor diesel ultrapassa determinado valor;
- f) sensor de ruptura da correia: é realizada a parada do motor antes da temperatura da água se elevar, no caso de ruptura da correia da bomba d'água;
- g) sensor de frequência: pode ser utilizado para supervisionar tanto a frequência do grupo gerador quanto da rede local. Nos grupos geradores equipados com sistemas de partida automática, comanda o desligamento da rede local e aciona a partida automática do grupo gerador, ou vice-versa, comanda a parada do grupo gerador e transfere a carga para a rede local quando há anormalidade na frequência do gerador;
- h) sensor de tensão da rede e do grupo: atuam como no caso dos sensores de frequência, comandando a partida e a parada, conforme o caso;
- i) outros instrumentos: para avaliação de performance o motor diesel é dotado de manômetro para o óleo lubrificante, termômetro para o sistema de lubrificação, chave de partida, comando de parada manual, indicador de carga da bateria e outros;

## 4. SISTEMAS ISOLADOS NO BRASIL – OPERAÇÃO COM DIESEL

### 4.1. Valores de Produção e Consumo de Óleo Diesel no Brasil

Os valores da produção de óleo diesel e do seu consumo em diversos setores econômicos no Brasil, na década de 1990, são expostos na tabela 4.3. Verifica-se que no ano de 1990 a produção de óleo diesel excedeu o consumo, porém nos anos de 1991 à 1999 o Brasil importou parte do combustível. Percebe-se a extensão da sua dependência como fonte estratégica de energia, incluindo sua utilização para a produção de eletricidade.

Observa-se que pela utilização desse combustível no setor de transformação (geração de eletricidade), a economia no consumo de óleo diesel apresenta-se como justificativa para serem intensificadas as pesquisas e os empreendimentos direcionados à aplicação dos sistemas híbridos eólico/ diesel.

Tabela 4.3 - Produção e Consumo de óleo diesel (1990 à 1999) - unidade:  $10^3 \text{ m}^3$ .

Fluxo	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Produção	24160	23844	24300	23450	26216	25879	26729	27959	29409	32261
Consumo final	23936	24927	25540	26275	27341	28949	30101	31664	33107	33505
Transformação	653	657	817	721	763	1084	1023	1378	172	1966
Setor energético	490	516	576	377	282	169	196	211	245	280
Comercial	45	48	50	55	80	82	81	80	87	83
Público	94	100	85	92	210	211	93	173	178	293
Agropecuário	3710	3878	3976	4394	4610	4910	5145	5351	5191	5374
Transportes	19232	20040	20394	20914	21618	23014	24063	25269	26796	26894
Industrial	365	345	369	443	541	563	523	580	610	581

Fonte: Ministério das Minas e Energia – MME

### 4.2 Sistemas Isolados - Unidades Termelétricas a Óleo Diesel no Brasil

Os Sistemas Isolados utilizam-se de diversas unidades termelétricas a óleo diesel. São responsáveis pelo fornecimento de eletricidade à mais de 300 localidades remotas, estando a maioria situada na Região Norte. São responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica a grandes centros urbanos, tais como Boa Vista, Macapá, Manaus, Porto Velho e Rio Branco e por suprir locais remotos.

A capacidade total nos Sistemas Isolados, no Brasil, é cerca de 1.400 MW – ELETROBRÁS [1]. Na Região Norte, há um parque gerador de 1.148 MW (que representa 82% da capacidade total). Os restantes 18% estão distribuídos pelos Estados do Maranhão, Pernambuco, Tocantins, Bahia, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e Rio Grande do Sul, que apesar de comporem os Sistemas Interligados, possuem Sistemas Isolados de pequeno porte, totalizando 252 MW.

### 4.3 Projetos de Unidades Termelétricas a Óleo Diesel

A resolução n.º 112/99, estabelece os requisitos necessários à obtenção do registro ou autorização, junto à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes renováveis de energia. A aplicação dessa resolução se estende à pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcios interessados em produzir energia elétrica, destinada à comercialização de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco, através da figura do Produtor Independente de Energia Elétrica (PIE) ou da pessoa física ou jurídica interessada em

produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, configurando a presença do Autoprodutor de Energia Elétrica (AP), dependendo de concessão ou autorização, outorgada na forma da legislação em vigor e do Decreto N.º 2.003, de 10 de setembro de 1996.

No que se refere à resolução n.º 112, alguns Sistemas Isolados que utilizam a produção de energia elétrica através das unidades termelétricas a óleo diesel em operação estão apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Capacidade instalada das UTE's a óleo diesel por região, no Brasil.

Sistemas Isolados	Quantidade por Região					Potência (MW)
	N	NE	S	CO	SE	
PIE	7	-	-	-	-	576,72
PIE / AP	1	-	-	2	3	241,90
SERVIÇO PÚBLICO	7	3	-	2	-	607,39
Em fase de autorização	1	-	-	-	-	22,4

Fonte: ANEEL.

#### 4.4 Legislação Aplicada ao Mercado de Energia Elétrica do Brasil

O mercado de energia elétrica do Brasil está se estruturando em busca de um processo de desenvolvimento auto-sustentável. Os aspectos da Legislação e do Mercado de Energia Elétrica no Brasil fizeram com que o Governo Federal criasse uma lei específica, a Lei n.º 9.648, aprovada em maio de 1998, dando origem ao Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE. A função do MAE é estabelecer um processo comum entre os produtores, distribuidores e consumidores de energia elétrica, para a realização da comercialização de energia. Foi criado Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em julho de 1998, através do Decreto n.º 2.655. A sua função é supervisionar e controlar a operação dos sistemas interligados de transmissão de energia elétrica. A finalidade é de melhorar os custos operacionais e garantir a confiabilidade do sistema. Também está sob seus cuidados a administração das condições de acesso à rede, em consequência das privatizações do setor elétrico no Brasil e introdução de competição de tarifas do setor. A reestruturação do setor elétrico brasileiro, com o objetivo de atender a necessidade de descentralizar o suprimento de energia elétrica para a população brasileira, motiva a criação de incentivos ao desenvolvimento de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

O setor elétrico brasileiro assumiu, durante várias décadas, parte da responsabilidade dos custos para o desenvolvimento econômico e industrial do país. Através do capital necessário para o crescimento urbano e industrial e devido à exploração dos potenciais hidráulicos, manteve-se a energia elétrica em larga escala e baixo custo. As redes de transmissão de energia foram utilizadas para descentralizar a disponibilidade de energia para as regiões afastadas dos centros de geração. Esse desempenho cumpriu-se nas regiões Sul, Sudeste e grande parte das regiões Nordeste e Centro-Oeste. Na região Norte, há localidades, que por questões de obstáculos naturais e barreiras logísticas estão associadas à localidades de grandes extensões geográficas. Por isso, tornam-se dependentes da intervenção do Governo no custeio dos combustíveis fósseis (óleo diesel, por exemplo), para que a geração termelétrica descentralizada possa atender aos consumidores dessas regiões com tarifas uniformizadas e compatíveis. A Conta de Consumo de Combustíveis, em vigor desde 1993, arrecada recursos junto às concessionárias de energia elétrica do sistema interligado, para financiar o óleo diesel

da geração termelétrica das áreas isoladas, não atendidas pelo serviço de eletrificação convencional, principalmente na Região Norte do País.

O setor energético era formado por empresas estatais, até a realização do programa de privatização dessas estatais imposto pelo Governo. Atualmente, o setor conta com empresas privadas e públicas nas áreas de geração, distribuição e transmissão de energia.

#### 4.5 Origem das Contas de Consumo de Combustíveis

O Governo estabeleceu que os encargos e as vantagens originados do consumo dos combustíveis fósseis, utilizados para atender às necessidades do sistema interligado, fossem rateados entre todas as empresas concessionárias, Lei nº 5.899/73. As medidas sobre o rateio do custo de consumo de combustíveis abrangem todos os distribuidores de energia elétrica através da criação da Conta de Consumo de Combustíveis, Decreto nº. 774/93, art. 22, produzindo-se reservas financeiras para cobertura desse custo. Grande parte da capacidade instalada de geração termelétrica nacional passou a dispor dos recursos da Conta de Consumo de Combustíveis. É estabelecido que essa Conta esteja disposta em três sub-contas distintas:

- Conta de Consumo de Combustíveis destinada a cobrir os custos de combustíveis fósseis da geração termelétrica apresentados no Plano de Operação do Sistema Interligado do Sul, Sudeste e Centro Oeste, tendo como contribuintes todos os concessionários que atendam aos consumidores finais, conectados a esse sistema interligado;
- Conta de Consumo de Combustíveis aplicada para os custos constantes no Plano de Operação do Sistema Interligado do Norte e Nordeste, com a mesma finalidade que a sub-conta anterior;
- Conta de Consumo de Combustíveis utilizada para os custos apresentados no Plano de Operação dos Sistemas Isolados, tendo como contribuintes todos os concessionários do país que atendam a consumidores finais.

##### 4.5.1 Contas de Consumo de Combustíveis

A Conta de Consumo de Combustíveis arrecada recursos junto às concessionárias de energia elétrica do sistema interligado, com a finalidade de suprir os recursos financeiros para a geração de energia elétrica com o uso de combustíveis fósseis, garantir o preço uniforme da energia elétrica fornecida às áreas isoladas (em sua maioria, encontradas na Região Norte do País) e atender às necessidades de ponta de consumo dos sistemas interligados.

Os recursos da Conta de Consumo de Combustíveis são administrados pela ELETROBRÁS. O papel da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL é fixar os valores das cotas anuais da conta de consumo de combustíveis, recolhidas mensalmente nas contas de luz pelas distribuidoras de energia elétrica. A ANEEL estabelece os procedimentos para a composição dessa conta e o seu gerenciamento, Resolução nº 350/99.

#### 4.5.2 A Aquisição dos Benefícios da Conta de Consumo de Combustíveis por Fontes Renováveis de Energia Elétrica.

A sistemática da Conta de Consumo de Combustíveis, apesar de subsidiar os combustíveis fósseis e uniformizar os preços de energia elétrica para atender às áreas isoladas, também contribui para a crescente obsolescência do parque termelétrico do país. Na medida em que se estabelece a diminuição da utilização do combustível fóssil, oneram as concessionárias do Sistema Interligado, repassando custos para as tarifas de todos os consumidores finais. Por esses motivos, determinou-se que a geração elétrica a partir de fontes renováveis de energia, implantadas em Sistemas Isolados, substituindo a geração termelétrica com derivados de petróleo, deve assumir o benefício da sistemática da Conta de Consumo de Combustíveis [Lei n.º 9.648/98], oferecendo campo de investimentos às implantações de sistemas híbridos eólicos/diesel, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) e outras fontes renováveis.

#### 4.6 Procedimentos para o Gerenciamento da Conta de Consumo de Combustíveis

A ELETROBRÁS estabelece as quantidades de combustíveis necessárias ao atendimento da geração termelétrica prevista, através do Plano Anual de Combustível do Sistema Interligado e dos Sistemas Isolados e, determina o aporte financeiro necessário à cobertura das despesas em cada uma das subcontas, com base nos quantitativos apontados.

Para a elaboração do Plano Anual de Combustível, a ELETROBRÁS utiliza os dados e informações a seguir:

- previsão da geração térmica – informação fornecida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico para os sistemas Isolados;
- consumo específico – valores médios calculados a partir de informações obtidas das empresas;
- preços de referência dos combustíveis – valores obtidos por meio das Solicitações de Reembolso - SDR (a Conta de Consumo de Combustíveis - Sistemas Isolados reembolsa os dispêndios com combustíveis que excedam os montantes correspondentes ao respectivo custo da energia hidráulica equivalente, o qual corresponde ao valor de geração hidráulica que poderia substituir totalmente a geração térmica, caso os sistemas estivessem completamente interligados);
- percentual do rateio – obtido com base em informações de vendas diretas a consumidores finais, referente ao ano anterior em que se está realizando o Plano;
- parque térmico – composto pelos dados das autorizações emitidas pela ANEEL.

#### 4.7 Perspectivas de Evolução da Conta de Consumo de Combustíveis

No ano de 2000, mesmo com os recursos da Conta de Consumo de Combustíveis transferidos em benefício de empreendimentos de energia, a partir das fontes renováveis, houve uma certa falta de interesse das empresas de geração e distribuição, concessionárias ou autorizadas, em desprezarem os recursos das restituições do dinheiro desembolsado aos combustíveis fósseis. Nas regiões em que se encontram os sistemas isolados, as empresas passam por ajustes, geralmente associados a processos de privatização. Isso resulta em resistências de caráter estratégico quanto à aceitação e implementação de novas regras impostas pela reestruturação do setor de energia elétrica, voltadas tanto para a competição

de mercado como entre fontes de energia. Há insegurança de produtores independentes ou investidores na área de geração quanto ao emprego de capital em projetos de fontes renováveis, uma vez que não tenham previamente assegurada a venda de energia para a concessionária local.

Não existe obrigatoriedade das empresas concessionárias ou autorizadas de migrarem do uso de combustíveis fósseis para o uso de energias renováveis.

Mesmo que seja realizado o acordo da venda de energia e haja a aprovação do concessionário local, do ponto de vista financeiro, o benefício da sub-rogação para a geração com fontes renováveis não possibilita a redução do risco do investidor. O custo financeiro associado ao endividamento inicial do empreendimento é mantido.

## 5. SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL: CONCEITOS

O sucesso do projeto e aplicação dos sistemas eólicos/diesel com alta penetração de energia eólica está na determinação da quantidade de combustível economizado. As altas penetrações de energia eólica são conseguidas com a aquisição de equipamentos adicionais e sistemas de controle, quando comparado à conexão de turbinas eólicas padronizadas conectadas à rede convencional. Por isso, para que haja vantagem, o custo adicional do equipamento extra e do sistema de controle deve ser pago pela economia adicional de combustível. Embora, devido ao controle e à operação mais complexos, de tal sistema com alta penetração, a predição do potencial de combustível economizado de um dado sistema, é também mais complexa.

O desenvolvimento do sistema eólico/diesel baseia-se nos conceitos adquiridos com a utilização de turbinas eólicas padronizadas conectadas à rede elétrica. O motivo para que sejam utilizadas turbinas padronizadas em projetos de sistemas eólicos/diesel é porque se torna melhor do que os projetos desenvolvidos apenas para cada aplicação. Por essa razão, os sistemas eólicos/diesel consistem basicamente da existência de turbinas eólicas e geradores diesel encontrados no comércio, com a adição dos componentes para controle de frequência e de armazenamento de energia quando solicitado e os sistemas de controle supervisórios.

A escolha do sistema está entre um número de características fundamentais. Em um sistema eólico/diesel, a escolha de qualquer componente específico passa a necessitar da utilização de outros componentes. Por isso, pequenas decisões sobre os sistemas componentes implicam na definição do sistema inteiro. Por exemplo, uma turbina eólica utilizando gerador de indução necessita de potência reativa para a magnetização do gerador. A potência elétrica produzida pela turbina pode ser controlada por um sistema de regulação do ângulo de passo das pás (regulação por *pitch*) ou por *stall*. Os geradores diesel em um sistema eólico/diesel têm um gerador síncrono auto magnetizado, o qual supre potência ativa e reativa à rede elétrica. As turbinas eólicas podem utilizar um gerador síncrono ou assíncrono, dependendo do tipo de aplicação a que se destina o sistema. Um sistema híbrido eólico/diesel pode incluir armazenamento de energia, tais como em baterias ou em volantes de inércia. Todos os componentes podem utilizar independentes reguladores os quais regulam, por exemplo, a frequência, a tensão, independentemente, e muitas vezes incluem funções supervisórias independentes. Por isso, simples conceitos de sistemas eólicos/diesel podem ser criados, sem a necessidade de outros sistemas de controle supervisórios, enquanto que sistemas mais avançados devem ter um sistema de controle e monitoramento cujas complexidades aumentarão com a complexidade do conceito do sistema.

### 5.1 Configurações de Sistemas Híbridos Eólico/Diesel

Há várias configurações combinando diferentes princípios de controle e operação de sistemas híbridos eólico/diesel – AWEA [27].

São apresentadas quatro configurações dos sistemas híbridos eólicos/diesel que podem ser analisadas como sendo três delas baseadas sobre as turbinas eólicas com geradores de indução e uma baseada sobre turbinas com qualquer tipo de gerador – Lundsager [19].

#### 5.1.1 Turbina Eólica/Grupo Gerador Diesel – Configuração 1

Um sistema como o da configuração 1 (figura 5.1) é o mais simples conceito possível. Uma turbina eólica comercial com um gerador de indução trabalha independentemente como um turbina eólica conectada à rede, mas a turbina é modificada devido à utilização de *dump*

*load* (dissipador de potência) com o objetivo de evitar da turbina eólica acelerar a rede elétrica em situações com excesso de energia eólica.

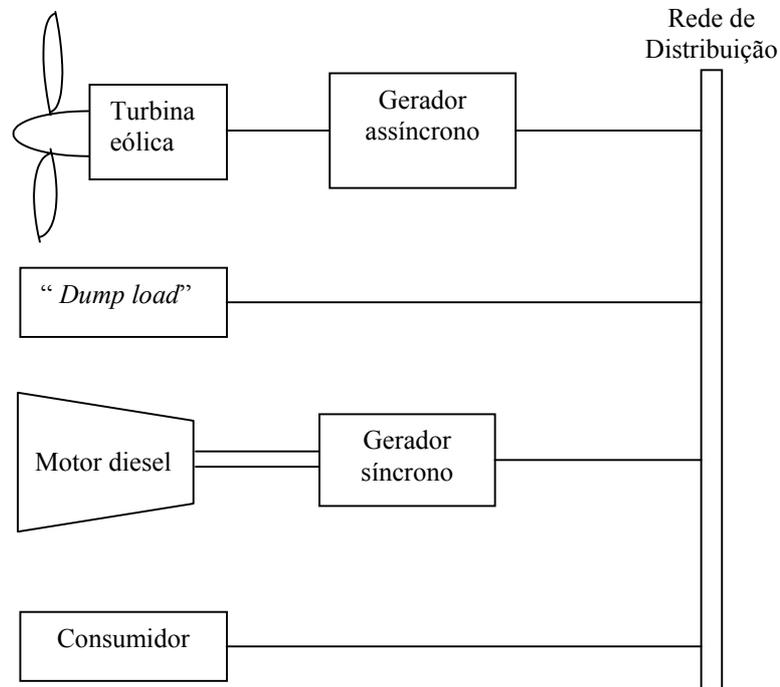


Figura 5.1 - Sistema híbrido eólico diesel - Configuração 1

No caso mais simples o dissipador de potência dispõe de sua própria frequência de controle. o gerador diesel comercial está sempre em operação, assim assegurando a potência reativa necessária ao funcionamento da turbina. Uma penetração eólica em excesso de 100 % é possível, e o sistema não se utiliza de um sistema de controle supervisorio.

A turbina tem um gerador de indução porque a experiência tem mostrado que não é praticável acoplar uma turbina com geradores síncronos diretamente ao gerador síncrono de um grupo gerador diesel. Não há armazenagem, isto é, não há baterias ou conversores de potência, mas o sistema é simples e a regulação é fácil de entender. A economia de combustível é modesta, devido ao alto consumo de combustível, específico para o atendimento de parte da carga. Mas ao mesmo tempo o sistema não necessita de um investimento tão elevado, para ser implantado. O conceito é adequado em situações onde a máxima segurança é mais importante do que a máxima economia de energia.

### 5.1.2 Turbina eólica/Grupo Gerador Diesel Modificado - Configuração 2

O sistema da configuração 2, apresentado na figura 5.2, é uma modificação do conceito básico, no qual o grupo gerador diesel é modificado com uma embreagem e um pequeno volante de inércia entre o motor diesel e seu gerador síncrono. A turbina ainda tem um gerador de indução, e não há armazenagem de energia ou unidade de conservação de potência. Assim, o gerador de indução da turbina é acoplado diretamente contra o gerador

síncrono do grupo gerador diesel, e conseqüentemente as perdas de conversão de potência são pequenas.

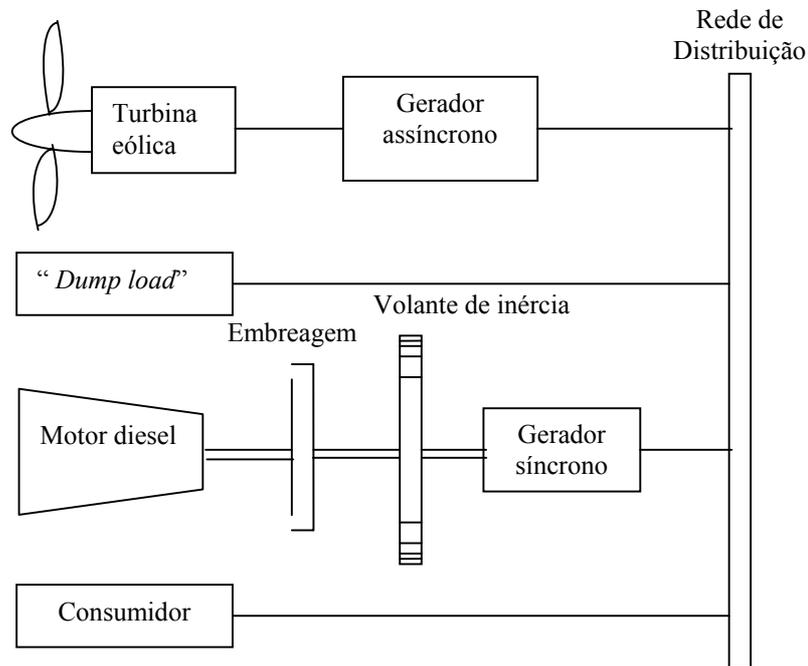


Figura 5.2 – Sistema híbrido eólica/diesel - Configuração 2

A embreagem torna possível a parada do motor diesel quando houver potência suficiente da turbina eólica para satisfazer a demanda do consumidor, e nessa situação o *dump load* é necessário para controlar a frequência. O gerador síncrono opera, suprindo potência reativa ao gerador de indução e à rede elétrica, enquanto que o volante de inércia ajuda a suavizar as flutuações de frequência e permite rápidas paradas do diesel sem uma queda muito grande na frequência.

O volante de inércia não é um meio de armazenamento de energia visto que pode suprir a potência nominal por um ou dois segundos apenas. O sistema precisa de um sistema supervisor de controle para tomar as decisões considerando as partidas e paradas do motor diesel, mas um sistema muito simples é o suficiente.

O sistema da configuração 2 oferece uma considerável simplicidade e um mínimo de componentes eletrônicos. A economia de combustível é maior por causa do combustível diesel não utilizado ser também economizado devido à possibilidade de partida e parada do motor diesel, mas uma penalidade adicional é o problema associado com as partidas e paradas do diesel. O conceito é adequado onde um sistema seguro, com uma simples manutenção seja importante, mas onde uma melhor economia de combustível seja mais importante do que uma simplicidade absoluta.

### 5.1.3 Turbina Eólica/Grupo Diesel Gerador Modificado/Armazenagem: Configuração 3

Um sistema com a configuração 3, exposto na figura 5.3, é um sistema de configuração 2 onde um meio de armazenagem de energia é adicionado junto com a unidade de conversão de potência. o armazenamento pode ser por uma variedade de dispositivos, tais como banco de baterias, acumuladores hidráulicos, bombas de água, volantes de inércia de velocidade variável, e outros. A capacidade de armazenagem pode ser de curto período para um longo período (horas ou até dias).

Este conceito utiliza turbinas eólicas com geradores de indução. Por isso, os grupos geradores diesel têm uma modificação na embreagem e no volante de inércia. Por causa da armazenagem de energia o motor diesel agora pode ser parado por longos períodos e as horas de operação podem ser diminuídas em parte, mas com uma penalidade de uma certa perda em conversão de potência e armazenagem de energia. Entretanto, por causa do gerador de indução a turbina eólica pode fornecer um caminho alternativo à unidade de conversão de potência e suprir potência diretamente ao barramento, quando a armazenagem não for utilizada. Isto leva as perdas da conversão de potência a serem minimizadas.

O sistema da configuração 3 oferece um razoável grau de simplicidade ao mecanismo e potencialmente uma elevada taxa de economia de combustível juntamente com a habilidade de apresentar um tipo de falha sem gravidade, desde que possa operar como um sistema de configuração 2 ou até mesmo como um sistema de configuração 1 antes de falhar completamente. A penalidade é um controle lógico mais complexo desde que o sistema de controle supervisorio passe a controlar a conversão e a armazenagem, e um número de configurações que tenham que ser escolhidas e monitoradas. O desgaste do motor diesel é minimizado, como as perdas em *dump load* e conversão de potência, mas através de gastos adicionais de componentes eletrônicos e mecânicos. O conceito é adequado em casos onde a armazenagem de energia é requerida e onde um máximo de economia de combustível é procurado nos gastos da simplicidade do sistema. Desde que o conceito possa operar em vários graus de interrupções (falhas) é ainda um sistema relativamente robusto.

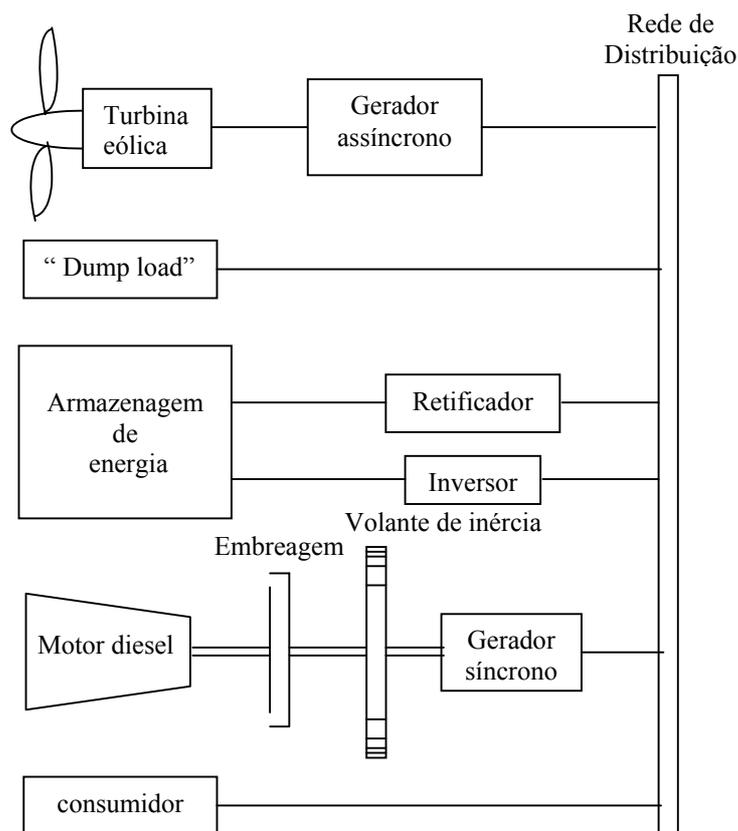


Figura 5.3 – Sistema híbrido eólico/diesel - Configuração 3

#### 5.1.4 O Sistema Integrado: Configuração 4

O conceito integrado sobre o sistema da Configuração 4, pode ser visto na figura 5.4, como uma turbina eólica auto-suficiente conectada à rede elétrica local através de uma

unidade de conversão de potência com um dispositivo de armazenamento de energia. O grupo gerador diesel é em geral sem embreagem, e pode ser operado, sobretudo, como uma unidade de carregamento de baterias, operando ou não em máxima eficiência. A turbina eólica pode utilizar geradores de indução ou síncrono, desde que um inversor possa operar em qualquer ângulo de fase e a turbina eólica nunca esteja conectada diretamente a rede elétrica.

O sistema tem um potencial para máxima utilização dos recursos de energia, embora a um custo de um máximo de perdas em conversão de potência e armazenagem de energia. Não é possível, geralmente, acoplar a turbina eólica diretamente ao barramento, e por essa razão as perdas de conversão de potência não podem ser evitadas. O sistema de controle supervisorio deve ser um sistema computadorizado com o objetivo de desempenhar todas as funções necessárias considerando a escolha, regulação, controle e monitoramento de configuração do sistema, e o sistema tem todos os benefícios e desvantagens de um sistema completamente eletrônico. Mecanicamente o sistema é tão simples como o sistema da configuração 1.

Assim, com a simplicidade de um sistema com configuração 1, o sistema de configuração 4 oferece um máximo de otimizações e versatilidade na operação (operação da velocidade variável da turbina eólica) e potencialmente um máximo de combustível economizado. Um sistema desse conceito pode ser conectado à uma instalação de potência diesel local sem modificação do diesel já existente.

Os problemas são um máximo de complicações de sistemas de controle e componentes eletrônicos de potência, e uma perda de potência na conversão de energia as quais podem ser consideráveis, e o conceito de não poder operar em graus de falha mecânica nos componentes eletrônicos. O conceito é adequado em situações onde a ótima economia de combustível é procurada nos gastos de simplicidade dos eletrônicos, e onde suficientemente a mão-de-obra qualificada de operação e manutenção esteja disponível.

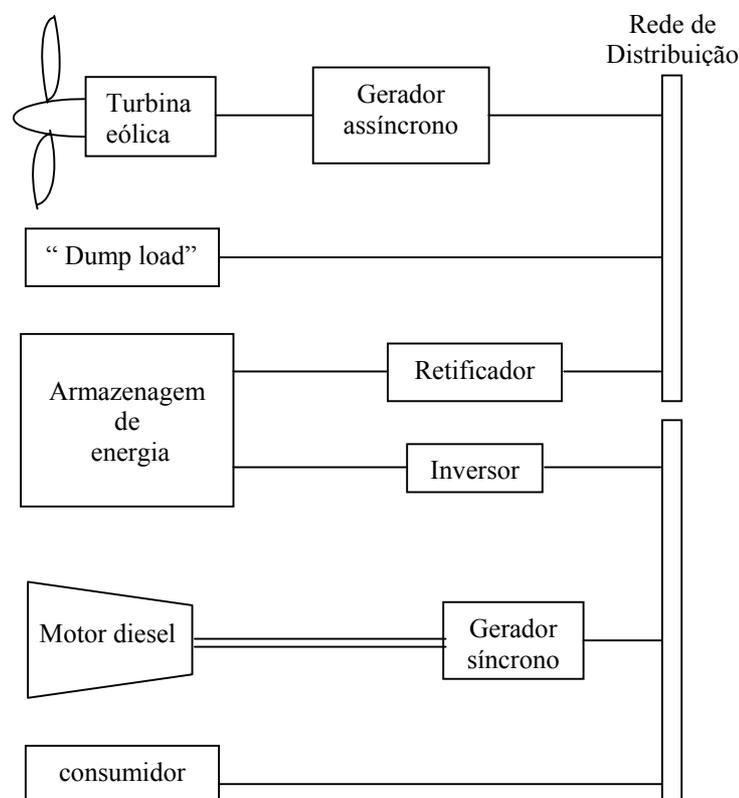


Figura 5.4 – Sistema híbrido eólico/diesel - Configuração 4.

## 6. SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL DE FERNANDO DE NORONHA

Em maio de 2000, o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE implantou uma turbina eólica de 225kW, na Ilha de Fernando de Noronha, que foi conectada ao Alimentador 01, da rede de distribuição. O planejamento do projeto realizado foi aumentar a penetração eólica na Ilha, atendendo cerca de 25% da solicitação de carga. A turbina de 225 kW estabeleceu a repotenciação do sistema híbrido eólico/diesel da Ilha, composto anteriormente por uma turbina eólica de 75 kW e pelos geradores diesel da Usina Termelétrica Tubarão. A inclusão da turbina de 225 kW ao sistema de geração de energia elétrica, já existente na Ilha, originou a configuração 1, a qual apresenta os seguintes componentes:

- três grupos geradores de 400 kW, fornecendo energia elétrica aos alimentadores 01, 02 e 03, com dois grupos geradores de 400 kW, funcionando como grupos geradores reservas para o caso de manutenção ou fornecendo energia para o alimentador 03, no período de alta estação da ilha (capacidade total da termelétrica 2MW);
- uma turbina eólica de 75 kW, instalada em 1992, conectada ao alimentador 02, para atender inicialmente, cerca de 10% da demanda da ilha - Feitosa [9] (atualmente, atende cerca de 4% da demanda) e uma turbina de 225 kW conectada ao alimentador 01.

Foi realizada a repotenciação da usina termelétrica, em 2001, para atender a crescente demanda dos consumidores e devido à influência da turbina de 225 kW sobre o sistema de distribuição, originando a configuração 2, a qual apresenta os seguintes componentes:

- dois grupos geradores diesel de 910 kW e três outros de 400 kW, fornecendo energia elétrica aos alimentadores 01, 02 e 03 (capacidade total de termelétrica 3MW);
- uma turbina eólica de 225 kW e uma de 75 kW conectadas aos alimentadores 01 e 02.

A figura 6.1 apresenta a arquitetura do sistema híbrido eólico/diesel implantado na Ilha, apresentando os elementos que compõem os sistemas de geração, nas configurações 1 e 2.

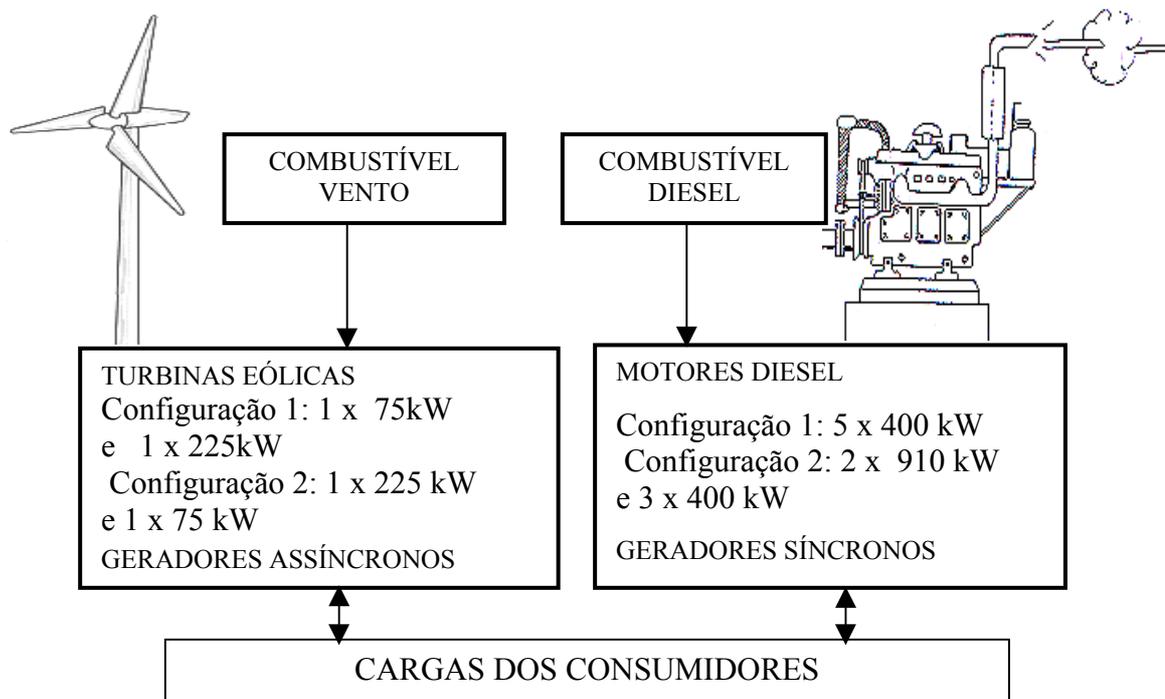


Figura 6.1. Arquitetura do Sistema Híbrido Eólico/Diesel, da Ilha.

### 6.1 Configuração 1: Turbinas Eólicas de 75kW e de 225kW/Geradores Diesel 400 kW

O sistema híbrido eólico/diesel é geralmente utilizado para o fornecimento de eletricidade em localidades situadas a grandes distâncias da rede elétrica convencional, como por exemplo, as ilhas.

Através da configuração 1 do sistema híbrido eólico/diesel da Ilha de Fernando de Noronha, apresentam-se os componentes utilizados para a produção de eletricidade, a seguir:

- gerador síncrono, que fornece potências ativa e reativa à rede elétrica, acoplado ao motor diesel (produz a força motriz utilizada ao acionamento de máquinas estacionárias) ;
- turbina eólica de 75 kW e 225 kW, que utilizam geradores de indução (ou assíncrono) para injetar a potência ativa na rede elétrica.

O esquema da configuração 1, apresentado na figura 6.2, indica os componentes de acordo com a situação encontrada para o sistema híbrido eólico/diesel instalado na ilha de Fernando de Noronha. Por isso, o dimensionamento dos transformadores na saída dos geradores diesel apresentam valores diferentes dos estabelecidos para desempenharem suas funções, devido aos geradores diesel trabalharem a, no máximo, 75 % de sua capacidade nominal. Os transformadores encontrados estavam sendo utilizados, devido às condições de logística para reposição de peças na Ilha. Aguardando pelos equipamentos adequados, a partir do continente, para efetuar suas modificações.

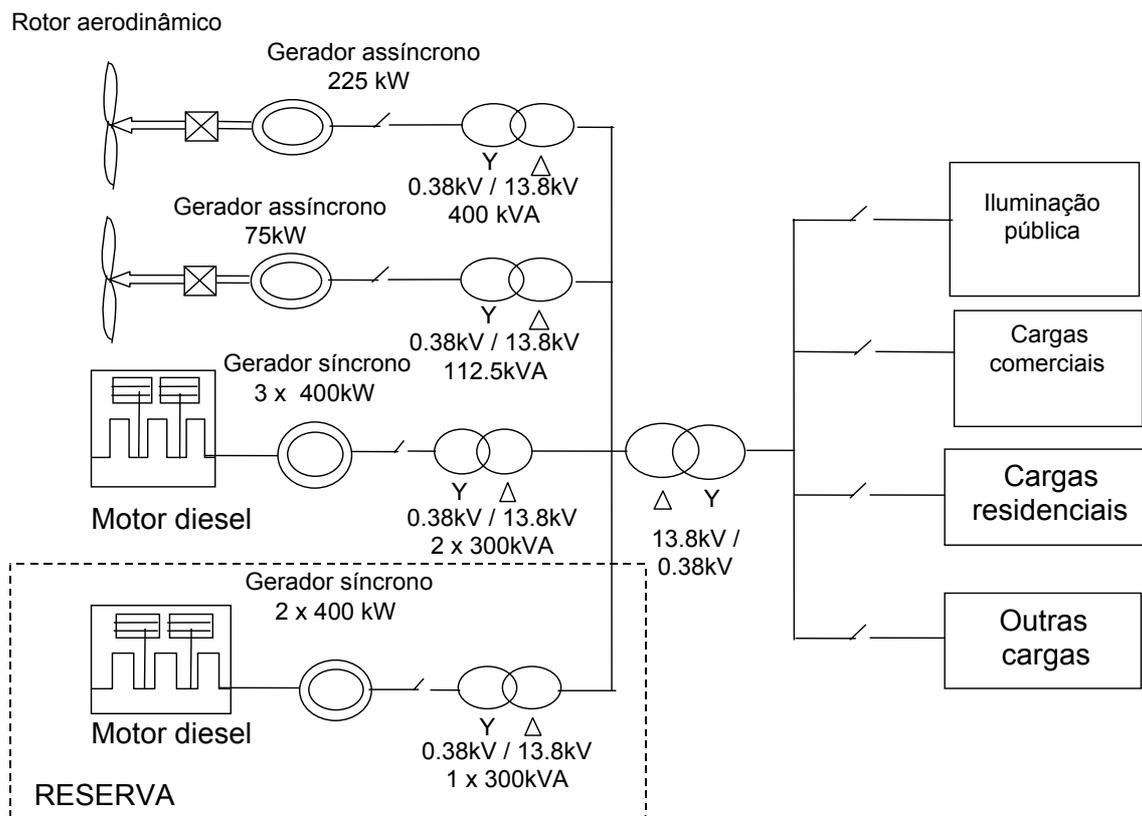


Figura 6.2 - Diagrama unifilar do sistema eólico/diesel e cargas da Ilha de Fernando de Noronha, maio de 2000 - Configuração 1.

## 6.2 Turbina Eólica de 75kW

A turbina eólica de 75 kW (figura 6.3) conectada à rede elétrica, na Ilha, deu início ao primeiro sistema híbrido eólico/diesel de grande porte, implantado na América Latina - Feitosa [9].

Essa turbina apresenta a velocidade de rotação fixa e o ângulo de passo da pá constante em relação ao plano de rotação do rotor, para toda velocidade de vento. A turbina de 75 kW utiliza a regulação por *stall* para atuar no controle da produção de potência elétrica em condições de altas velocidades de vento.



Figura 6.3 - Turbina eólica de 75kW de Fernando de Noronha: potência nominal 75 kW, diâmetro do rotor de 17m e uma torre de 23m de altura.

A geração de energia elétrica através da turbina de 75 kW proporcionou a diminuição dos custos elevados do combustível utilizado pelos geradores diesel na produção de eletricidade, adicionado aos custos do seu transporte até o local da geração, do armazenamento e de operação e manutenção. Verifica-se que os aspectos sócio-econômicos, a natureza ecológica e as características geográficas da Ilha contribuem positivamente para a geração de energia elétrica a partir da energia eólica.

### 6.2.1 Características Básicas da Turbina Eólica de 75 kW

A caracterização precisa do vento na Ilha foi importante para a definição das características de projeto da turbina, adequando a produção de energia às condições do local da sua instalação. Os dados de velocidade e direção de vento, tensão, potência elétrica e velocidade de rotação das pás foram coletados pelo sistema de aquisição de dados da turbina eólica. A qualidade dos componentes mais importantes, tais como: multiplicador de velocidade, sistemas hidráulicos, sistema de adaptação à direção do vento, torre e pás é imposta a todos os fabricantes de turbinas, os quais estão sujeitos ao controle de qualidade nos padrões internacionais. Embora haja a necessidade de uma avaliação coerente dos seus resultados de funcionamento, devido às influências do local de instalação sobre a turbina eólica, por que fabricantes aplicam aos seus produtos à critérios de normas diferentes.

As características de projeto e dos componentes da turbina eólica estão apresentadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Características da turbina eólica 75 kW.

<b>Potência nominal</b>	<b>75 kW</b>
Gerador	Assíncrono/trifásico
Tensão	380 V
Velocidade do Rotor Aerodinâmico	51 rpm
Controle de potência	stall
Diâmetro do rotor	17 m
Número de pás	3
Pás	LM - 8.5 m
Freio	Aerodinâmico e a disco
Altura do eixo do rotor	23 m
Multiplicador de velocidade (relação)	1:20
Torre	treliçada
Controle	sistema de controle microprocessado
Velocidade de partida	3,5 m/s
Velocidade nominal	13 m/s
Velocidade de saída	23 m/s

### 6.2.2 Pás da Turbina Eólica

As pás da turbina eólica de 75 kW foram projetadas para oferecerem uma alta performance e uma longa vida útil. Grandes investimentos no desenvolvimento de novas pás têm sido realizados em busca de novos perfis de pá. O perfil da pá é uma das características da pá que pode fornecer melhores condições para um bom desempenho na extração de uma maior quantidade de energia do vento. O controle de potência por *stall* é utilizado pela turbina de 75 kW e suas previsões são basicamente experimentais, baseadas nos dados monitorados pelo sistema de controle dessa turbina – Walker [26].

As características das dimensões e de construção da pá da turbina de 75 kW são as seguintes:

- comprimento da pá – 8,5 m;
- área da pá – 5,994 m<sup>2</sup>;
- peso da pá – 350 kg;
- feita de fibra de vidro;
- raiz de ferro fundido ;

### 6.2.3 Rotor

O rotor da turbina eólica de 75 kW é do tipo eixo horizontal. Através de uma transmissão mecânica acopla as características da velocidade angular do rotor, com as requeridas pelo gerador elétrico. A velocidade de rotação desse rotor assume o valor de 38 rpm. Um sistema de multiplicação acopla o eixo do rotor ao eixo do gerador assíncrono. O rotor é movido por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação, perpendiculares ao fluxo de vento relativo e forças de arrasto, paralelas ao fluxo de vento relativo. As turbinas com eixo horizontal, perpendicular ao fluxo do vento, devem ser montados sobre uma cremalheira que se movimenta em torno de um eixo vertical para que a área varrida pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Esse rotor está situado de forma que a área do círculo varrido pelas pás está a montante do vento (*up wind rotors*). A localização do rotor à montante da torre reduz o efeito de interferência da esteira, denominado efeito de sombra da torre nas pás – Heier [13].

### 6.2.4 Manutenção

Algumas dificuldades de manutenção são observadas a partir das instalações dos sistemas híbridos eólicos/diesel com os quais os técnicos podem se deparar, no reparo ou na substituição de peças em uma localidade isolada. Apesar disso, os componentes de uma turbina eólica apresentam uma longa vida útil, como por exemplo, a nacelle, o sistema hidráulico, a torre, além de uma ótima confiabilidade para o sistema de controle, mesmo que alguns desses componentes quase sempre estejam expostos às intempéries ou por serem requisitados para funcionamento em locais isolados. No caso do gerador diesel, são exigidos cuidados diários de operação, com o objetivo de manter o registro das horas de operação e consumo de água, combustível e óleo lubrificante, bem como das intervenções de manutenção e/ou reparos, embora o sistema de geração possua um sistema de controle automatizado.

### a) Turbina Eólica

A manutenção da turbina deve ser realizada normalmente em um determinado número de horas preestabelecido. Passando a ser submetida a uma regular inspeção geral anual. Deve-se reparar os danos na superfície das pás, caso haja arranhões, ferrugem sobre a flange da raiz da pá, deve-se limpar a superfície das pás removendo-se a sujeira, insetos. Outro item a ser reparado e checado refere-se as junções do sistema hidráulico e checar se todas as partes móveis estão operando livremente, e lubrificar os rolamentos. .

### b) Geradores Diesel

O grupo gerador não deve ser visto como um equipamento isolado mas, sim como o item principal do sistema de abastecimento de energia elétrica, que, como um todo, merece atenções específicas, dependendo de cada instalação. Em linhas gerais, o grupo gerador, além dos cuidados diários de operação, exige pouca manutenção. Porém como acontece com a turbina eólica, a manutenção encontra dificuldades devido estar sujeita à esperar por um serviço ou uma peça de reposição que não esteja disponível na localidade.

## 6.3 Gerador Diesel 400kW

Uma importante característica do gerador diesel está na relação entre o consumo de combustível e a potência gerada. Um gerador típico pode consumir de 25% à 30% de combustível - AWEA [27], sem que esteja produzindo eletricidade, ou seja, operando sem carga. Embora, geradores mais recentes operem em uma faixa entre 10% à 15% - Leon Heimer [17]. Com o aumento da potência de saída o gerador consome o combustível de acordo com a curva de consumo de combustível em função da potência. No sistema híbrido eólico/diesel, apresenta-se uma economia de combustível com a inclusão da turbina eólica responsável por parte da potência gerada para o sistema. Porém, torna-se claro que a economia de combustível será expressiva se o diesel estiver a maior parte do tempo parado.

De acordo com o fabricante – Leon Heimer [17] o grupo gerador diesel instalado na ilha de Fernando de Noronha possui os seguintes valores nominais indicados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Características dos parâmetros principais do gerador diesel TAD 1630G

potência aparente	$S = 500 \text{ kVA};$
potência ativa	$P = 400 \text{ kW};$
fator de potência	$\cos \varphi = 0,8$
tensão	$U = 380 \text{ V};$
corrente	$I = 760 \text{ A}.$

A performance do gerador diesel é definida pelas seguintes características:

- potência nominal;
- curva linear de consumo de combustível;
- nível mínimo de potência.

As unidades da curva linear, para o gerador diesel, são:

- consumo de óleo diesel – litros/h;
- potência produzida – kW.

Observa-se que o consumo em vazio (sem carga) é significativo e indesejável para a operação do motor diesel, proporcionando desgastes às peças do motor sem que este esteja produzindo, estando porém em funcionamento.

A curva linear (figura 6.7) relaciona o fluxo volumétrico de combustível como uma função do nível de potência produzida pelo gerador diesel. A relação linear é utilizada para calcular o uso do combustível do sistema híbrido e determinar a operação ótima de sistemas de múltiplos geradores – Hunter [14].

A curva característica do gerador apresenta o consumo máximo de combustível de 100 l/h atendendo à uma geração de potência de 400kW. O valor mínimo de potência está relacionado a um valor mínimo de carga recomendado à operação do motor diesel (a cerca de 40% da carga total).

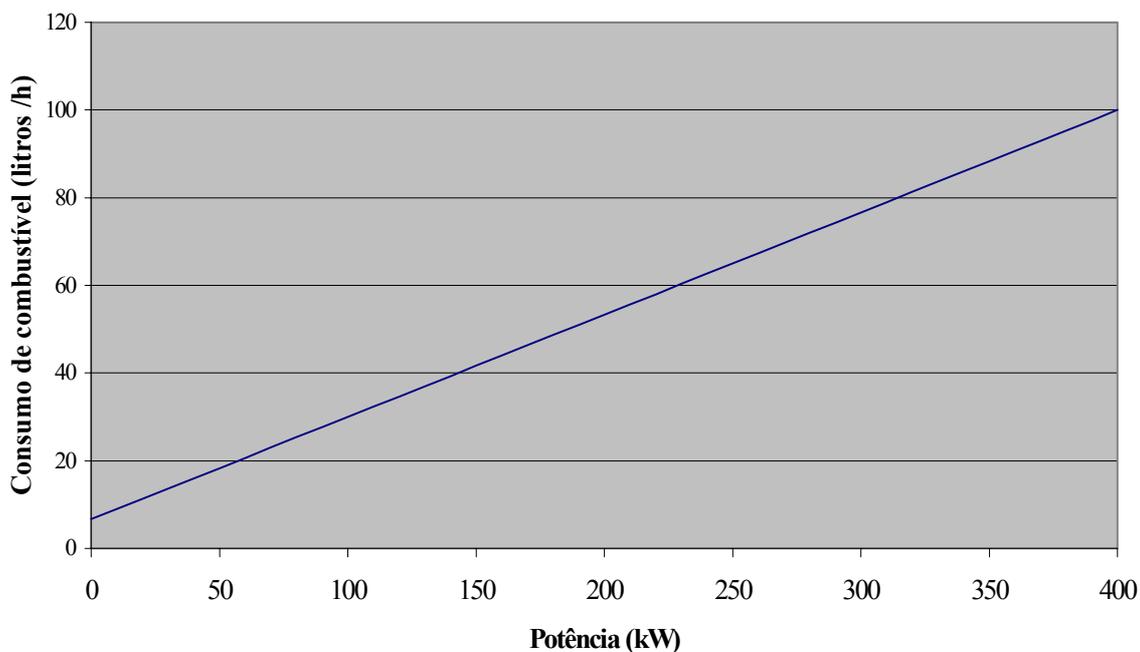


Figura 6.7 - Curva linear característica de um gerador diesel TAD 1630G.

#### 6.4 Configuração 2: Turbina Eólica de 225 kW / Gerador Diesel de 910 kW (turbina de 75 kW em manutenção)

A introdução da turbina eólica de 225 kW no sistema híbrido eólico/diesel (figura 6.8) da Ilha alterou a configuração do sistema de geração de energia elétrica, que passou a utilizar a produção de eletricidade de mais uma turbina, acoplada ao sistema de distribuição. Essa nova configuração, assim como a anterior, não utiliza dispositivos para o armazenamento de energia nem compromete o fornecimento da rede, já existente.

A Usina Termelétrica teve que alterar o quadro de grupos geradores diesel, aumentando a potência instalada da termelétrica de 2,5 MVA para 3,775 MVA, a partir de maio de 2001, com o objetivo de atender à crescente demanda da ilha. Esses geradores diesel asseguram o fornecimento de energia, mesmo sob a influência das variações de potência proporcionadas, por essa turbina, devido à característica aleatória do vento.

O sistema híbrido passou a utilizar, os seguintes componentes:

- grupos geradores diesel: 2 x 910 kW;
- grupos geradores diesel: 3 x 400 kW;
- turbina eólica: 1 x 75 kW;
- turbina eólica: 1 x 225 kW.

Rotor aerodinâmico

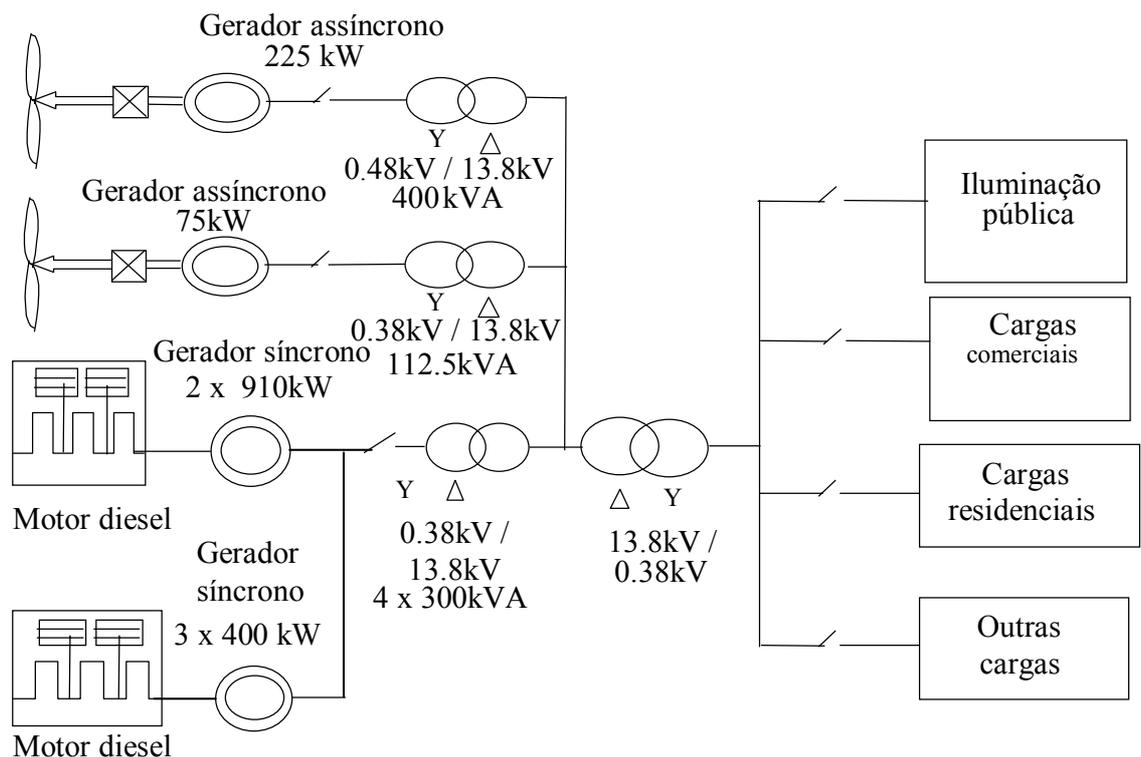


Figura 6.8 – Diagrama unifilar do sistema eólica/diesel e cargas da Ilha de Fernando de Noronha, maio de 2001 – Configuração 2.

### 6.5 Turbina Eólica V27 – 225 kW

A turbina eólica VESTAS V27-225 kW (figura 6.9) apresenta a velocidade de rotação fixa e a otimização da produção da potência elétrica, através da variação do torque aplicado ao rotor da turbina, proporcionada pelo sistema de controle de rotação do ângulo de passo da pá (sistema de *pitch*).



Figura 6.9. Turbina Eólica VESTAS V27–225 kW – instalada na Ilha de Fernando de Noronha.

### 6.5.1 Controle de Potência por Regulação do Ângulo de Passo das Pás

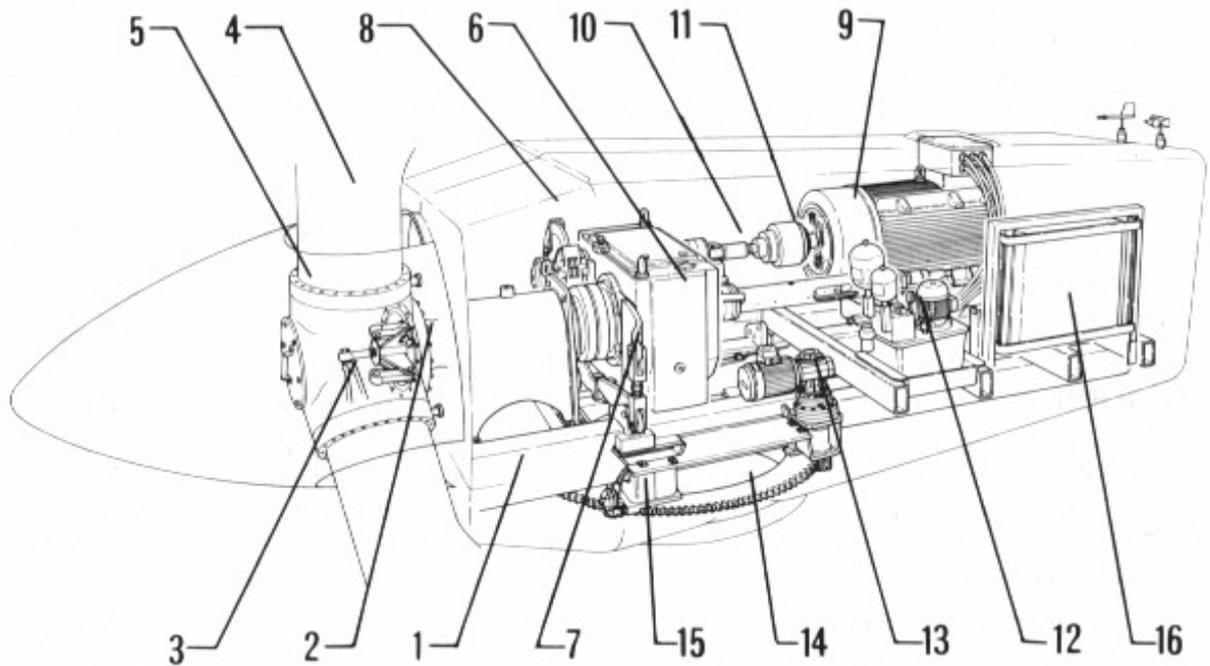
O controle de potência utilizado por essa turbina é baseado no sistema de controle por regulação do ângulo de passo das pás – Freris [11]. Nesse caso, a pá pode girar sobre o seu próprio eixo radial durante a operação enquanto a velocidade do vento varia. Assim, torna possível um ângulo de ataque quase ótimo ao longo de toda a pá, em toda velocidade de vento e uma velocidade de partida relativamente baixa. Em altas velocidades, o ângulo de ataque é reduzido através da variação do ângulo de rotação das pás. Dessa forma, a potência produzida pelo rotor é limitada para a potência nominal do gerador. Este sistema de controle demonstra que a turbina opera sob condições dos efeitos reduzidos das forças aerodinâmicas e é mais eficiente, em comparação ao controle de potência por *stall*, porém torna-se mais caro porque necessita de um sistema de controle mais complicado.

A regulação do ângulo de passo da pá é realizada por um eixo colocado dentro da pá e sua posição é determinada pela pressão hidráulica atrás dele. A rotação das pás ao longo do seu eixo longitudinal podem efetuar um freio aerodinâmico. Quando a pá é rotacionada por inteiro é possível controlar o ângulo de ataque e portanto a produção de energia.

A potência gerada pela turbina é medida usando um transdutor de potência elétrica. A medição do sinal é comparada com um *set point* (potência nominal da turbina) e o sinal de erro é passado para o controlador. Um algoritmo é utilizado para obter a resposta dinâmica requerida para o atuador rotacionar as pás.

### 6.5.2 A Estrutura da Turbina Eólica V27 - 225 kW.

A turbina eólica de 225 kW (figura 6.11) é construída sobre uma estrutura de ferro (chassis) projetada para a melhor distribuição dos esforços. O eixo principal é suportado por mancais, adaptados como um molde de revestimento, sendo utilizados para absorverem as forças axiais e radiais provocadas pelo rotor. O cubo (*hub*) da pá é aparafusado ao eixo principal. As pás são aparafusadas no suporte de conexão dos rolamentos das pás, o que significa que elas podem girar em torno do seu próprio eixo. Um braço de momento é montado na raiz de cada pá e, via o controle do ângulo de passo (*pitch*), esse é capaz de ajustar as pás ao ângulo correto. Uma caixa de engrenagens de dois estágios com eixos paralelos é instalada na parte traseira do eixo principal. A engrenagem de suporte, que transporta as reações do momento para a parte da frente da estrutura de ferro foi projetada para assegurar a mesma carga de impacto sobre os dois lados. O disco de freio é adaptado para o eixo de velocidade da caixa de engrenagens e se distingue dos dois discos de freio hidráulicos calibradores. O gerador é direcionado pelo eixo de alta velocidade através do Cardan com embreagem, apresenta duas velocidades, uma de 1200 rpm e outra de 900 rpm. Uma vantagem em se utilizar geradores com duplo enrolamento está na otimização da captação energética. Uma unidade hidráulica alimenta o freio e o mecanismo de regulação do ângulo de passo das pás e está montada sobre a parte traseira da estrutura de ferro, juntamente com o gerador. O giro da turbina é realizado eletricamente, utilizando as engrenagens de giro instaladas sobre a parte frontal da estrutura de ferro. A malha de engrenagens está conectada com o sistema de giro, aparafusado no topo da torre. Esse processo é controlado por um sensor eletrônico e é assegurado contra a torção dos cabos via sistema de controle de giro.



1. Base de ferro; 2. Eixo principal; 3. Cubo; 4. Pás; 5. Molde de aço da raiz; 6. Caixa de engrenagem; 7. Haste limitadora da engrenagem; 8. disco de freio; 9. Gerador com duas velocidades; 10. Cardan; 11. Embreagem; 12. Unidade hidráulica; 13. Engrenagem do sistema de giro; 14. Cremalheira; 15. Controle do sistema de giro; 16. unidade do sistema de controle do microprocessador do topo.

Figura 6.11. Descrição da estrutura da Turbina Eólica de 225 kW

### 6.5.3 Descrição dos Componentes da Turbina Eólica V27 - 225 kW

A turbina eólica V27 - 225kW, é uma turbina de eixo horizontal, regulada pelo sistema de controle de rotação do ângulo de passo das pás, ou seja, um sistema que assegura o giro da pá em torno de seu próprio eixo longitudinal. Isso significa que, em baixas velocidades de vento, a regulação do ângulo de passo da pá proporciona uma superfície maior contra o vento e quando a velocidade do vento aumenta, esta superfície decresce gradualmente. Os resultados obtidos são um ótimo aproveitamento para a produção de energia elétrica, menores cargas exercidas sobre as pás e o oferecimento de um tempo de vida útil maior para a turbina eólica.

As características que foram observados com a utilização desse sistema de controle por rotação do ângulo de passo das pás são apresentados, a seguir:

- regulação da máxima produção de 225kW;
- suave acoplamento do gerador;
- partida sem motor;
- menor efeito de cargas sobre toda a construção;
- freio do rotor;
- produção otimizada sob todas as condições de vento.

A turbina eólica de eixo horizontal apresenta um rotor, com um diâmetro de 27 metros, uma torre tubular, coberta com uma tinta especial que protege contra os ataques da salinidade, da umidade e de outras intempéries. A sua simplicidade de construção

possibilita o fácil acesso para os serviços, contribuindo para um baixo custo operacional. Os componentes que formam a turbina eólica são descritos na tabela 6.2.

Tabela 6.2. Componentes da Turbina Eólica V27 – 225 kW.

<p style="text-align: center;">Torre</p> <p>A turbina está apoiada sobre uma torre de formato cônico.</p> <p>O suporte de giro da nacelle, sobre o qual a estrutura de ferro está encaixada com blocos deslizantes, está montado sobre a torre. A forma de acesso para a nacelle é através da passagem no topo da torre.</p> <p>Na base da torre, há uma porta que dá acesso à parte interior da torre, onde se encontra o sistema de controle central e uma escada que dá acesso à nacelle.</p>	
<p style="text-align: center;">Nacelle</p> <p>A nacelle é construída de fibra de vidro, tem a função de proteger os componentes da máquina contra as intempéries e de reduzir o ruído. Ao mesmo tempo, permite uma refrigeração suficiente para as engrenagens e para os geradores. A parte superior da nacelle pode ser aberta e, assim, permitir que o técnico trabalhe de pé e que os componentes tenham passagem para dentro e para fora. Há uma passagem na parte da frente da nacelle, a qual fornece o acesso para o hub das pás e para as engrenagens da pás.</p>	
<p style="text-align: center;">Pás</p> <p>As pás são feitas de fibra de vidro reforçada com <i>polyester</i>. As armações são feitas em uma construção do tipo <i>sandwich</i> e montadas sobre um suporte reforçado, adaptado na raiz com 30 linhas de fibra especial. As pás são projetadas e manufaturadas para atenderem aos requerimentos de uma eficiente utilização do vento. Com uma mínima carga sobre a turbina, para uma operação longa e livre de problemas.</p>	

### Unidade de controle

Uma unidade de controle baseada em um microprocessador monitora e controla todas funções críticas da turbina, incluindo a regulação por *pitch*, com o objetivo de que a melhor operação da turbina seja realizada para qualquer velocidade de vento. O controlador mostra os dados sobre a operação corrente e a forma de operação da turbina. Com esses dados, os geradores são acoplados via tiristores, onde a operação de ligação com a rede dá lugar via contactores. O controlador permite o monitoramento e controle remotos, no caso de algumas destas características serem requeridas.



#### 6.5.4 Características Básicas da Turbina Eólica de 225 kW

Os dados principais da turbina eólica V27- 225 kW são fornecidos através dos manuais do fabricante e das listas descritivas que abordam as características dos seus principais componentes, os quais estão expostos na tabela 6.2.

Tabela 6.2. Características dos principais dos componentes da turbina eólica de 225kW.

<b>Gerador</b>	6 pólos	8 pólos
Tipo	Assíncronos	
Potência nominal	225kV	50kV
Corrente	335A	85A
Tensão	480V	480V
Frequência	60Hz	60Hz
Fator de potência	0,82	0,75
Tipo de ligação	Delta	Delta
Velocidade de rotação:	1209 rpm	906 rpm
<b>Rotor</b>		
Diâmetro	27 m	
Área de varredura	573 m <sup>2</sup>	
Razão de multiplicação da caixa de engrenagens	1:27.6	
Regulação de potência	<i>Pitch</i>	
Número de pás	3	
Material das pás	Fibra de vidro reforçada por <i>polyester</i>	
Perfil da pá	NACA 63-200	
Altura do cubo	31,5 m	
<b>Dados operacionais</b>		
Velocidade de partida	3,5 m/s	
Velocidade de saída	25,0 m/s	

Velocidade nominal	13,5 m/s
<b>Torre</b>	
Tipo	Cônico-tubular
Acessórios	Seção de fundação com parafusos
Superfície	Pintura com tinta branca/metalizada
Altura	31 m
<b>Unidade de controle</b>	Multiprocessador VESTAS

### 6.5.5 Gerador Assíncrono da turbina eólica de 225 kW

O circuito equivalente do motor de indução simplificado pelo teorema de Thévenin para obtenção das relações de torque e de potência – Fitzgerald [10] e da expressão do torque eletromagnético interno (não disponível na saída do eixo) fornecido pela Eq. 6.1

$$T = q \cdot I^2 \cdot \frac{r}{s} \quad (6.1)$$

T – torque eletromagnético interno;  
q – número de fases do estator;  
I – corrente de estator ;  
r – resistência do rotor ;  
s – escorregamento

Obtém-se a curva característica de torque–escorregamento representada pela Eq.6.2

$$T = \frac{1}{w_s} \cdot \frac{qV^2(r_2/s)}{(R_1 + r_2/s)^2 + (X_1 + x_2)^2} \quad (6.2)$$

V – tensão da fonte equivalente pela aplicação do teorema de thévenin ao circuito equivalente da máquina de indução;  
R<sub>1</sub> – resistência do estator;  
r<sub>2</sub> – resistência do rotor;  
X<sub>1</sub> – reatância do estator;  
x<sub>2</sub> – reatância do rotor.

Pode-se verificar o funcionamento da máquina como motor para valores de escorregamento,  $s > 0$ . Assim como, o funcionamento como gerador para valores de escorregamento,  $s < 0$ . Verifica-se a curva característica de torque mecânico em função do escorregamento, apresentada na figura 6.12, utilizando-se os parâmetros a seguir

- tensão da fonte:  $V = 266.99$  Volts
- resistência do estator:  $R_1 = 0.018 \Omega$ ;
- resistência do rotor:  $r_2 = 0.019 \Omega$ ;
- reatância do estator:  $X_1 = 0.22 \Omega$ ;
- reatância do rotor:  $x_2 = 0.414 \Omega$ ;
- reatância de magnetização:  $x_\phi = 5,8 \Omega$ .

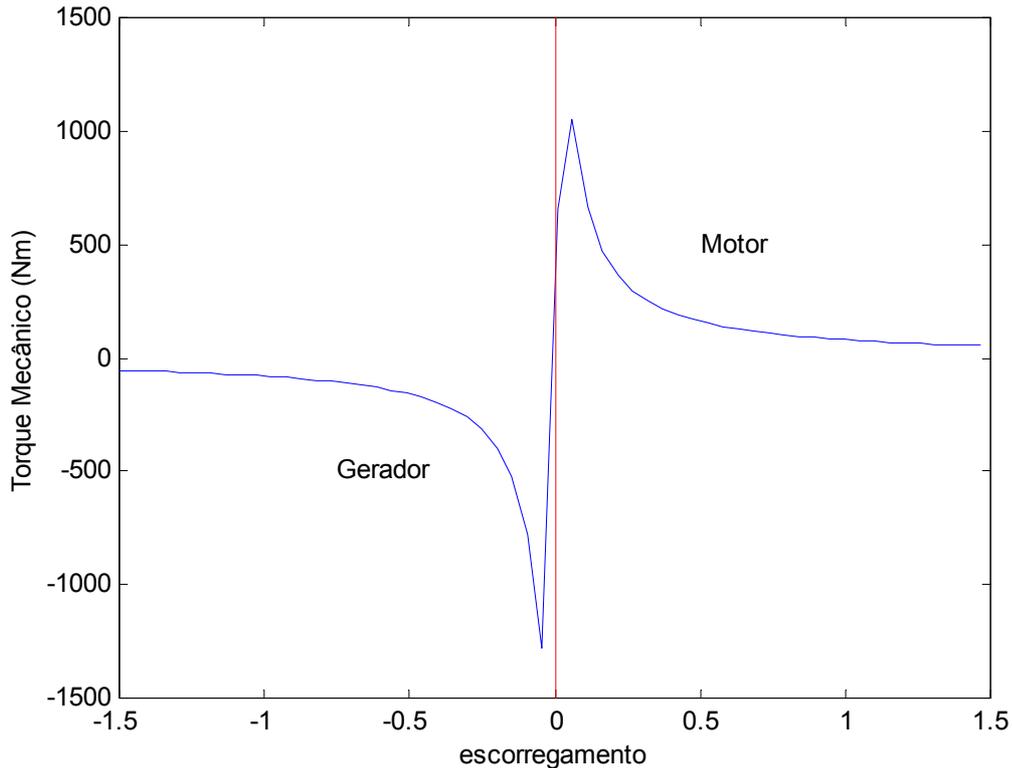


Figura 6.12 - Curva característica do torque em função do escorregamento do gerador assíncrono da turbina eólica de 225 kW.

### 6.6 Gerador Diesel 910 kW

A modificação do sistema híbrido eólico/diesel para a configuração 2 é, devido tanto à inclusão da turbina eólica de 225 kW quanto ao aumento na potência instalada na termelétrica da Ilha, utilizando-se de novos geradores diesel (2 x 910 kW e 3 x 400kW) que fazem parte, atualmente, do sistema de geração termelétrica da Ilha.

As informações obtidas, a partir do fabricante, sobre os valores nominais do gerador diesel de 910 kW são as seguintes:

- potência aparente  $S = 1137 \text{ kVA};$
- potência ativa  $P = 910 \text{ kW};$
- fator de potência  $\cos \phi = 0,8;$
- tensão  $U = 380 \text{ V};$
- corrente  $I = 1727 \text{ A};$
- tensão de excitação  $U_e = 40 \text{ V};$
- corrente de excitação  $I_e = 7,4 \text{ A}.$

A potência ativa,  $P$ , é definida em kW e o fator de potência,  $\cos \phi$ , representa a relação entre a potência ativa e a potência aparente,  $S$ , é dada em kVA. A Eq. 6.3. apresenta a relação entre essas potências.

$$P = \cos \phi \cdot S \quad (6.3)$$

$P$  – potência ativa (kW);

$S$ - potência aparente;

$\cos \varnothing$  – fator de potência.

A potência aparente, S (kVA), pode ser apresentada como a soma vetorial das potências ativa, P, e da potência reativa, Q (KVAr). Na figura 6.13, triângulo de potências – PEREIRA [23], pode-se visualizar a relação existente entre as três potências:

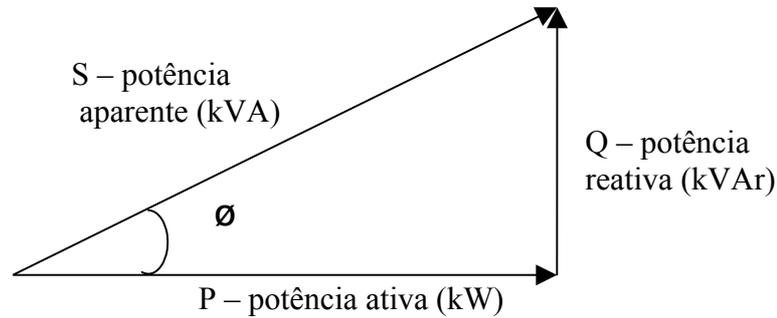


Figura 6.13 - Triângulo de potências.

Do triângulo de potência é obtida a Eq.6.4, a qual fornece o valor da potência reativa nominal, Q, desse gerador diesel:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 680 \text{ kVAr} \quad (6.4)$$

Q – potência reativa (kVAr)

Quando as potências nominais ativa e reativa são atingidas como os valores de 910 kW e 680 kVAr, respectivamente, obtém-se um fator de potência de 0,8. Esse gerador é projetado para fornecer a potência nominal com a possibilidade de exceder em até 10% desse valor. O gerador pode operar com um fator de potência em uma faixa de operação normal de uma relação entre a potência ativa e a potência reativa, desde que não exceda os limites nominais de fabricação. Sob essas condições, o fator de potência não se torna o fator limitante de funcionamento da máquina.

A curva característica do grupo diesel de 910 kW está indicada na figura 6.14.

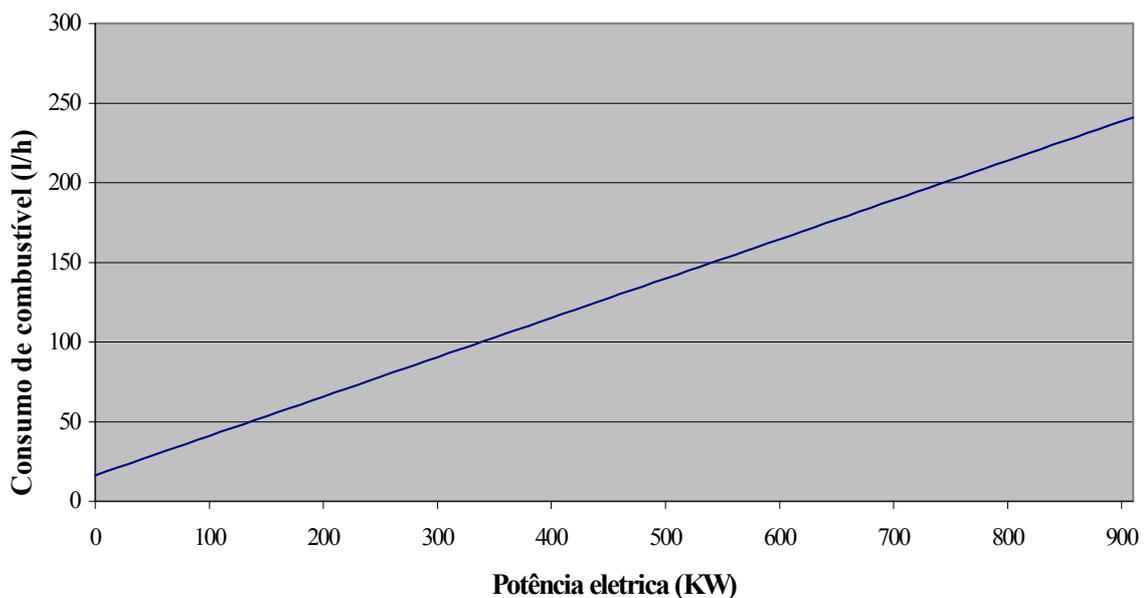


Figura 6.14 - Curva característica do grupo diesel CAT 3508, utilizado pela termelétrica de Fernando de Noronha.

## 6.7 Estratégia de Operação – CELPE

As atividades da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE na Ilha de Fernando de Noronha são realizadas pelo seu quadro técnico, dividido nos setores administrativo e eletrotécnico. A concessionária emprega a estratégia de operação do sistema de distribuição de energia na Ilha, através do centro de operação de distribuição – Cipoli [4], destinado a supervisionar e coordenar as atividades operativas desse sistema, visando proporcionar:

- atendimento aos consumidores;
- controle e análise das interrupções;
- manutenção da configuração elétrica;
- melhores condições operativas, diminuindo os riscos;
- controle e dinamismo das manutenções.

O comando operativo da rede é centralizado em apenas um local. O *lay out* do centro de operação está apresentado na figura 6.15.

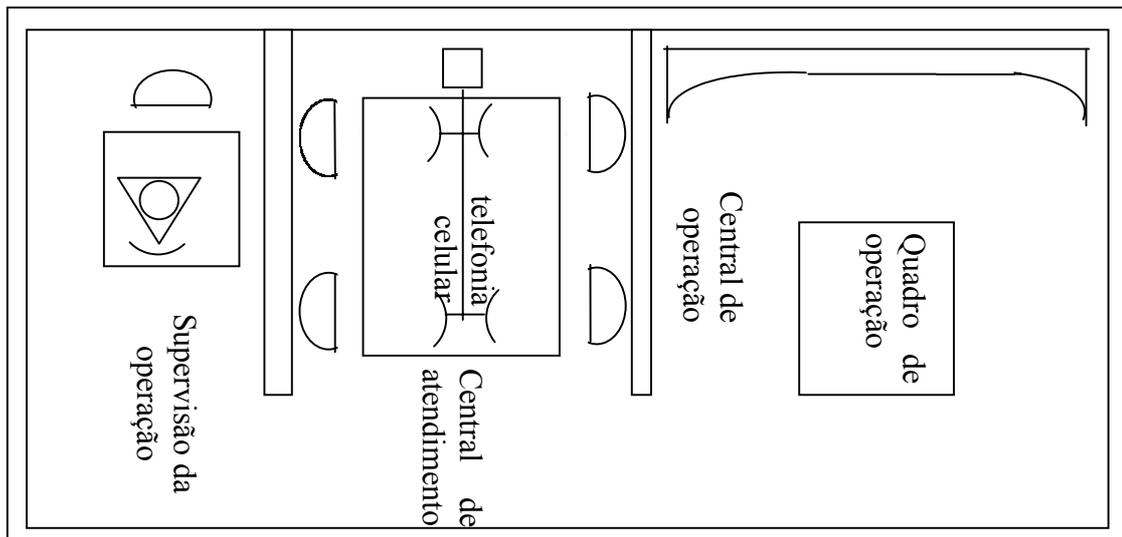


Figura 6.15 - *Lay out* do centro de operação de distribuição (planta baixa).

A demanda da Ilha representa o fator que define a estratégia de operação dos grupos geradores. O sistema de geração de energia utiliza programas de operação, responsáveis pelo gerenciamento dos grupos geradores. Supondo os casos em que operem, pelo menos, dois geradores, estes dependem da demanda dos consumidores da ilha. Em cada programa de operação, é mantido um dos geradores conectado à barra de paralelismo, como gerador principal. Os demais geradores são conectados ou desconectados da barra de paralelismo, automaticamente, de acordo com a demanda da Ilha. Com o gerador principal conectado à barra de paralelismo, os demais grupos geradores são sincronizados e conectados, de acordo com a seqüência definida em cada programa, através de uma codificação que identifica o gerador. Os grupos geradores diesel, trabalham sem a supervisão constante dos operadores, fornecendo energia elétrica aos consumidores e, automaticamente, corrigindo a tensão e a freqüência fornecidas.

O sistema de geração de energia, que compôs a configuração 1 da Usina Termelétrica Tubarão, fornecendo energia em corrente alternada em regime contínuo à Ilha, por exemplo, apresentou os dados técnicos indicados a seguir:

- geradores diesel: 5 x 400 kW (potência total do sistema: 2MW);
- sistema de resfriamento dos motores diesel: 1 (composto de uma torre de resfriamento, uma moto bomba e um trocador de calor para cada grupo gerador);
- sistema de canalização dos gases de escapamento: 1;
- sistema de alimentação de combustível: 1 (composto de tanques de combustível e tubulações de alimentação e retorno);
- painel de comando e sincronismo: 1;
- Alimentação CA: - tensão: 380 / 220V
- frequência: 60 Hz
- fases: 3 fases + neutro
- alimentação CC: 24V fornecida pela fonte de alimentação CC (FCC);
- bateria de partida dos grupos: 24Vcc (2 x 12Vcc).
- conjuntos de acessórios para os grupos geradores.

No painel de comando e sincronismo do sistema de geração de energia, estão localizados os quadros de comando destinados à operação de cada grupo gerador e um quadro de comando do sistema que é utilizado na operação de sincronismo. Dentre as suas funções, estão o comando de partida/parada, a sincronização dos grupos geradores e a alimentação da subestação elevadora da Usina Tubarão, para alimentação da rede de distribuição de energia elétrica da Ilha. Os quadros de comando e sincronismo são divididos em módulos que realizam as funções de execução do comando, proteção, controle e sincronização para cada grupo gerador. Os itens que constam em um quadro de comando são:

- componentes de comando;
- proteção;
- sinalização dos estados e eventos de operação;
- medição do grupo gerador.

#### 6.7.1 Rede de Distribuição

O objetivo do sistema de energia elétrica é fornecer energia às várias cargas existentes na Ilha. A qualidade do sistema de distribuição se mede por dois fatores [23]:

- tensão e frequência constantes: tensão e frequência cujos valores são mantidos dentro dos limites estabelecidos;
- continuidade e confiabilidade de serviço: quando o número dos desligamentos dos circuitos são reduzidos ao mínimo, tornando o tempo de desligamento o menor possível.

Alguns fatores importantes relacionados à qualidade do sistema devem ser observados, tais como:

- o aumento no custo do sistema de distribuição a ser empregado, associado ao aumento na continuidade de serviço;
- o crescimento do consumo na área beneficiada devido ao aumento na continuidade de serviço, tendo o número de interrupções e sua duração reduzidos.

O sistema de distribuição da Usina Termelétrica Tubarão na Ilha conta com um corpo técnico composto por 5 eletrotécnicos e 1 engenheiro. Seu objetivo é oferecer aos consumidores, os seguintes serviços:

- garantir o fornecimento de energia aos consumidores;
- oferecer atendimento rápido a novos consumidores e aumento de carga;
- oferecer os serviços de operação e manutenção;
- orientar os consumidores e poderes públicos quanto à correta utilização de energia elétrica.

Todo o sistema de distribuição empregado pela CELPE , inclusive na ilha de Fernando de Noronha, é do tipo radial. Essa configuração tem sido aplicado em localidades com áreas de alta ou baixa densidade de cargas.

O sistema radial compreende os alimentadores primários que se irradiam das subestações, sendo cada um deles confinado a uma determinada área. Dos alimentadores se irradiam os ramos e os laterais onde são ligados os transformadores de distribuição. Intercalando-se entre o transformador e o primário, uma chave fusível, que atua no momento em que surgir, por exemplo, uma sobrecorrente no secundário ou no próprio transformador para que não cause o desligamento na subestação ou no circuito primário. Neste sistema, a rede secundária suprida por um dado transformador , se irradia do mesmo, não sendo ligada às redes secundárias dos transformadores adjacentes. A figura 6.16 ilustra o esquema de um sistema radial típico.

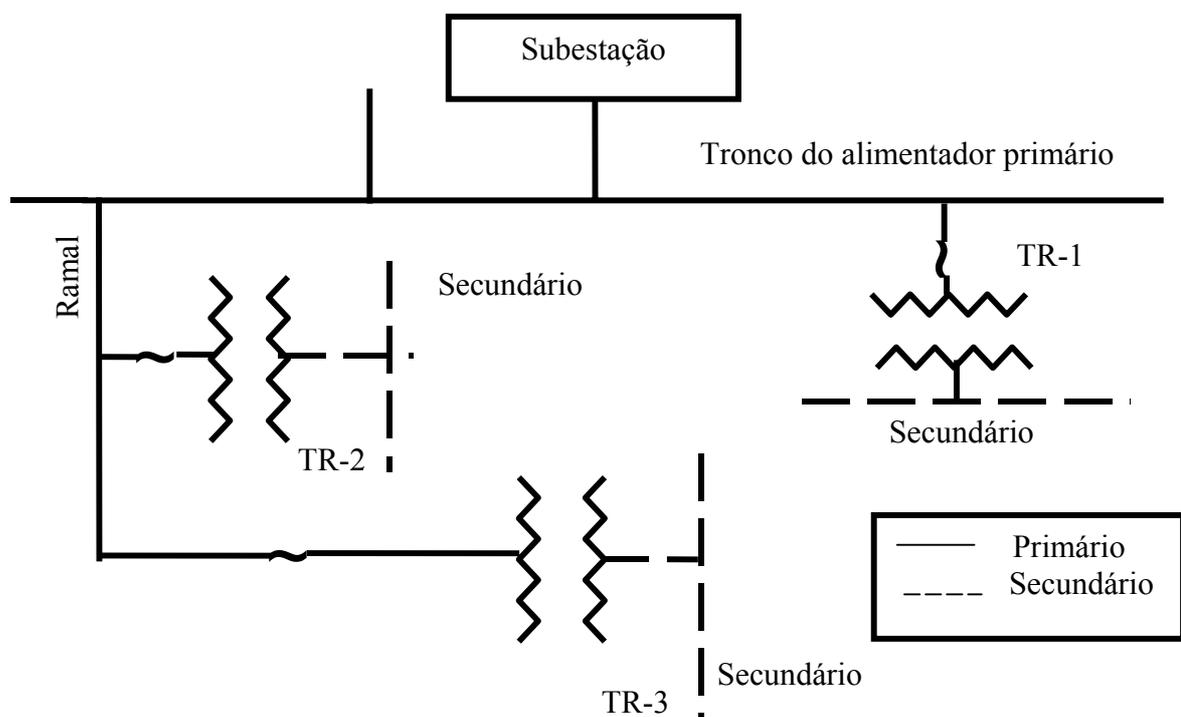


Figura 6.16 - Ilustração do esquema de um sistema radial típico.

O número de falhas que ocorrem nas linhas primárias aéreas é somado e analisado o tempo médio das interrupções causadas ao sistema por defeitos, tais como:

- sobrecarga;
- galhos de árvore sobre a linha;
- poste abalroado por veículos;
- isolador danificado.
- outros causas.

Havendo a ocorrência de um defeito no circuito primário, são empregados recursos normalmente abertos (chaves normalmente abertas - NA), além de dispositivos para seccionar os alimentadores (chave seccionadora monopolar) para diminuir o tempo de desligamento das cargas provocado pelo defeito. Uma estratégia para minimizar o desligamento é ligar cada trecho não defeituoso a alimentadores adjacentes. Essa operação é demorada e pode paralisar o fornecimento de energia aos consumidores em até uma hora. Os técnicos responsáveis pela manutenção dividem o alimentador em vários trechos, como está apresentado na tabela 6.3.

Tabela 6.3. Trechos dos Alimentadores 1, 2 e 3 do sistema de distribuição.

Alimentador	Alim – 1	Alim – 2	Alim – 3	Unidade – Eólica
Distância (m)	AB – 100m	AB – 300m	AB – 10m	AB – 120m
	BC – 450m	BC – 80m	BC – 40m	BB – 160m
	CD – 80m	CD – 420m	CD – 40m	
	DE – 280m	DE – 480m	CE – 160m	
	DF – 200m	EF – 360m	EF – 680m	
	FG – 0	EG – 360m	FG – 680 m	
	FH – 880m	GH – 120m	GH – 160m	
	HI – 120m	HI – 200m	HI – 180m	
	IJ – 80m	IJ – 360m	HJ – 400m	
	IL – 160m	IL – 440m	JL – 30m	
	HM – 360m	LM – 200m	JM – 140m	
	MN - 40m		MN – 30m	
	NO – 40m		MO – 460m	
	NP – 0		OP – 80m	
	NQ - 80m		PS – 15m	
	QR – 320m		PQ – 40m	
	RS – 240m		QR – 320m	
	ST – 200m		HI' – 20m	
	TV – 30m			
	TU – 40m			
UX – 500m				
RZ – 240m				
ZA' – 80m				
AB' – 900m				
Total	5.420m	3.240m	3.480m	280m

Para dimensionar a alimentação tronco de cada um dos alimentadores de distribuição de 13,8 kV, é necessário:

- 1) conhecer/pesquisar a carga (demanda de cada um dos transformadores de distribuição ligados a esse alimentador);
- 2) conhecida a carga e a tensão de alimentação, no caso 13,8 kV, encontra-se a corrente máxima desse alimentador;
- 3) a partir da corrente máxima calculada e se conhecendo a temperatura máxima ambiente, dimensiona-se o condutor;
- 4) para saber se o condutor escolhido atende aos critérios de queda de tensão estabelecidos em portaria DNAEE/ANEEL, pode-se calcular a queda de tensão máxima:
  - via programa de fluxo de potência;
  - via planilha de cálculo de queda de tensão, consultando-se a tabela de queda de tensão (MVA) por quilometro;
- 5) critérios de tensão de suprimento estabelecidos :
  - tensão máxima no circuito primário = 1,05 Pu de tensão;
  - tensão mínima no circuito primário = 0,925 Pu de tensão.

No caso específico da Ilha de Fernando de Noronha, os alimentadores, por serem curtos, não apresentam problemas de queda de tensão que impliquem em desacordo com os critérios da legislação vigente.

#### 6.7.2 Característica de Carga

A característica das cargas supridas pelo sistema de distribuição é o fator mais importante para o planejamento do sistema, porém, é também o único fator sobre o qual o engenheiro de planejamento não tem nenhum controle. O conhecimento da capacidade estimada de tais cargas é portanto, indispensável aos encarregados do planejamento e da operação dos sistemas de distribuição, de modo a possibilitar a preparação e a operação desses sistemas nas melhores condições. A carga está relacionada com a potência elétrica absorvida de uma fonte de suprimento por um aparelho ou um grupo deles.

#### 6.7.3 Curva de Carga

O turismo é a atividade econômica principal praticada na ilha de Fernando de Noronha. O fluxo de entrada e saída de turistas na ilha é coordenado pela Secretaria de administração localizada na ilha. As construções de grande porte, que poderiam acarretar valores elevados de demanda, não são permitidas devido ao fato da área do parque ecológico ser protegida por Lei ambiental federal. As cargas variam com os usos e hábitos dos consumidores, mudando de valor em cada instante. A semelhança da curva de carga entre os dias úteis e os dias de final de semana representa uma tendência à pouca variabilidade nos hábitos dos consumidores de energia da ilha.

A informação da Curva de Carga da Ilha de Fernando de Noronha fornecida pela Usina Termelétrica Tubarão, no mês de novembro de 2000 (figura 6.17), por exemplo, apresentou os dados coletados pelos seus instrumentos de medição, a partir do alimentador 01. O conhecimento sobre o comportamento do sistema de distribuição é indispensável aos encarregados de planejamento e aos operadores, oferecendo recursos para a preparação, operação e otimização desses sistemas.

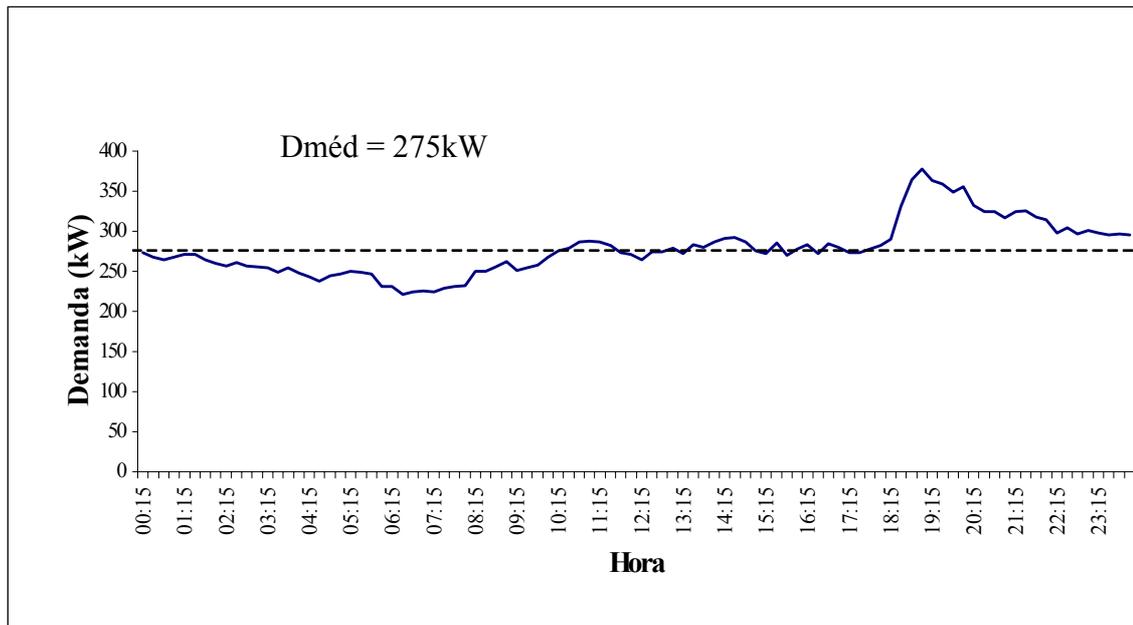


Figura 6.17. Perfil diário típico do mês de novembro/2000 :  
cargas do alimentador 01 da Usina Termelétrica Tubarão – CELPE.

#### 6.7.4 Cargas Principais e Cargas Especiais

A rede de distribuição da Ilha é formada por três alimentadores. As cargas principais estão distribuídas conforme a tabela 6.5.

Tabela 6.5. Potências instaladas das principais cargas supridas pela rede de distribuição

Alimentador 1	Pot.(kVA)	Alimentador 2	Pot.(kVA)	Alimentador 3	Pot.(kVA)
Vila Urbana	45	Lixão	15	Escola	75
RADIOBRÁS /TV GOLFINHO	15	Cacimba do Padre	45	Vila dos Remédios	75
Vila do Trinta	75	COMPESA		Banco Real	45
Morro do Francês		Vila do Xaréu	45	Hotel Esmeralda	45
Floresta Nova	45	Vila DPV	45	Hospital	45
Porto	75	Aprisco		ITALCABLE	15
Poti	75	Quixaba	45	Floresta Velha	45
Radar Aeronáutica	75	Hotel de trânsito	30		
Noronhão	75	Dessalinizador			
Casarão	45	Vila	45		
Vila Três Paus	45				
EMBRATEL	45	Aeroporto	45		
Pot. alim.1 =	675	Pot.alim.2 =	375	Pot.alim.3 =	345

As cargas especiais referem-se ao dessalinizador instalado na ilha e a iluminação da pista de pouso e decolagem utilizada pelo aeroporto. O dessalinizador tem a capacidade de produzir até 400.000 litros de água pura por dia, utilizando um motor de 150 CV. Embora, as turbinas eólicas que operam na Ilha não estejam fornecendo energia diretamente para o dessalinizador, colaboram para com a economia da geração a diesel, enquanto que a Ilha passa a ser beneficiada por este equipamento.

## 7. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL DE FERNANDO DE NORONHA – CONFIGURAÇÃO 1

### 7.1 Análise Experimental – Configuração 1

No período de testes, de maio à julho de 2000, os dados relativos à Configuração 1 do sistema híbrido eólico/diesel da Ilha de Fernando de Noronha foram coletados pelo CBEE. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados que faz parte do sistema de controle da turbina eólica de 225 kW. A análise experimental apresentou os resultados da geração e do consumo da energia, referentes à essa turbina, a economia de óleo diesel proporcionada, entre outros.

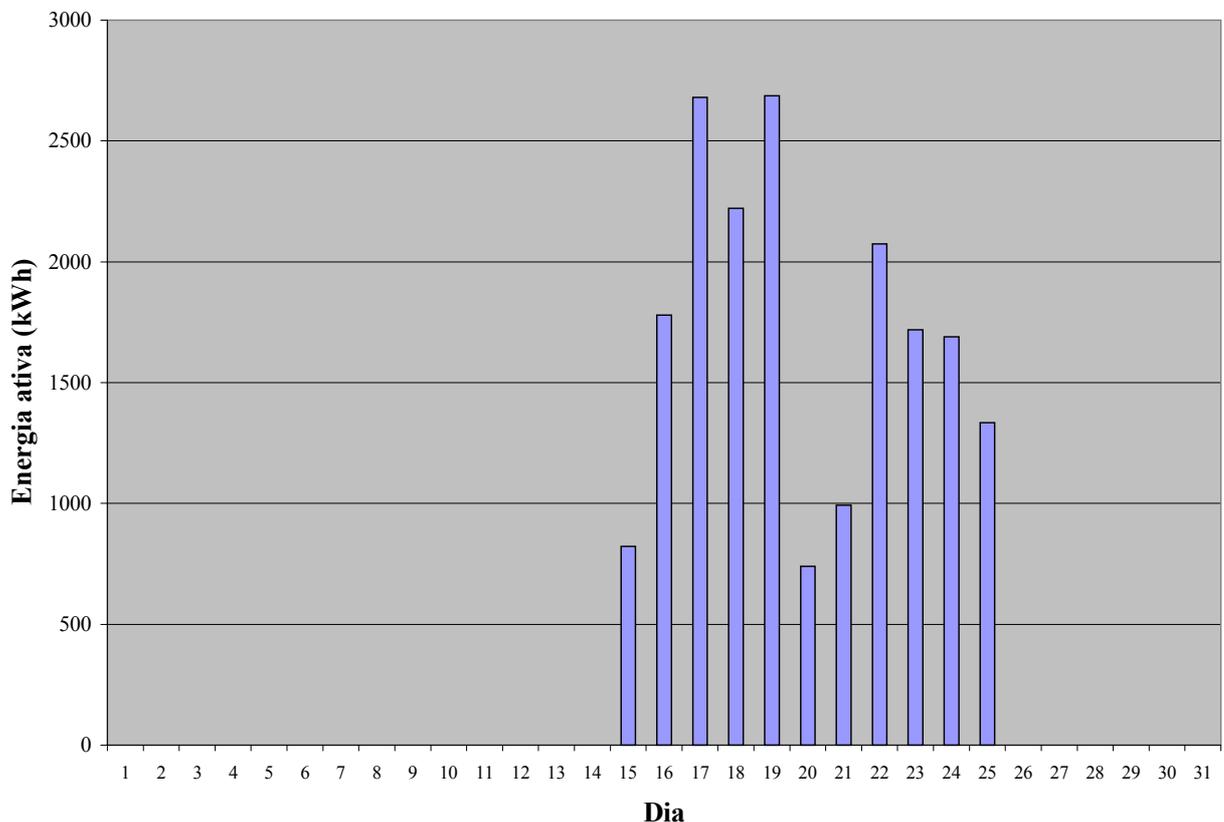
#### 7.1.1 Produção e Consumo de Energia Diária da Turbina Eólica de 225 kW

Durante os meses de maio à julho de 2000, foram realizadas as medições da quantidade de energia ativa diária fornecida ao sistema de distribuição, assim como, da energia reativa consumida pela turbina eólica de 225 kW.

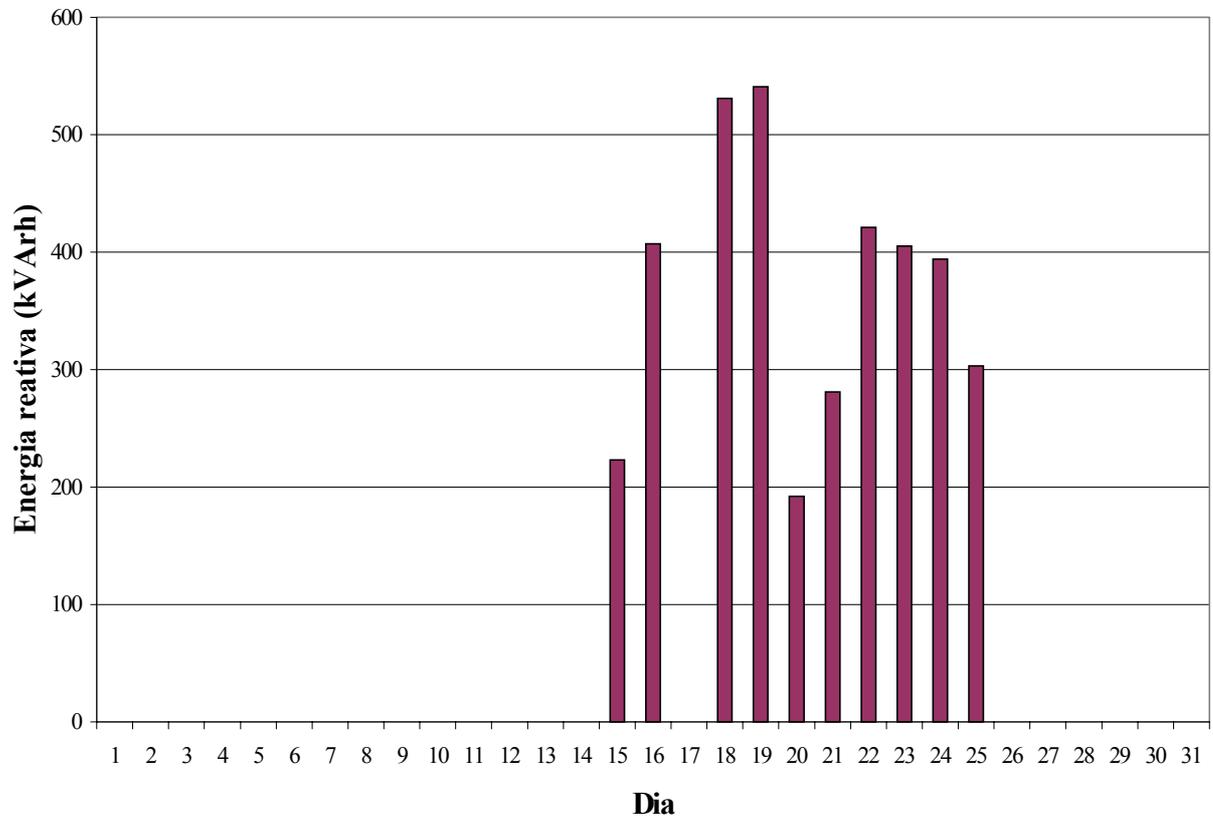
O gráfico da figura 7.2a apresenta os valores da produção diária de energia ativa, enquanto que na figura 7.2b observa-se o consumo de energia reativa requerida para o funcionamento dos geradores assíncronos da turbina, no mês de maio de 2000.

Os registros iniciaram no dia 15 de maio de 2000. Durante este período inicial de testes os intervalos de operação contínua foram menores que 24h, devido à determinados fatores: calmaria (momento em que a turbina eólica esteve em condições de gerar energia normalmente, porém, a velocidade do vento esteve abaixo do valor de 3,7 m/s); falhas ocasionadas por condições anormais provocadas pelo sistema termelétrico.

No dia 17 de maio, ocorreu um erro de leitura que causou a perda dos dados equivalentes ao consumo de energia reativa.



a) Produção diária de energia ativa (kWh).

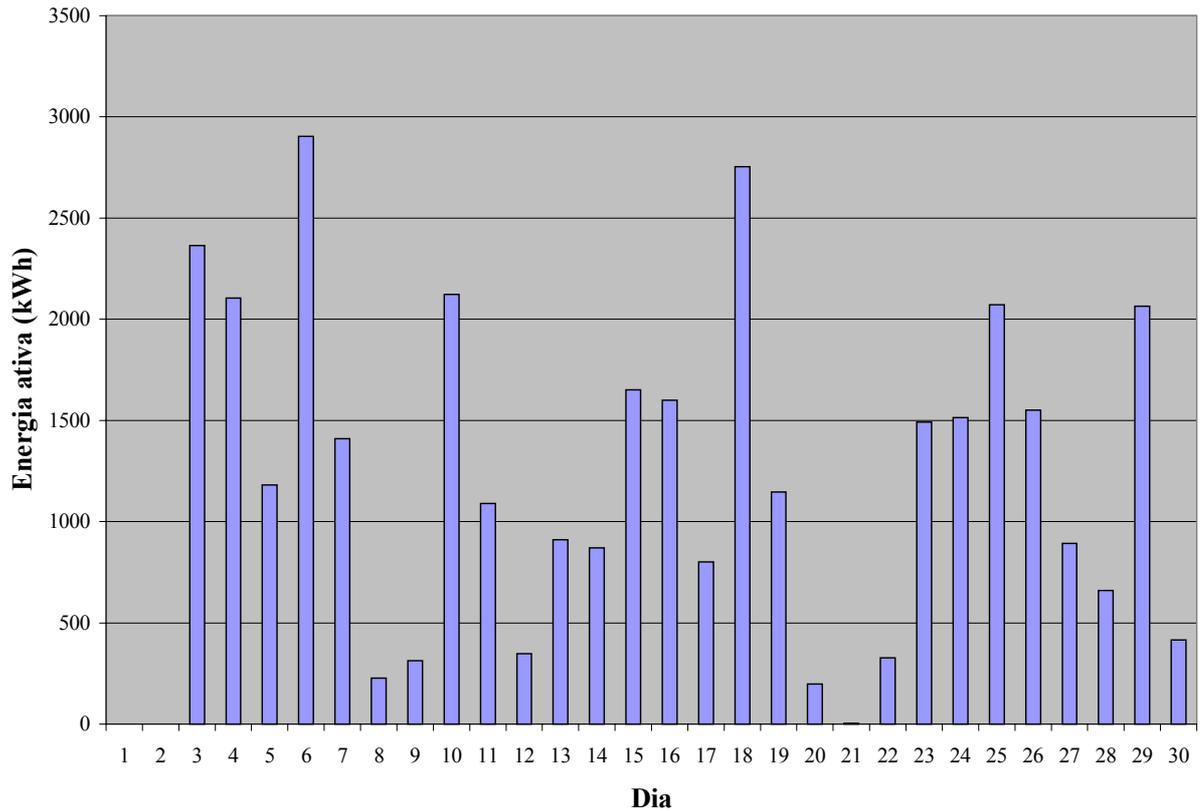


b) Consumo diário de energia reativa (kVArh).

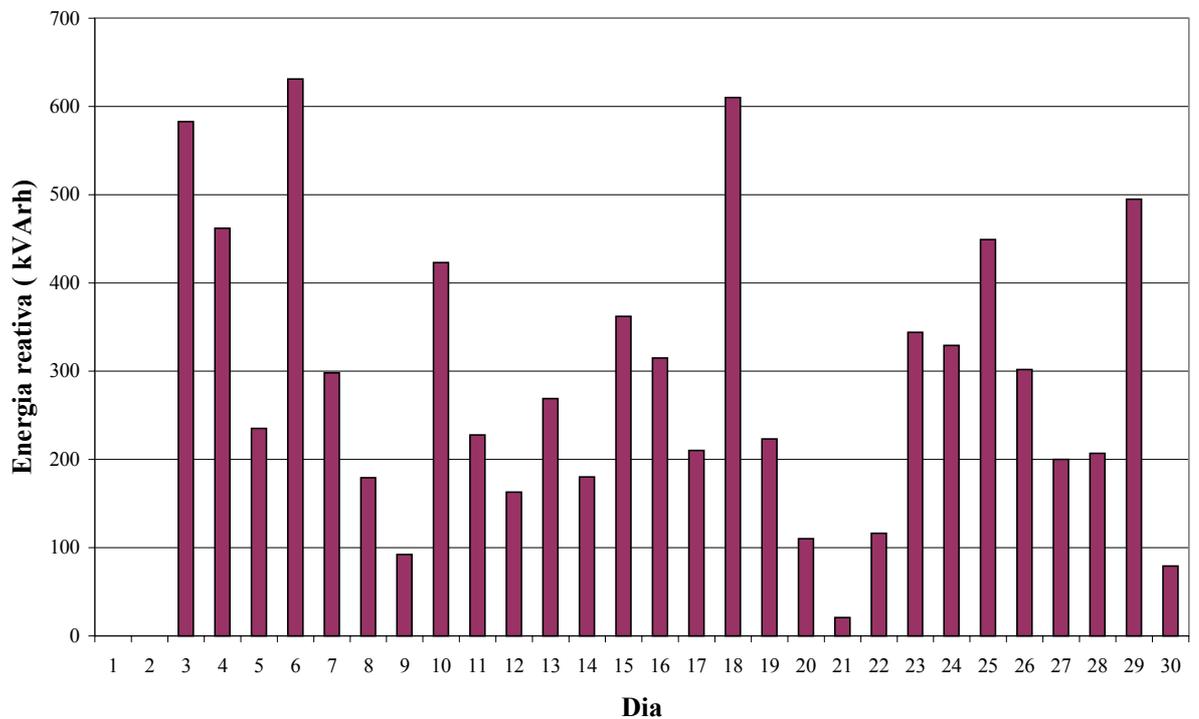
Figura 7.2 - Turbina eólica de 225 kW: a) Produção de energia ativa (kWh);  
b) Consumo de energia reativa (kVArh) - Configuração 1 – Maio de 2000.

No mês de junho, a turbina esteve desligada nos dias 01 e 02 de junho, devido à uma falha grave no sistema termelétrico. Os valores de produção e consumo de energia proporcionados pela turbina demonstraram que alguns dos valores de energia ativa foram obtidos para intervalos menores que 24 h contínuas de operação da turbina. Essa redução nos intervalos de tempo diários estão relacionados às falhas ocorridas no sistema de distribuição, ao período programado de paralisação para a realização de manutenção da rede elétrica, pela concessionária, ao período de calmaria, aos testes submetidos ao sistema de controle, ao sistema hidráulico, ao sistema de rotação do ângulo de passo da pá e ao sistema de ventilação da turbina. O dia 21 de junho apresentou baixa velocidade de vento (velocidade média entre 3 m/s e 4 m/s), por consequência, forneceu um baixo valor de produção e consumo de energia.

O gráfico da produção de energia ativa é apresentada na figura 7.3a, enquanto que o consumo de energia reativa é indicado na figura 7.3b.



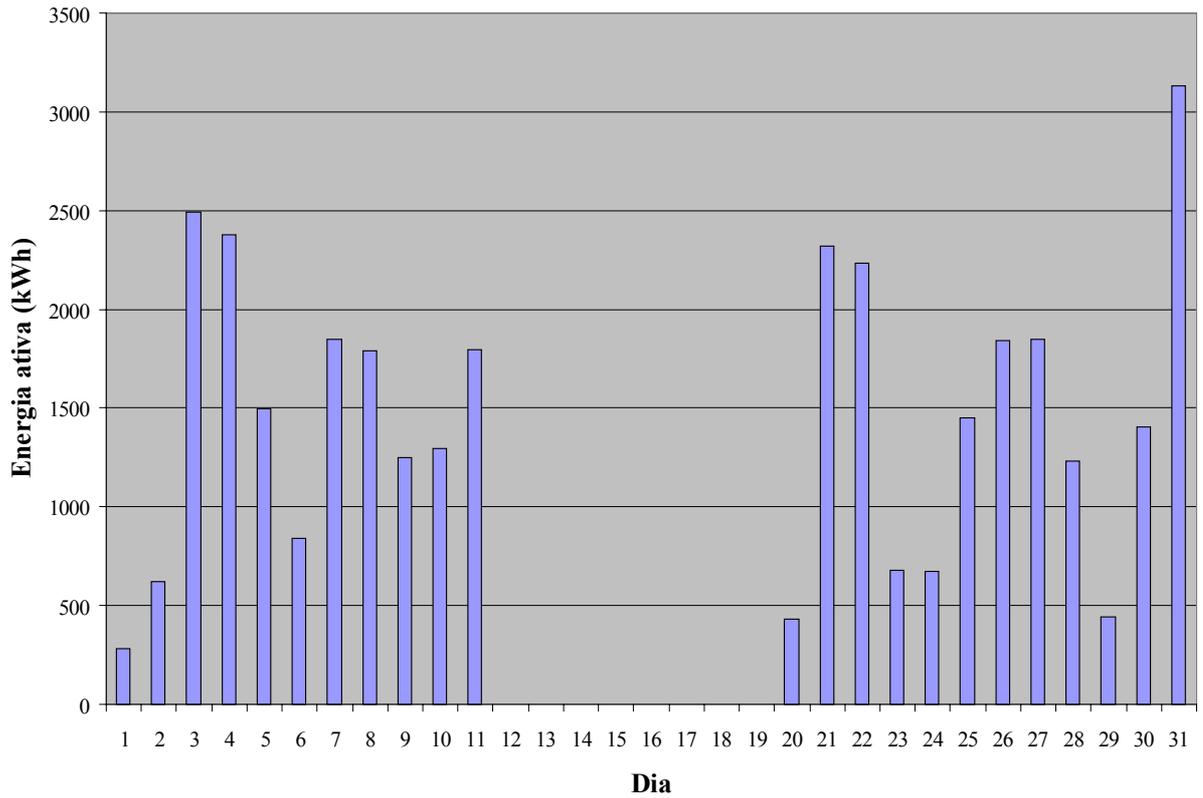
a) Produção diária de energia ativa (kWh)



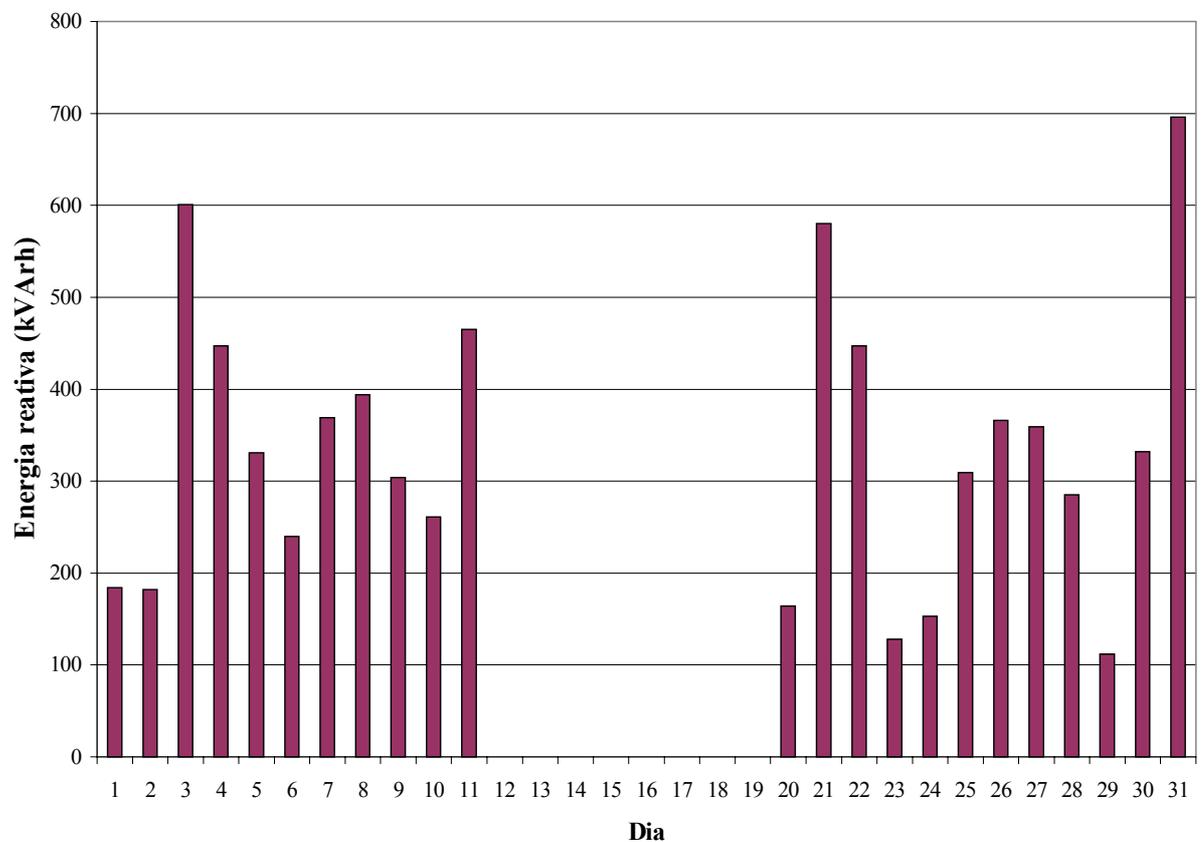
b) Consumo diário de energia reativa (kVArh)

Figura 7.3 - Turbina eólica de 225 kW: a) Produção de energia ativa (kWh);  
b) Consumo de energia reativa (kVArh) – Configuração 1- Junho de 2000.

Nos dias de 12 à 19 de julho, a turbina ficou desligada em função das falhas na rede elétrica. A produção de energia ativa é apresentada na figura 7.4 a e os valores do consumo de energia reativa para este mês é apresentado na figura 7.4b.



a) Produção diária de energia ativa (kWh) .



b) Consumo de energia reativa (kVArh)

Figura 7.4 – Turbina eólica de 225 kW: a) Produção de energia (kWh);  
b) Consumo de energia (kVArh) – Configuração 1 – Julho de 2000.

Os valores da produção de energia ativa e do consumo de energia reativa, referentes à turbina de 225 kW, estiveram de acordo com as especificações técnicas internacionais – IEA [14]. A produção e o consumo de energia observados diariamente apresentaram a perfeita operação da turbina no sistema híbrido eólico/diesel da Ilha, durante o período de testes da Configuração 1.

### 7.1.2 Produção e Consumo de Energia da Turbina Eólica de 225 kW

Entre o meses de maio à julho de 2000, a turbina eólica de 225 kW, injetou na rede elétrica 87.513 kWh e consumiu 19.522 kVArh. A turbina permaneceu sem produzir eletricidade, durante um período de vinte dias. A figura 7.5 mostra a produção de energia ativa e a energia reativa consumida pela turbina eólica de 225 kW.

No mês de maio, o registro obtido, através do sistema de controle da turbina eólica de 225 kW, sobre o valor de energia ativa total foi de 18.739 kWh, tendo um consumo de energia reativa total de 3.698 kVArh, o que representa 19,7% da energia produzida. Em junho, verificou-se que a produção de energia ativa total foi de 34.989 kWh, enquanto que o consumo de energia reativa total foi de 8.115 kVArh, representando 23,6% da energia produzida. Analisando a energia total produzida e consumida para o mês de julho encontram-se os valores de 33.785 kWh e 7.709 kVArh, respectivamente e o valor da energia consumida representa 22,8 % da energia produzida.

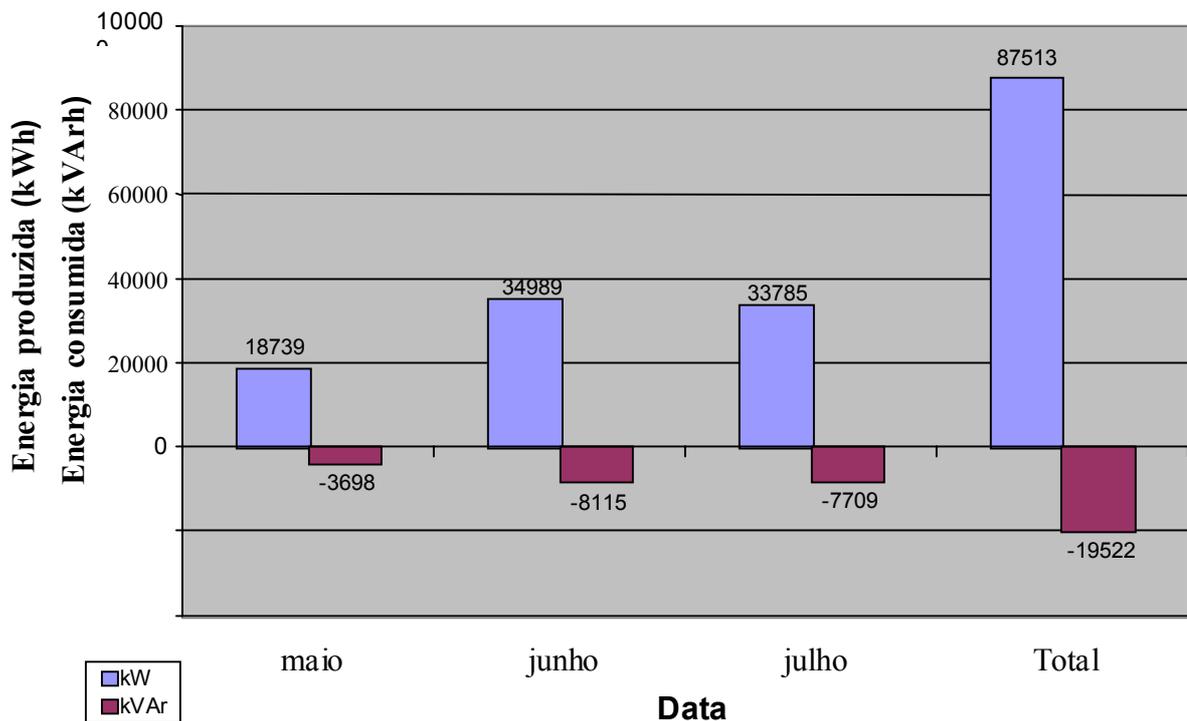


Figura 7.5 - Energia ativa produzida e energia reativa consumida pela turbina eólica de 225 kW, durante os meses de maio à julho de 2000 - Ilha de Fernando de Noronha

### 7.1.3 Penetração Eólica

A penetração eólica se refere à relação da energia total fornecida à rede elétrica, pela energia produzida pela turbina – Spera [25]. Caso a quantidade de energia eólica seja pequena

em relação à capacidade total da rede, nenhum controle sobre a diminuição da energia sobre as turbinas (isto é, métodos para reduzir o máximo de energia) é necessário. A análise demonstra que a turbina eólica contribuiu com os valores de 5,7 %, 13 % e 11 % de energia sem exceder respectivamente a qualidade de energia, nos meses de maio, junho e julho de 2000 (figura 7.6).

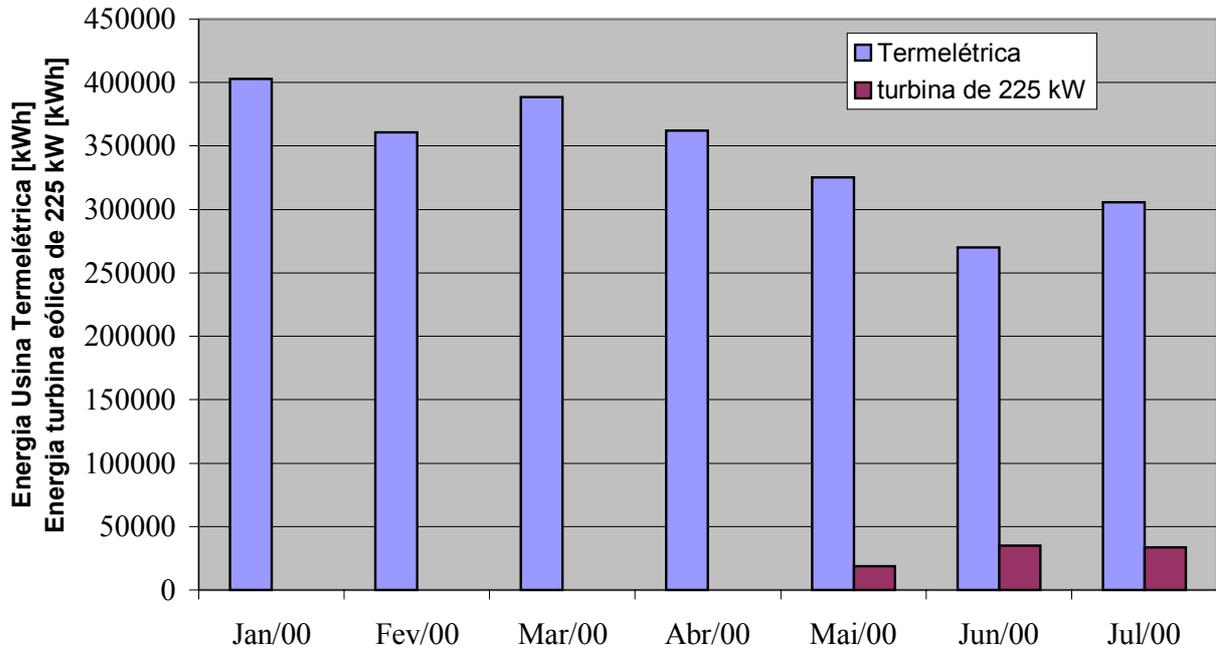


Figura 7.6 - Comparação entre a energia produzida pela Termelétrica e a energia produzida pela turbina eólica de 225 kW.

#### 7.1.4 Tempo de Disponibilidade da Turbina Eólica de 225 kW

O tempo de disponibilidade, dado pela Eq 7.1 [25], representa o tempo total em que a turbina esteve operando, com os geradores produzindo eletricidade ou aguardando para entrar em funcionamento, em cada dia do período de maio a julho de 2000.

$$disponibilidade = \frac{te_h}{rd_h} \cdot 100\% \quad (7.1)$$

$te_h$  - quantidade de horas em que a turbina esteve em condições de produzir energia;

$rd_h$  - quantidade de horas em que a rede de distribuição esteve em condições de receber energia.

É estabelecido que, enquanto o sistema de controle da turbina eólica estiver energizado, através da rede elétrica, a turbina estará aguardando que a velocidade do vento alcance esse valor mínimo velocidade do vento para produzir eletricidade, isto é, quando o sistema de distribuição da Ilha está fornecendo energia normalmente, porém, não há energia eólica suficiente (calmaria - velocidade do vento abaixo de 3,7 m/s) para fazer a turbina entrar em

operação, então a turbina sai do estado de operação e vai para o estado de espera, mas continua em disponibilidade para a geração de energia elétrica.

Durante o mês de maio de 2000, foram registrados onze dias consecutivos (entre os dias 15 e 25 de maio), totalizando 264 horas, as quais não foram completamente aproveitadas, devido às falhas proporcionadas pela rede (30 horas), com um tempo disponível da rede de 234 horas. O tempo total que a turbina esteve em condições de produzir energia foi de 224 horas, o que representou 96% do tempo total possível, no qual a turbina esteve em condições de produzir eletricidade.

No mês de junho de 2000, foram observados vinte e nove dias (entre os dias de 3 à 30 de junho), com 672 horas para a o tempo total deste período. O tempo observado de falhas da rede foi de 49 horas, onde esta manteve-se disponível por 623 horas. O tempo relativo às condições de geração da turbina foi de 589 horas. Este valor representou 95% do tempo total.

No mês de julho, verificou-se um tempo total de 528 horas, entre os dias de 2 a 11 de julho e de 20 a 31 do mesmo mês, das quais foram subtraídas 26 horas, relativas ao tempo de falha da rede, obtendo-se 502 horas de rede energizada. O tempo para a turbina foi de 459,5 horas, 92% do tempo total.

O tempo total relacionado aos dias que foram efetuadas as medições de operação da turbina, o seu tempo de disponibilidade e a relação desses valores são apresentados na tabela 7.1.

Tabela 7.1. Tempo de disponibilidade para a produção de eletricidade da turbina eólica.

Mês	Tempo da rede elétrica em condições de receber energia (h)	Tempo da turbina em condições de produzir energia (h)	Valores relativos ao tempo de disponibilidade (%)
Maio/2000	234	224	96
Junho/2000	623	589	94
Julho/2000	498	459.5	92

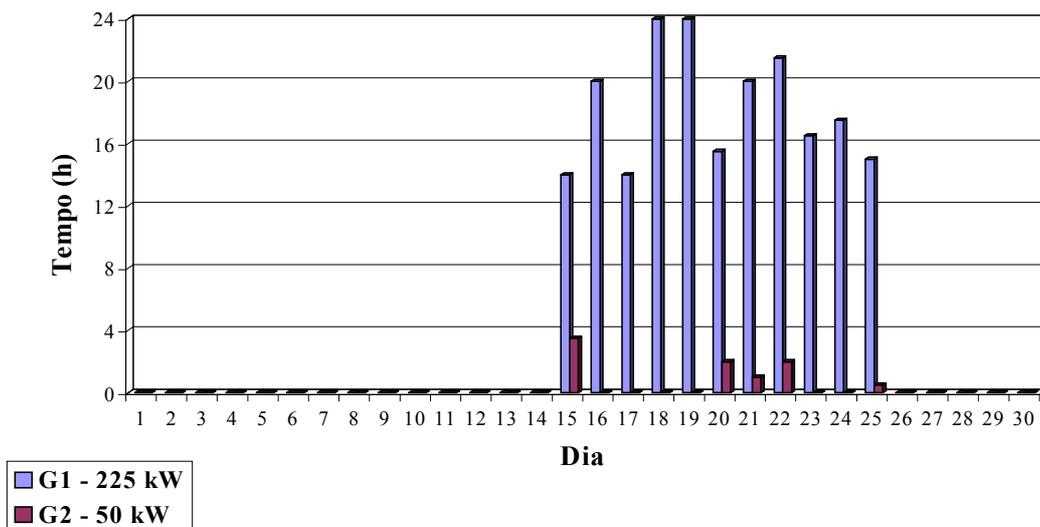
#### 7.1.5 Tempo de Funcionamento dos Geradores da Turbina Eólica de 225 kW

O sistema de controle da turbina eólica de 225 kW registrou a quantidade de horas de funcionamento de cada gerador, para fornecer a informação sobre a otimização da captação energética, realizada pela turbina. A comutação do gerador menor para o maior ocorre quando a potência assume valores acima de 50 kW. No caso da comutação do gerador de maior potência para o de menor potência, essa se realiza quando a potência gerada pelo primeiro assume valores de aproximadamente 10 kW. Foi verificado, durante a operação da turbina, que a comutação entre os geradores está relacionada à faixa de velocidade de vento entre 5 m/s e 7 m/s. Quando a troca de um gerador é iniciada devido às mudanças na velocidade de vento, a potência produzida é regulada para 0 kW e o gerador é desconectado. O rotor é acelerado ou desacelerado para alta ou baixa velocidade de rotação síncrona, e segue-se o procedimento de uma conexão normal à rede elétrica.

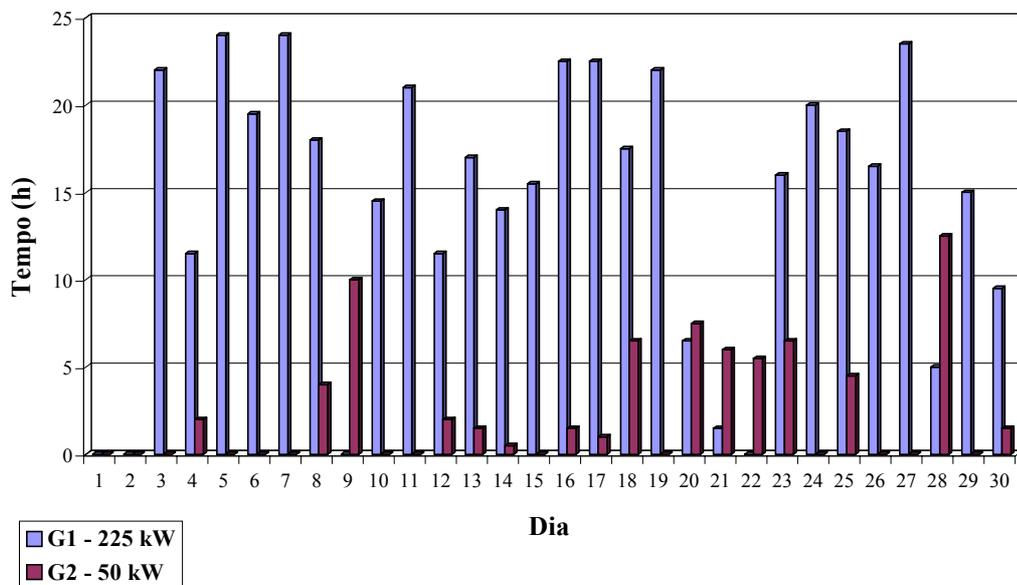
Nas medições diárias do tempo de operação dos geradores (G1 - gerador de indução de 225 kW e G2 – gerador de indução de 50 kW), apresentados na figura 7.7, encontra-se o tempo de funcionamento relativo à participação na geração da energia ativa injetada na rede elétrica pelo gerador de duplo enrolamento dessa turbina eólica.

A partir do dia 15 de maio de 2000, deu-se início ao registro da operação efetiva dessa turbina. Nesse mês, o gerador maior atuou um total de 201,5 horas, enquanto o menor esteve em

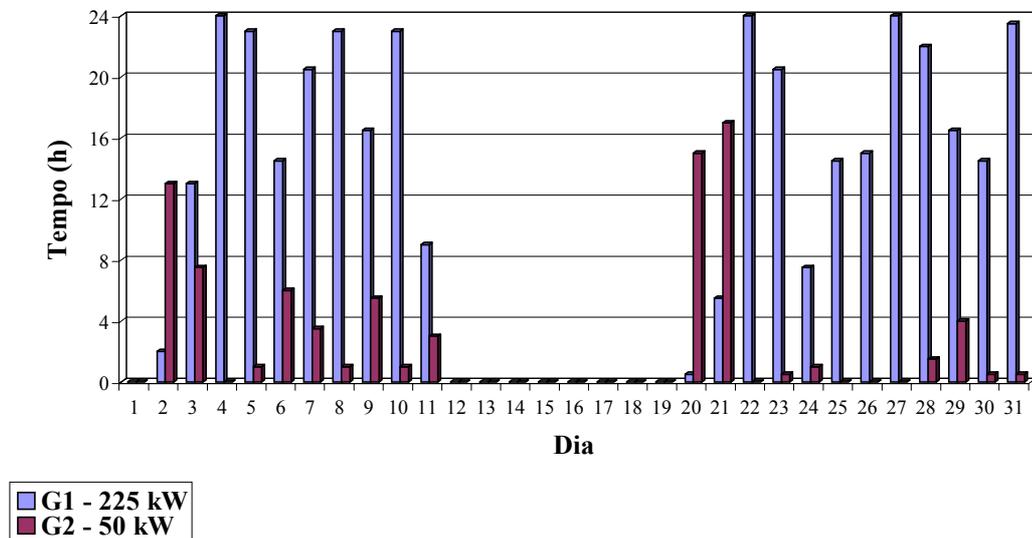
operação durante 9 horas. Essa diferença nos valores das horas de atuação de cada gerador foi devido à média da velocidade de vento estar acima de 8,5 m/s na Ilha. Em junho de 2000, foi observado que a produção de energia fornecida pelos geradores esteve distribuída em 429 horas de operação para o gerador maior e 73 horas de funcionamento para o gerador menor. As horas de funcionamento dos geradores estão relacionadas, com o quanto a rede elétrica esteve disponível ou o vento esteve em condições de proporcionar a produção de eletricidade pela turbina. No mês de julho de 2000, apresentou-se um valor de produção de 341 horas para o gerador maior e 94 horas para o gerador menor.



a) Maio de 2000



b) Junho de 2000



c) Julho de 2000.

Figura 7.7 – Tempo de funcionamento dos geradores G1 –225 kW e G2 – 50 kW:  
a) maio de 2000; b) junho de 2000; c) julho de 2000.

### 7.1.6 Falhas Proporcionaladas pela Rede Elétrica

Durante a operação da turbina eólica de 225 kW, foram analisados os principais aspectos sobre os dados estatísticos fornecidos pelo seu sistema de controle, relacionados à disponibilidade da rede elétrica e aos defeitos ocorridos na rede. Os problemas que causaram as interrupções do fornecimento de energia pelo sistema de distribuição na Ilha, foram registrados durante os meses de maio a julho de 2000

Foram observadas seis ocorrências de erro de seqüência de fase, ou seja, após a conexão dos geradores síncronos ao barramento ligado à rede, estes não apresentaram a mesma seqüência de fase nos bornes da chave que fecha o paralelo. Para o gerador síncrono estar à mesma seqüência de fase indica que todas as fases estão simultaneamente nas condições ideais de sincronismo. Para o erro de freqüência da rede, ocorrido quatro vezes, o sistema de controle da turbina detectou que a freqüência da rede ultrapassou 4% do valor estabelecido por norma (60 Hz) ou esteve abaixo do mesmo, em uma faixa de tempo de 02 segundos de duração. Por duas vezes a tensão de fase se tornou menor do que a tensão nominal (280V) em um período de 0,4 segundos. O desbalanceamento de corrente da rede elétrica foi detectado em 27 ocorrências. Uma das fases apresentou uma diferença de 65A, comparada ao valor de corrente elétrica medido nas outras duas fases, para o mesmo instante.

A realização da troca de materiais e equipamentos utilizados pela rede de distribuição, com as funções de proteção dos ramais (chaves fusíveis), de conexão dos cabos elétricos (isoladores) e outros, tais como, postes e transformadores, exigiram o desligamento do

alimentador 01, como procedimento de segurança, desligando por sua vez a turbina eólica de 225 kW conectada à esse circuito elétrico. A operação de manutenção fez com que não houvesse o fornecimento de energia à turbina, durante algumas horas.

Os casos observados e suas freqüências de ocorrências, que provocaram a parada de fornecimento de energia à rede elétrica e, por consequência, à turbina, foram os seguintes:

- Manutenção realizada pela concessionária.....uma ;
- Erro de seqüência de fase .....seis;
- Erro de freqüência de rede.....quatro;
- Erro de tensão de rede.....duas;
- Desbalanceamento de corrente..... vinte e sete.

Os problemas que causaram interrupções na rede elétrica são apresentados na figura 7.10.

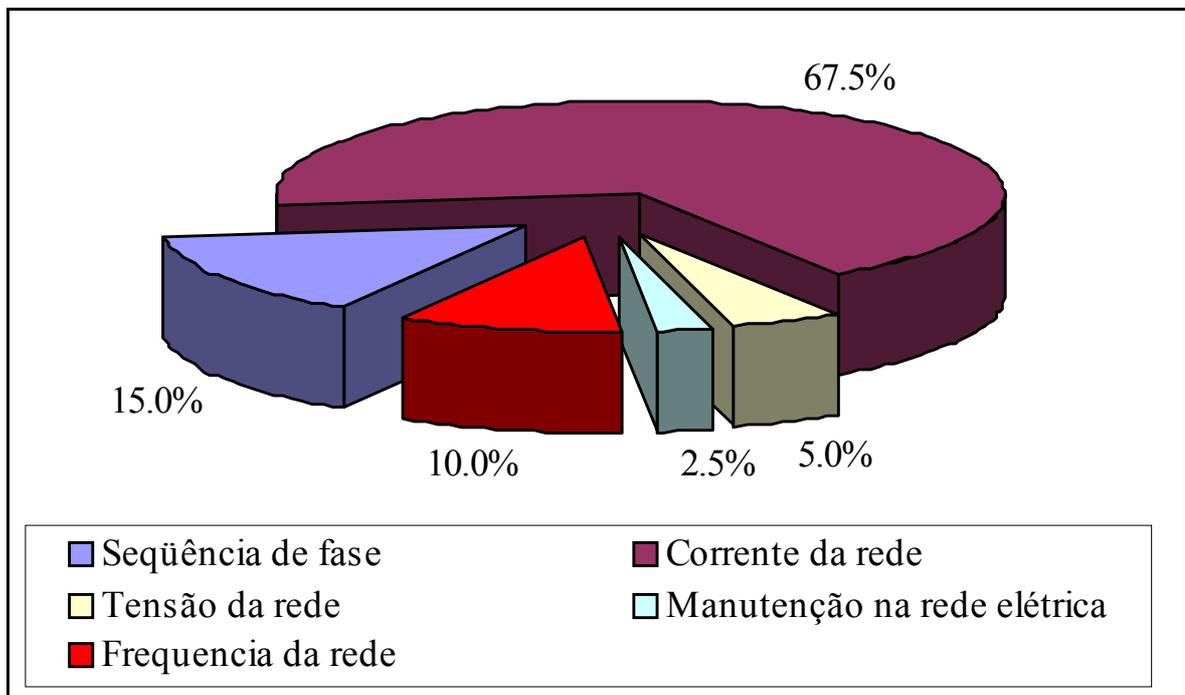


Figura 7.10 - Problemas detectados na rede elétrica.

A falha relacionada à sobrevelocidade do gerador da turbina foi identificada a partir da falta de energia da rede elétrica, quando nesse momento a turbina estava gerando uma potência elevada. Nesse caso, o freio a disco é acionado, porém a falta de um torque frenante proporcionado pela rede elétrica impossibilitou o freio a disco parar a turbina imediatamente, permitindo por um momento um aumento da velocidade do rotor e consequentemente do gerador, resultando no erro de sobrevelocidade do gerador. Com relação ao sistema de rotação do ângulo de passo das pás foi observada uma falha quando o desvio padrão sobre a tensão de controle foi maior do que 7V no período de 10 segundos. Essas falhas possibilitam o retorno a operação normal em poucos segundos, tão logo o funcionamento da rede elétrica houvesse se

restabelecido. Outro erro foi observado a partir do circuito de emergência, utilizando um dispositivo temporizador, que desativou o controlador quando foram observados os erros de seqüência de fase. Neste caso o controlador não esteve disponível por um período superior aos 2 segundos, preestabelecidos pelo fabricante, necessários para que o controlador pudesse realizar a detecção de outros tipos de defeitos.

## 7.2 Economia do Consumo de Combustível

Devido ao aumento da demanda observada no ano 2000, o sistema de geração termelétrica passou a dispor do dimensionamento dos tanques de combustível para o armazenamento que correspondesse à um período superior à 30 dias de auto-suficiência, no caso de ocorrer algum imprevisto impossibilitando a entrada de óleo diesel na Ilha. O sistema de alimentação de combustível dos grupos geradores diesel utilizados pela termelétrica até julho de 2000, apresentavam tanques de combustível com capacidade para 49.000 litros. Após essa data, foi elevada a capacidade de armazenamento dos tanques de combustível para 229.000 litros (figura 7.11). Apresentando um significativo aumento da utilização de combustível fóssil, na Ilha, acima de 460%.



Figura 7.11. Tanques de combustível (óleo diesel) da Usina Termelétrica Tubarão.

Durante o período de janeiro à julho de 2000, o sistema de controle da turbina eólica de 75 kW registrou uma geração de energia ativa equivalente à 23.160 kWh – CELPE [5].

Os dados da produção de energia dos geradores diesel, registrados pela Usina Termelétrica Tubarão, foram coletados através de instrumentos mecânicos de medição e registrados pelas leituras horárias, realizadas pelos técnicos do sistema de geração, entre os meses de janeiro à julho de 2000. Foi obtido nesse período o valor de 2.416.400 kWh, correspondente à um

consumo de óleo diesel de 796.090 litros. Verificou-se o consumo aproximado de 1.560.000 litros de óleo diesel, no ano de 2000 – CELPE [5].

A quantidade de óleo diesel que deixou de ser requerida pela usina termelétrica foi cerca de 35.000 litros. A energia produzida, a partir das turbinas eólicas de 225 kW e de 75 kW, nos meses de testes de maio à julho de 2000, pode ser acompanhada na figura 7.12. A produção de eletricidade, fornecida ao sistema de distribuição da Ilha, através das turbinas neste período de testes, representou uma economia de R\$ 40.600,00.

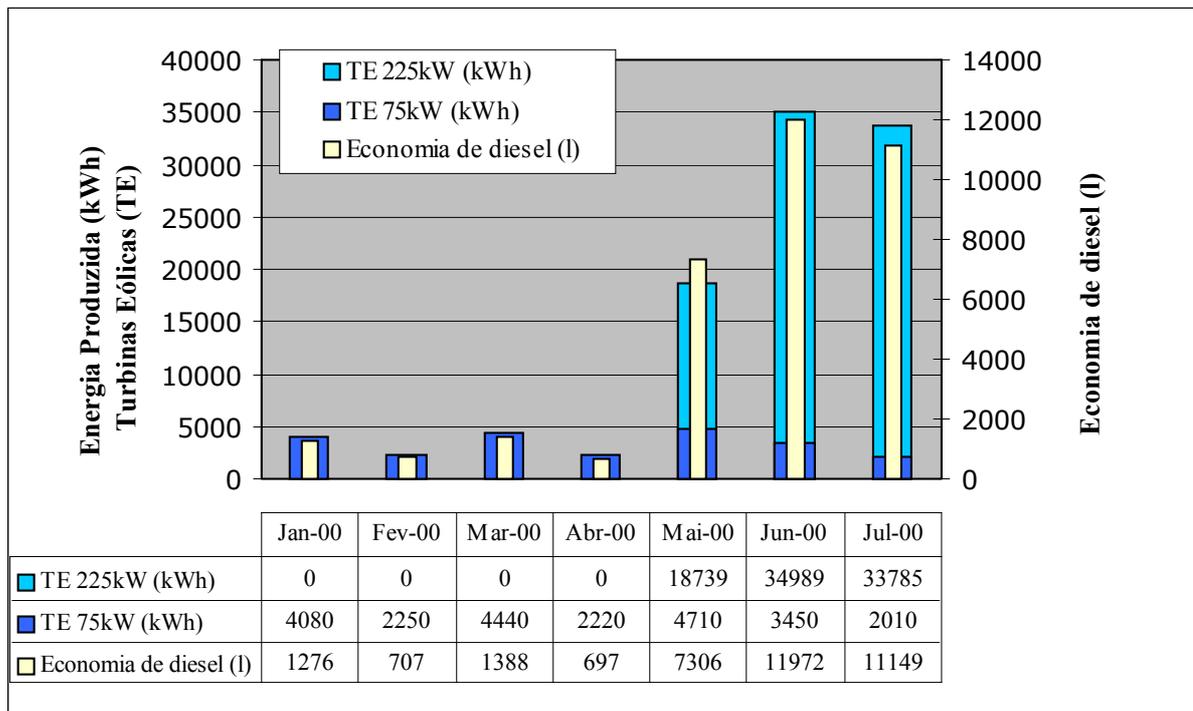


Figura 7.12. Economia de óleo diesel: Produção de energia ativa através das turbinas eólicas de 75 kW e 225 kW.

O combustível transportado via embarcação marítima, a partir de Natal - RN, com o objetivo de abastecer a Usina Termelétrica Tubarão, apresentou o custo de R\$ 0,26/litro para o seu frete, para todo o ano de 2001. O preço do óleo diesel comprado da distribuidora, nesse período, apresentou um custo de R\$ 0,90/litro. A quantidade de energia gerada para o ano de 2001 foi estimada, de acordo com a concessionária, em cerca de 5.400 MWh. Este valor representa, um consumo de óleo diesel, aproximado, de 1.870.000 litros – CELPE [5]. Esse aumento de cerca de 24,8% na utilização de combustível fóssil, realizado para atender a demanda da Ilha, apresenta um custo para a aquisição do óleo diesel da ordem de R\$ 2.171.500.

## 8. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/DIESEL DE FERNANDO DE NORONHA – CONFIGURAÇÃO 2

### 8.1 Descrição Básica

Na análise experimental, realizada a partir dos dados obtidos da Configuração 2 do sistema híbrido da Ilha de Fernando de Noronha, são apresentados os resultados das operações da turbina de 225 kW, em condições normais e especiais – IEA [15], e respectivas influências exercidas sobre o funcionamento dos geradores diesel e a qualidade da energia elétrica do sistema híbrido eólico/diesel da Ilha. Um sistema de aquisição de dados foi utilizado para as medições das grandezas de tensão e corrente no sistema elétrico da Ilha, através da cooperação técnica entre o Laboratório Risø da Dinamarca e o CBEE. As medições foram realizadas no barramento de baixa tensão da usina termelétrica (figura 8.1) e no ponto de conexão da turbina eólica de 225 kW (figura 8.2), simultaneamente. Os resultados são apresentados nos gráficos das potências ativa e reativa, tensão e frequência, em um determinado intervalo de tempo.

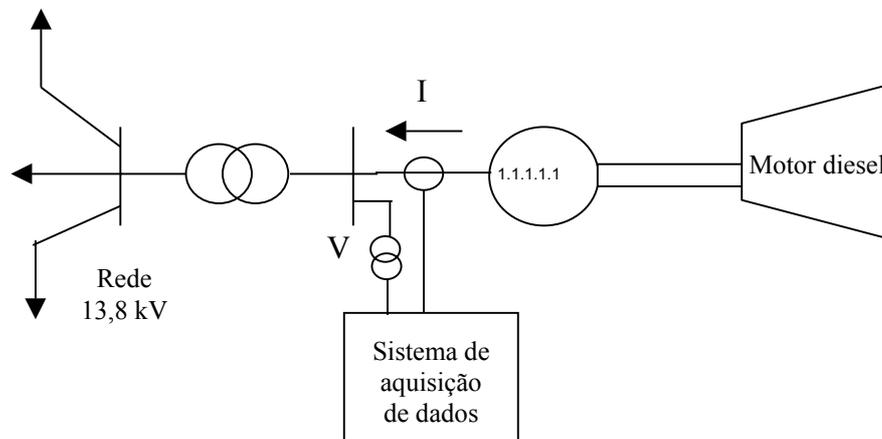


Figura 8.1 – Medição no barramento de baixa tensão da Usina Termelétrica.

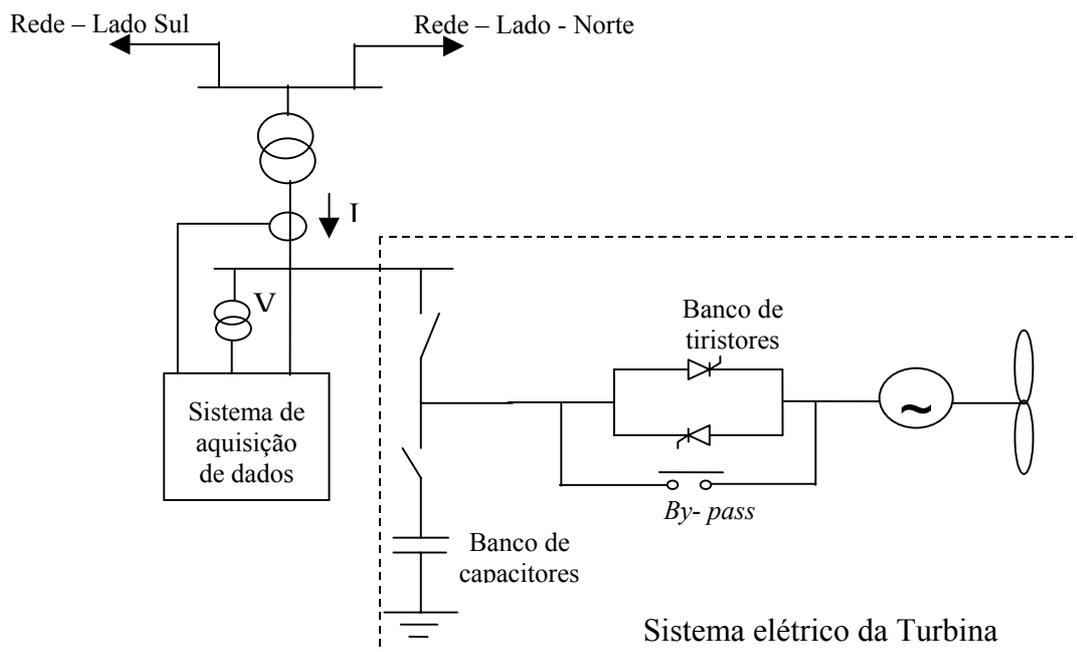
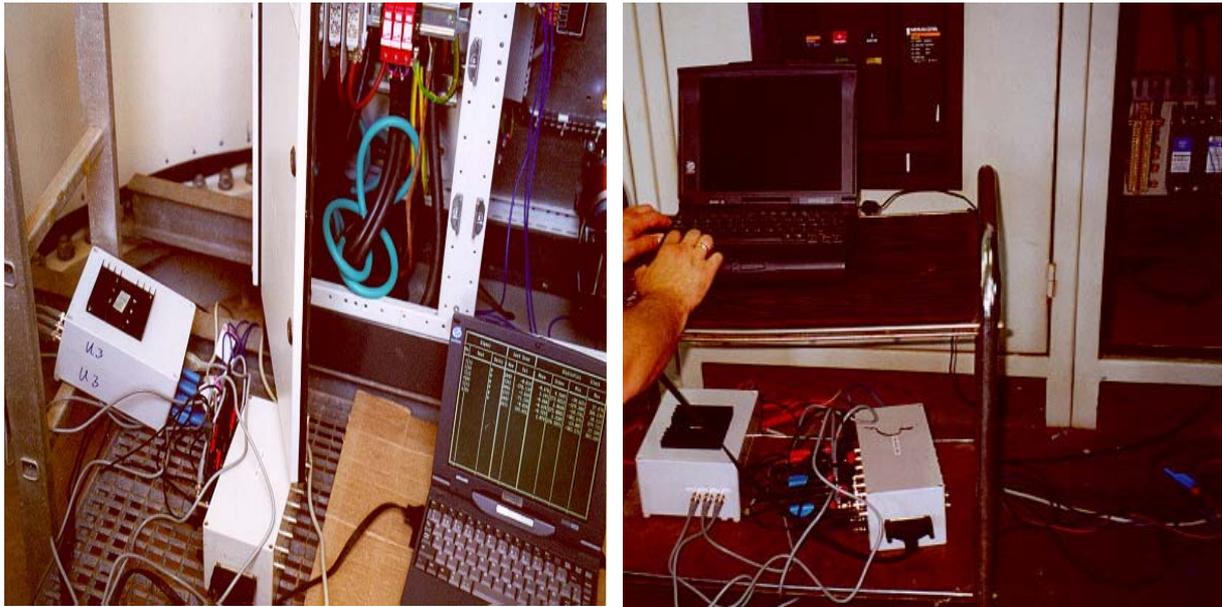


Figura 8.2 – Medição em baixa tensão no ponto de conexão da turbina eólica de 225 kW à rede.

Através do sistema de aquisição de dados foram obtidos os valores eficazes de tensão e corrente nas três fases, para um mesmo intervalo de tempo. As medições de tensão foram efetuadas no barramento da usina (figura 8.3a) e no ponto de conexão da turbina (figura 8.3b). O transformador de corrente do sistema de aquisição de dados, no caso da usina, foi instalado no secundário dos transformadores de corrente para medição e proteção já existentes na saída dos geradores diesel. Na turbina, os transformadores de corrente foram instalados diretamente no barramento. Os sinais provenientes do conversor de tensão e dos transformadores de corrente foram conectados ao conversor analógico-digital instalado no computador. A taxa de amostragem utilizada pelos equipamentos foi de 480 Hz.



(a)

(b)

Figura 8.3 - Sistema de aquisição de dados - medição de tensão e corrente: (a) ponto de acoplamento da turbina eólica de 225 kW; (b) barramento da usina termelétrica.

O sistema de aquisição de dados utilizado para medição de tensão e corrente foi composto pelos seguintes itens:

- conversores de tensão e corrente;
- transformador de corrente;
- conversor analógico-digital e multiplexador;
- computador.

Para realizar as medições referentes à influência da turbina de 225 kW sobre a qualidade de geração elétrica do sistema híbrido, caracterizado pela configuração 2, foram utilizados dois tipos de sensores de corrente. Na turbina eólica foi utilizado um sistema de cabo flexível, onde o conversor de sinal já é incluído, de tal maneira que a saída do conversor é dada em volts equivalente à ampères no lado primário ( $3 V_{rms} = 300 A_{rms}$ ). O equipamento apresenta uma sonda de corrente flexível, *LEM RR3000-SD*, fabricado pela *LEM*, onde a saída é dada em  $\pm 3 V_{rms}$  para 300 A rms, ou seja, 10 mV por Ampère.

Na saída do gerador diesel da CELPE, foi utilizado um sensor de corrente, em forma de alicate, conectado ao secundário do transformador de corrente, existente. O transformador de corrente utilizado converte a corrente, passando no condutor que se deseja medir, de um valor muito grande para um valor que o sistema de medição possa processar. Também foi incluído

um conversor de sinal, onde a saída obtida foi um sinal de tensão correspondente ao sinal de corrente lido. O sensor tem a mesma calibração de 10 A rms para 3 V rms.

Não foram utilizados transformadores de potencial para as medições realizadas para a configuração 2. A medição foi efetuada em baixa tensão e os cabos foram ligados diretamente do quadro (barramento) para o condicionador de sinais, que converteu os sinais para +- 5V. Os condicionadores utilizados foram o conversor de sinal usado na turbina de 225 kW, que tem a relação de 200 V /1 V e máximo de 600V fase-neutro e o conversor de sinal usado na saída do gerador diesel, que tem a relação de 133V /1V e máximo de 400 V fase-neutro.

O conversor analógico-digital (Conversor A/D) é o equipamento que converte os valores de tensão, que entram, para bits. O conversor A/D apresentou três grandezas, assim especificadas: taxa de amostragem com que mediu os dados; a resolução dos dados medidos em número de bits e; a faixa de leitura, em volts, nesse caso.

A frequência na Ilha é de 60 Hz, o que significa uma senóide com período de 16 ms. Desta forma, o equipamento de medição coletou pelo menos 8 amostras de cada ciclo (senóide) de tensão e corrente, ou seja, no mínimo  $480 \text{ s}^{-1}$  por canal. Sendo medidos 3 canais de corrente e 3 canais de tensão, o equipamento possui uma taxa de no mínimo  $8 \times 480 \text{ Hz} = 3.84 \text{ kHz}$ .

A outra grandeza que explica a precisão do sinal é a quantidade de bits que o conversor utiliza para cada porta e o nível de tensão. O sistema de aquisição de dados (conversor Analógico-Digital – A/D) utilizou a placa da *Computer Boards*, similar à *PCM-DAS08: 8 Chan, 12 Bit A/D for PCM Range = +/-5 V, sampling 100 kHz*. Um bit é usado para o sinal de tensão, o que resulta na resolução fornecida pela Eq. 8.1:

$$\text{Resolucao} = \frac{10\text{Volts}}{2^{12}} \approx 0.0024\text{V} \quad (8.1)$$

A frequência de amostragem máxima permitida pelo instrumento é de  $100 \times 10^3 \text{ Hz} / 8$  canais = 12500 Hz / canal. Entretanto, a taxa de amostragem foi ajustada para 480 Hz por canal. Com uma taxa de amostragem de 480 Hz, tem-se oito pontos por cada ciclo de 60 Hz, o que aumenta ainda mais a confiabilidade nas medições.

Outra operação deste equipamento é a multiplexação, isto é, coletou os dados de cada canal de uma só vez e enviou para o computador. A diferença de tempo entre a medida de cada canal é de 50 microsegundos ( $50 \mu\text{s}$ ). Para o equipamento utilizado na Ilha,  $50 \mu\text{s}$  equivale à um erro de medição em 60Hz de  $50 \mu\text{s} / 16 \text{ ms} = 0,003125 \text{ ms}$ .

Para evitar acúmulo de erro entre as medidas de tensão e corrente, o primeiro canal mede a tensão na fase "a" e o segundo canal mede a corrente na mesma fase, o canal 3 mede a tensão na fase "b" e o canal 4 a corrente na fase "b" e o canal 5 mede a tensão na fase "c" e o canal 6 mede a corrente na fase "c".

No processador/computador, foram realizadas as operações de cálculo de corrente e tensão bem como encontrado o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão e calculadas as potências ativa e reativa. Um programa no computador ajustou uma senóide, que representou a tensão e corrente fundamentais medidas, com oito amostras por cada senóide. Com a corrente e a tensão fundamentais foram calculados os valores eficazes da tensão e corrente instantâneos e depois, por integração, os valores médios de 10 minutos.

Obteve-se a potência ativa,  $P = VI \cos \phi$ , onde  $\phi$  é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente). Somando as 3 fases tem-se a potência ativa total e a potência média, através de integração. Através do valor da potência aparente, S, sabendo que  $S^2 = P^2 + Q^2$  é possível expressar a potência reativa, Q, ou mesmo usando o seno de  $\phi$ , onde  $Q = VI \sin \phi$ .

No computador estão o programa de aquisição de dados que faz as operações acima. O programa primeiro demultiplexa os dados medidos para poder usar os dados de cada canal separadamente e compensa os  $50 \mu\text{s}$  de diferença entre os canais consecutivos medidos. Depois converte de bits para números que serão os volts e ampères equivalentes. Depois faz o ajuste da senóide (*fitting*). Realiza os cálculos de valor eficaz de tensão, corrente e fator de

potência. E finalmente, calcula as potências ativa e reativa. No computador, também são armazenados os dados.

Nas seções 8.2 e 8.3, são observados os comportamentos das grandezas elétricas influenciadas pela operação da turbina eólica de 225 kW e as respectivas respostas do sistema elétrico nos momentos de sua conexão com a rede elétrica e no momento da sua desconexão. Foram obtidos os valores de potência ativa injetada na rede pela turbina e a resposta de valor de potência ativa equivalente do sistema de geração termelétrica. Assim como, os valores de consumo de potência reativa devido à solicitação da corrente de magnetização do gerador de indução da turbina e o suprimento de reativo fornecido pela termelétrica à turbina. Também, foram analisados os valores dos níveis de tensão e de frequência no sistema elétrico da Ilha. Essas análises têm o objetivo de identificar a influencia causada pela turbina à qualidade de energia do sistema elétrico e ao funcionamento dos geradores diesel.

## 8.2 Desconexão da Turbina Eólica de 225 kW da Rede Elétrica/ Parada Emergencial da Turbina de 225 kW

### 8.2.1 Gráfico da potência ativa

A figura 8.4 apresenta o gráfico da potência ativa em função do tempo, no qual a turbina eólica de 225 kW está injetando na rede elétrica, aproximadamente 100 kW, enquanto que a geração diesel fornece ao sistema cerca de 400 kW, no intervalo de 9:27:00 às 9:27:15. Com a saída de operação da turbina, 0 kW, simulando uma situação de emergência, no instante 9:27:15, percebe-se como resposta imediata um acréscimo para cerca de 500kW na geração da usina termelétrica. No instante da desconexão da turbina, a frequência do sistema tende a cair, devido à termelétrica assumir a carga da Ilha, forçando os geradores diesel a aumentar a potência gerada, a fim de manter o suprimento de potência e a frequência do sistema. Verifica-se que a penetração eólica relacionada à turbina eólica de 225 kW no intervalo em que esteve em operação alcançou cerca de 19,68%.

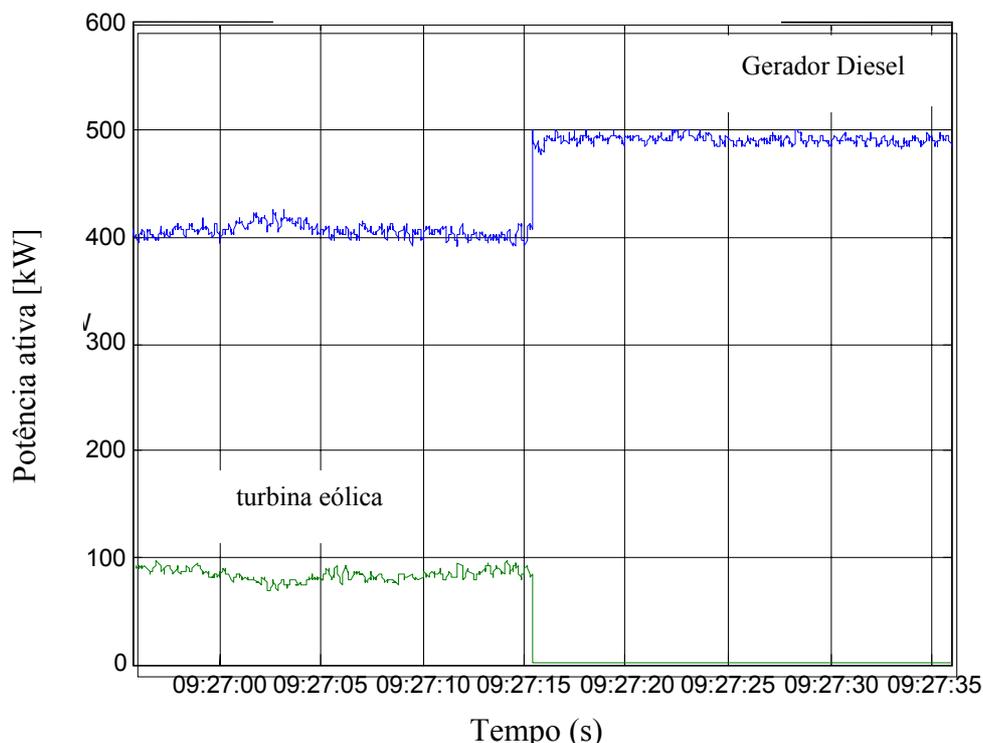


Figura 8.4 – Valores amostrais instantâneos de potência ativa em um intervalo de 40 s para o sistema termelétrico e a turbina eólica de 225 kW – desconexão da turbina (emergência).

### 8.2.2 Gráfico da potência reativa

Na figura 8.5, o gráfico da potência reativa em função do tempo apresenta os valores instantâneos das potências reativas: *consumida* pela turbina eólica de 225 kW e *produzida* pela geração diesel para atender as cargas da Ilha e a turbina. Com a desconexão da turbina da rede elétrica, no instante de 9:27:15, o sistema termelétrico deixa de suprir cerca de -20 kVAr, requeridos pela turbina, para magnetização do gerador de indução. Como consequência, observa-se uma queda equivalente de 20 kVAr na média dos valores instantâneos das amostras da potência reativa, no mesmo instante, por parte da geração termelétrica. Como a carga da Ilha não foi alterada, a necessidade de reativo se estabilizou em torno dos 160 kVAr, a partir do instante de 9:27:16. O consumo de reativo requerido pela turbina durante o seu período de funcionamento esteve próximo à 11,11%.

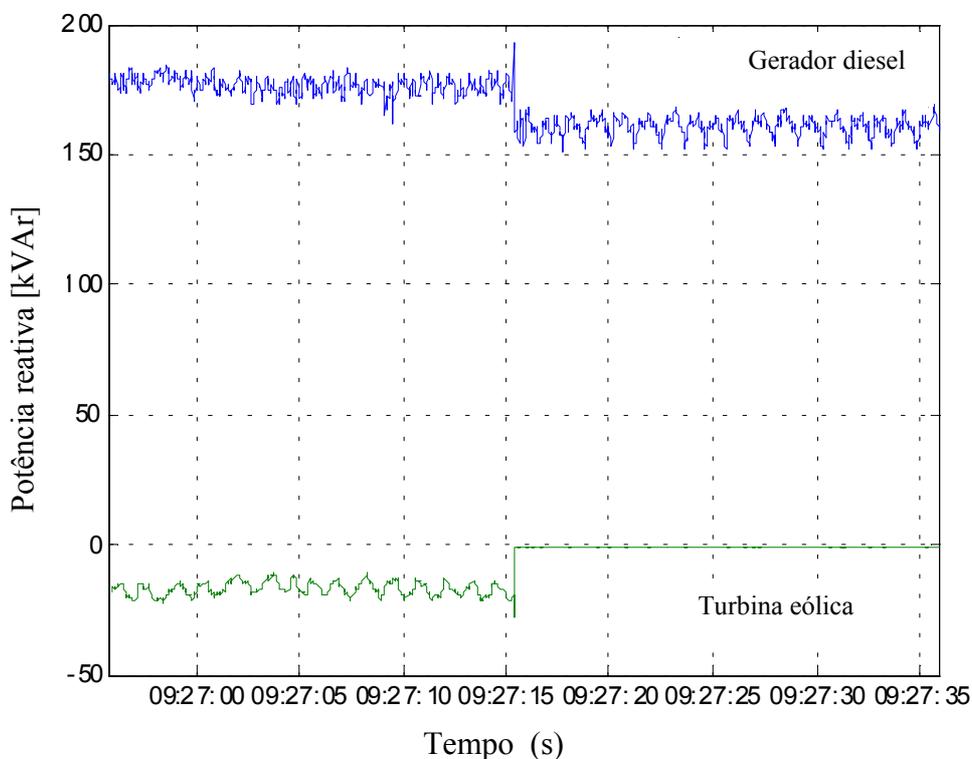


Figura 8.5 - Valores amostrais instantâneos de potência reativa em um intervalo de 40 s para o sistema termelétrico e a turbina eólica de 225 kW – desconexão da turbina (emergência).

### 8.2.3 Gráfico de Tensão

A figura 8.6 apresenta o comportamento das amostras de tensão eficaz obtidas simultaneamente no barramento da termelétrica e no ponto de conexão da turbina eólica de 225 kW, ambos em baixa tensão. No intervalo de 9:27:00 às 9:27:15, a turbina está fornecendo potência ao sistema com a operação conjunta da termelétrica resultando em menor nível de tensão fornecida ao sistema elétrico, ocasionando um menor nível de perdas à esse sistema, conforme é apresentado na Eq 7.1

$$P = V^2/Z \quad (7.1)$$

P – perdas no sistema elétrico;  
 V – tensão nos pontos de medição;  
 Z - impedância equivalente do sistema elétrico.

No intervalo de 9:27:15 às 9:27:18 é observado um transitório nos valores amostrais do sistema elétrico proporcionado pela desconexão da turbina da rede elétrica. A partir do instante de 9:27:19 os valores médios das amostras de tensão voltam a aumentar e se estabelecer no nível proporcionado apenas pela termelétrica. Também se observa uma mudança na estabilidade dos valores amostrais de tensão eficaz. O valor médio, enquanto a turbina está em operação parece permanecer por mais tempo nos valores mais altos de aproximadamente 277 V, “visitando” com menor frequência valores mais baixos próximos de 267 V. Após a desconexão demonstra oscilar com alguma periodicidade em cerca de 1 s entre os valores mais altos, perto dos 279 V, e dos mais baixos, 268 V, sem uma tendência definida no intervalo final de observação.

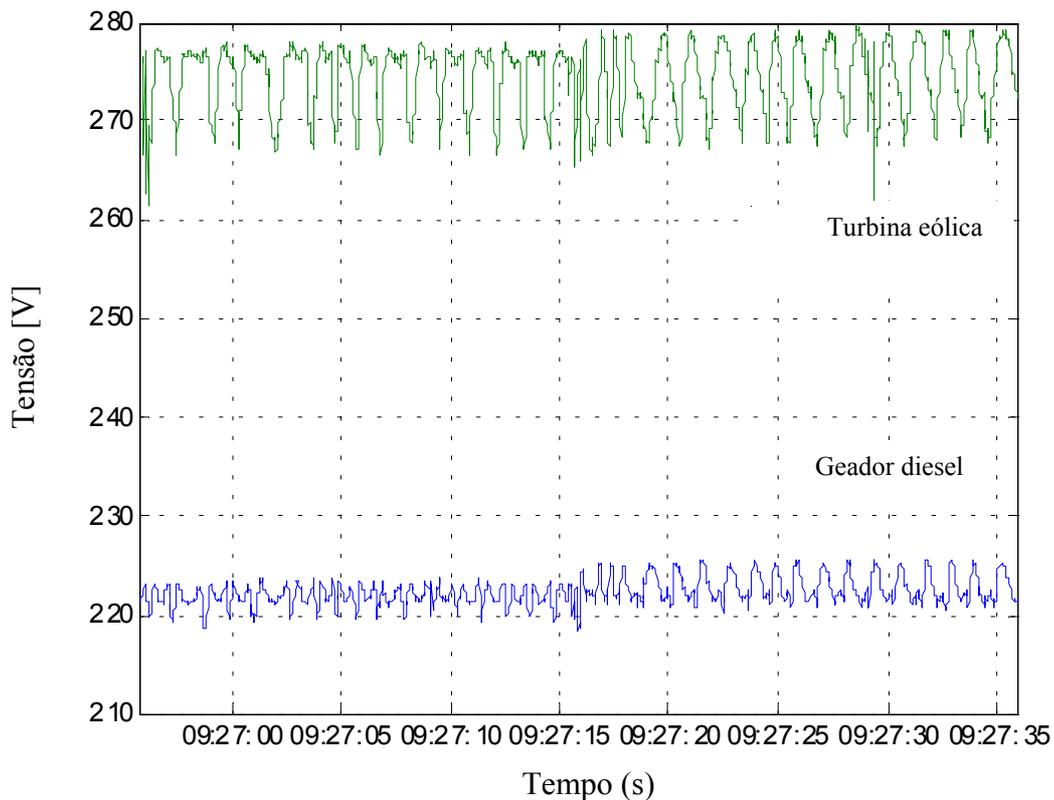


Figura 8.6 - Valores amostrais instantâneos de tensão em um intervalo de 40 s para o sistema termelétrico e a turbina eólica de 225 kW – desconexão da turbina (emergência).

### 8.2.4 Gráfico de Frequência

O gráfico dos valores médios amostrais de frequência em função do tempo (figura 8.7) apresenta os intervalos de operação da turbina de 9:27:00 às 9:27:15 e de sua desconexão do sistema, como também os valores amostrais de frequência do sistema de geração diesel. Observa-se no intervalo de 9:27:15 às 9:27:18 uma suave queda dos valores médios das amostras de frequência (0,5 Hz) seguida de um transitório devido ao desligamento da turbina eólica do sistema elétrico. Enquanto que o sistema tende a suprir a carga, no intervalo de 9:27:15 às 9:27:17. A partir desse instante o sistema volta ao estado de regime permanente.

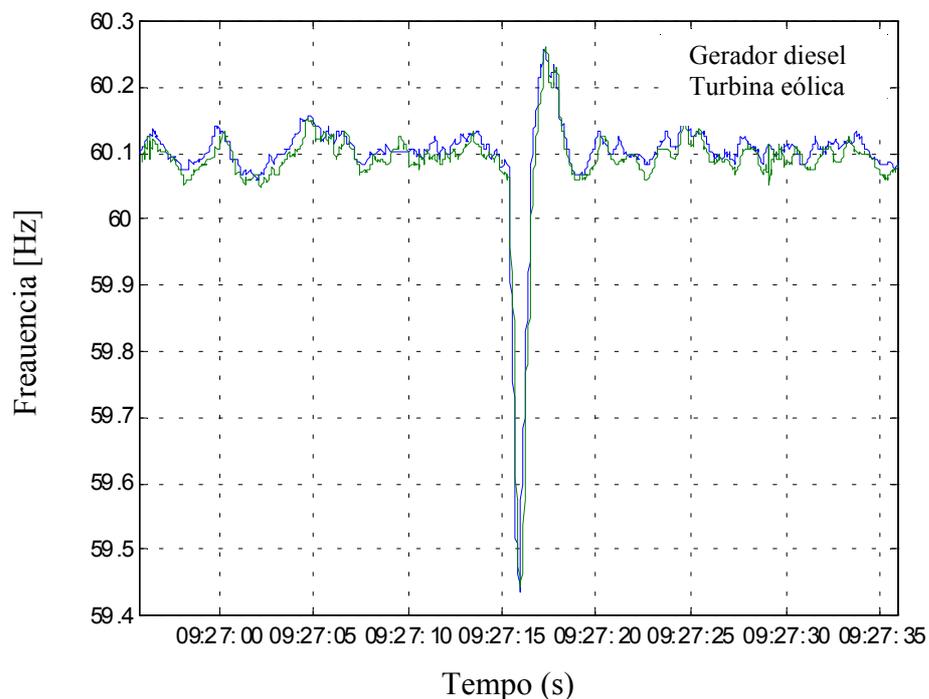


Figura 8.7 - Valores amostrais instantâneos de frequência em um intervalo de 40 s para o sistema termelétrico e a turbina eólica de 225 kW – desconexão da turbina (emergência).

## 8.3 Conexão da Turbina Eólica de 225 kW à Rede Elétrica

### 8.3.1 Gráfico de Potência Ativa

A figura 8.8 apresenta o gráfico da variação de potência ativa produzida pela usina termelétrica e pela turbina eólica de 225 kW em função do tempo, utilizando um mesmo intervalo de tempo de medição de 40 segundos. Observa-se que entre os intervalos de 9:30:20 à 9:30:38 a turbina está desligada. Nos intervalos de 9:30:20 às 9:30:27 e 9:30:28 às 9:30:36, os valores médios amostrais de potência fornecida pela usina demonstra pequenas oscilações devido à variação da carga atendida. Percebe-se que no intervalo de 9:30:27 à 9:30:28, entra e em seguida sai do sistema uma carga que absorve uma potência aparente,  $S$ , cerca de 40 kW + j15,81 kVAr, considerando o fator de potência,  $\cos\theta = 0,93$ , aproximadamente. Esta carga

entrou e saiu do sistema em apenas um segundo, mas foi suficiente para provocar uma alteração nos valores amostrais da potência produzida pela usina. No intervalo de 9:30:35 às 9:30:40 encontra-se uma flutuação nos valores amostrais, devido à entrada da carga dessa turbina eólica no sistema de geração termelétrico, fazendo com que a potência gerada permanecesse no valor aproximado de 530 kW. A entrada da turbina eólica em operação, a partir de 9:30:39, injetando potência na rede elétrica como mostra a progressão da forma da onda de potência, alcança o nível de 150 kW às 9:30:46. Enquanto que, para o mesmo intervalo, há um alívio sobre a geração da usina, indicado pela queda dos valores amostrais de potência fornecida pela usina. Essa inclinação produzida pela turbina indica que o sistema de controle de *pitch* está regulando o ângulo de passo da pá com o objetivo de tornar suave o aumento da potência que a turbina injeta na rede elétrica. Após alcançar o nível de 150 kW, o sistema de controle de *pitch* fica responsável por limitar a produção de potência da turbina próximo à esse valor. Devido às variações do vento, às 9:30:49 há uma diminuição da potência fornecida pela turbina e um aumento proporcional da potência suprida pela usina, que é percebido até às 9:31:00. A penetração eólica alcançou cerca de 30%, no intervalo de 9:30:45 às 9:30:48.

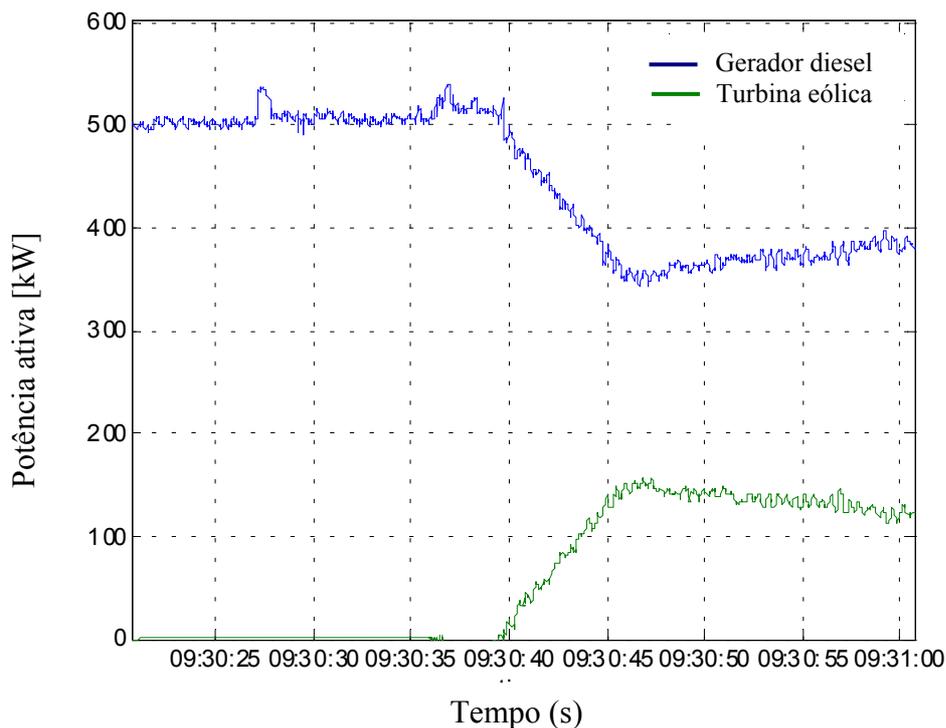


Figura 8.8 - Valores amostrais instantâneos de potência ativa em um intervalo de 40 s referente ao sistema termelétrico e à turbina eólica de 225 kW – conexão da turbina.

### 8.3.2 Gráfico de Potência Reativa

A figura 8.9 apresenta a variação da potência reativa produzida pela usina termelétrica e consumida pela turbina eólica de 225 kW em função do tempo. É importante mencionar que no intervalo de 9:30:20 às 9:30:35 houve uma perturbação proporcionada pela entrada e saída

de uma carga no sistema, causando alteração nos valores médios amostrais de potência do sistema de geração da usina termelétrica, cuja duração está exposta no intervalo de 9:30:27 às 9:30:28. No intervalo de 9:30:20 às 9:30:35, verifica-se o sistema em estado de regime permanente para o nível de 150 kVAr fornecidos à rede elétrica a partir da usina e 0 kVAr consumido pela turbina eólica de 225 kW, devido não estar em operação. Às 9:30:35 a turbina eólica é conectada à rede elétrica. Verifica-se o aumento dos valores amostrais de potência reativa consumida pela turbina, no intervalo de 9:30:35 às 9:30:37, causada pelo efeito de magnetização do gerador assíncrono. O limite imposto ao consumo de reativo (-230 kVAr) da turbina é definido pelo dispositivo de partida suave (*soft-start*) da turbina, formado pelo banco de tiristores, utilizado para controlar o pico de corrente de magnetização que atingiria sem o dispositivo, até 8 vezes a corrente nominal do gerador na sua partida. A potência reativa fornecida pela usina, neste mesmo intervalo, sofre um aumento, o que significa estar atendendo a solicitação de potência reativa requerida pela turbina. O banco de tiristores é responsável por uma parte do consumo dessa potência reativa. Por isso, os valores amostrais de potência retornam ao nível de -98 kVAr, no intervalo de 9:30:37 às 9:30:38 e permanecem nesse patamar durante o intervalo de 9:30:38 às 8:30:40 até o desligamento dos tiristores, instante no qual deve ser ligado um contactor *by-pass*, atingindo instantaneamente, o nível de -30kVAr. Esse procedimento é para que os tiristores não estejam em operação no mesmo tempo que o banco de capacitores deve atuar, para evitar o risco de danificar os capacitores. Com o banco de capacitores em operação, a turbina passa a consumir uma menor quantidade da potência reativa (-10 à -20 kVAr) requerida a partir usina, como pode ser verificado no intervalo de 9:30:41 às 9:31:00.

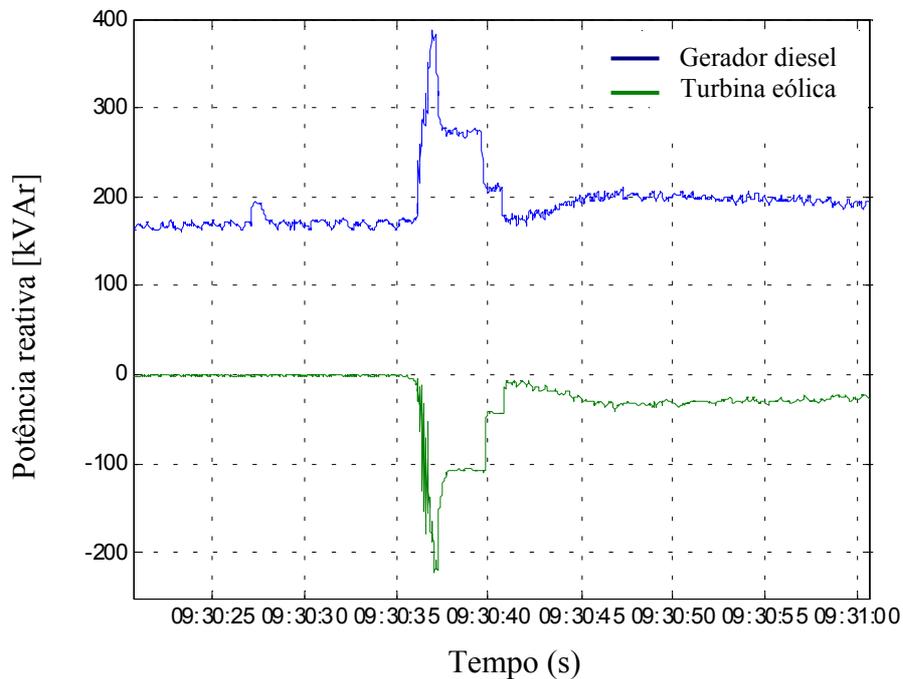


Figura 8.9 - Valores amostrais instantâneos de potência reativa em um intervalo de 40 s referente ao sistema termelétrico e à turbina eólica de 225 kW – conexão da turbina.

### 8.3.3 Gráfico de Tensão

A figura 8.10 refere-se aos resultados obtidos sobre as medições dos valores médios amostrais de tensão, no local de geração da usina e no ponto de conexão da turbina eólica de 225 kW à rede, ambos no lado de baixa tensão. para o intervalo de 9:30:20 à 9:30:35 e no

momento de partida da turbina. Percebe-se que a carga já mencionada nos gráficos das figuras 1 e 2 apresenta uma potência aparente, cerca de  $S = 44 \text{ kVA}$ . A saída repentina desta carga, no instante de 9:30:29, proporciona um pico de tensão produzido pela usina, que não ultrapassa a faixa de tensão preestabelecida entre 189 Volts e 233 Volts [047-ANEEL]. Da mesma forma a turbina eólica de 250 kVA (potência nominal aparente 5 vezes maior que a dessa carga) no intervalo de 9:30:35 à 9:30:41, está sendo realizada sua partida e conectando-se à rede do sistema termelétrico. Verifica-se dessa forma que a turbina não causa perturbações na qualidade de energia gerada pela usina. Comparando o intervalo de 9:30:20 às 9:30:36 com o intervalo de 9:30:41 às 9:31:00 observa-se que a turbina eólica proporciona uma melhora do nível de tensão ao sistema de geração termelétrico.

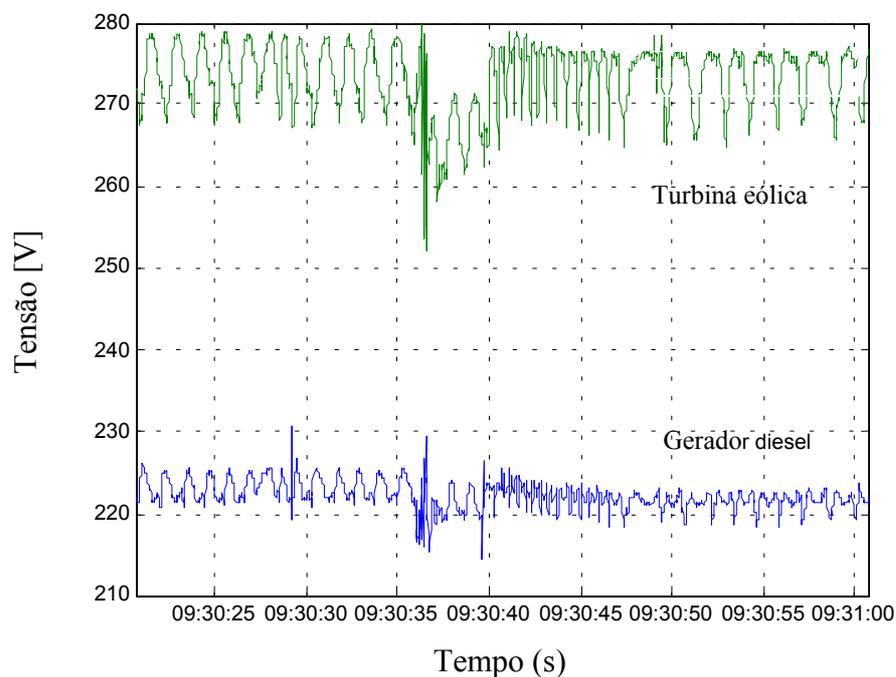


Figura 8.10 - Valores amostrais instantâneos de tensão em um intervalo de 40 s referente ao sistema termelétrico e à turbina eólica de 225 kW – conexão da turbina.

#### 8.3.4 Gráfico de Frequência

Observa-se na figura 8.11 o gráfico de frequência em função do tempo que apresenta os valores médios das mostras de frequência do sistema de geração termelétrico e da turbina eólica de 225 kW. No intervalo de 9:30:25 às 9:30:33 uma suave queda de tensão é proporcionada, devido à entrada de uma carga ao sistema elétrico da Ilha, com o sistema tendendo a fornecer maior potência para retornar ao seu equilíbrio de operação. Verifica-se que o sistema retorna a situação de regime, no intervalo de 9:30:30 às 9:30:35. Porém, com a conexão da turbina, no intervalo de 9:30:35 às 9:30:39, a solicitação de reativo pela turbina indica o seu comportamento como uma carga, vista pelo sistema de geração termelétrico que atende a necessidade da turbina provocando uma queda nos valores amostrais de frequência.

No intervalo de 9:30:40 às 9:30:50 observa-se um efeito transitório com o sistema voltando ao equilíbrio passando a se estabilizar a partir deste instante.

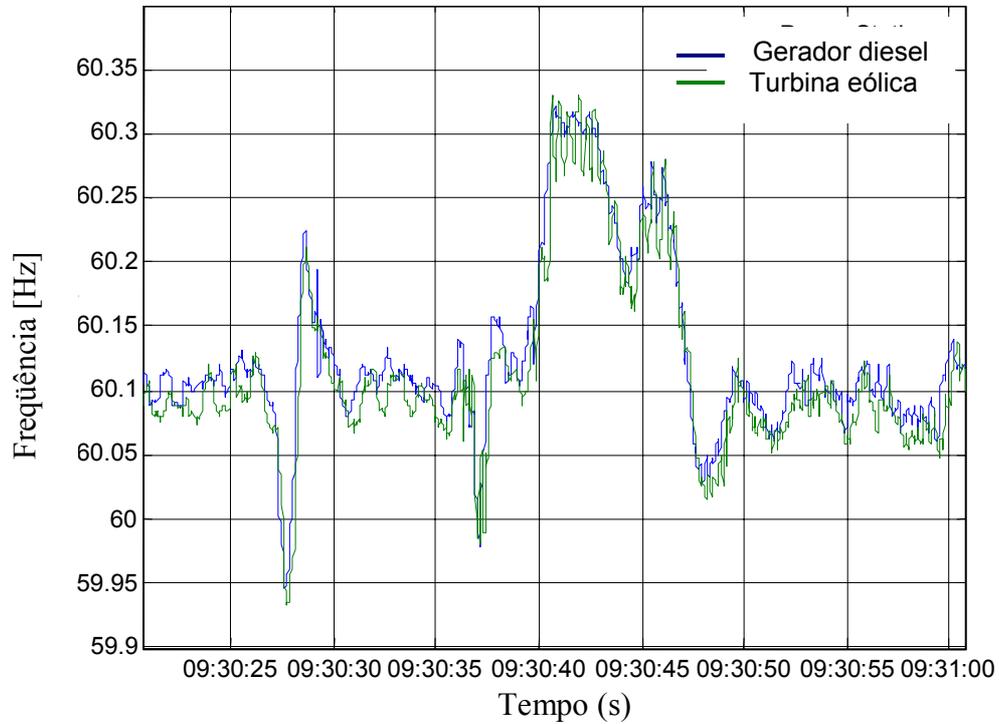


Figura 8.11 - Gráfico da Frequência em função do tempo referente ao sistema termelétrico e à turbina eólica de 225 kW – conexão da turbina.

## 9. CONCLUSÃO

Este trabalho de dissertação enfatiza todas as etapas necessárias à especificação e implantação de turbinas eólicas em sistemas isolados, em função do pioneirismo e das repercussões da implantação da turbina eólica de 225 kW, na Ilha de Fernando de Noronha.

Verificou-se que o incentivo propiciado pelo Governo brasileiro, estendendo os benefícios da aplicação da Lei das Contas de Consumo de Combustíveis aos Produtores Independentes de Energia Elétrica, que utilizem fontes renováveis de energia, não são suficientes. Deve ser estabelecida maior clareza no processo entre quem compra e quem vende a energia produzida.

A arquitetura do sistema híbrido da Ilha, caracterizada por utilizar vários geradores diesel, foi mantida após a implantação da turbina eólica de 225 kW, não sendo necessário a inclusão de qualquer tipo diferente de estratégia.

Com a implantação da turbina de 225 kW, no mês de maio de 2000, foi elevada a penetração eólica na Ilha. O sistema híbrido em operação na Ilha de Fernando de Noronha, tornou-se com a inclusão dessa turbina o maior sistema híbrido eólico/diesel da América Latina.

No período de testes de maio à julho de 2000 (configuração 1), as análises experimentais realizadas sobre os dados coletados, a partir do sistema de aquisição de dados, que faz parte do sistema de controle das turbinas de 225 kW, forneceram as informações sobre o modo de operação da turbina de 225 kW e do comportamento do sistema de distribuição da Ilha. As análises sobre os dados da produção de energia ativa e do consumo de energia reativa, referentes à turbina de 225 kW, demonstraram que estiveram de acordo com as especificações técnicas internacionais – IEA. A produção e o consumo de energia observados diariamente apresentaram a perfeita operação da turbina de 225 kW no sistema híbrido eólico/diesel da Ilha, durante o período de testes. Neste mesmo período, foi verificado que o tempo de disponibilidade da turbina eólica esteve próximo à totalidade das horas em que a rede elétrica esteve em condições de receber energia, a partir da turbina de 225 kW. A produção de eletricidade das turbinas eólicas de 75 kW e de 225 kW proporcionou uma economia de 35.000 litros de óleo diesel. O que significa uma economia de R\$ 40.600, apenas nos meses de testes. Isso demonstra o quanto o Governo pode reduzir o subsídio oferecido às termelétricas à óleo diesel.

Para realização das análises experimentais efetuadas para a configuração 2, no mês de junho de 2001, foi realizada uma alteração na capacidade de geração da turbina de 225 kW, onde a potência máxima foi regulada para estar próxima aos 150 kW. A regulação da potência foi realizada através do sistema de controle do ângulo de passo das pás (sistema de *pitch*). Foi utilizado um sistema de aquisição de dados especial e estabelecida a colaboração técnica entre o Laboratório Risø da Dinamarca e o CBEE, na apresentação dos resultados sobre a influência da turbina de 225 kW ao sistema de geração termelétrica.

Conforme as normas estabelecidas pelo *International Energy Agency –IEA*, as análises sobre o comportamento do sistema de geração, no momento de conexão e de desconexão da turbina ao sistema de distribuição, não apresentaram qualquer distúrbio que viessem a prejudicar o fornecimento de energia à Ilha, assim como de não demonstrarem a possibilidade de causar transtornos aos consumidores, tais como danos aos equipamentos e aparelhos domésticos.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRÁS. *Sistemas Isolados – Usinas Termelétricas à Diesel*, 2000.
- [2] CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA – CBEE, RECIFE. 1992.
- [3] CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA – CBEE, RECIFE. 2001.
- [4] CIPOLI, J. A. *Engenharia de Distribuição*, Qualitymark, Rio de Janeiro, 1993. 319p.
- [5] Companhia Energética de Pernambuco – CELPE
- [6] COSTA, A. C. A. e FEITOSA, E. A. N. *Sistema Híbrido Eólico-Solar-Bateria para geração de eletricidade no Nordeste do Brasil*, Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, XVII Conferência Latino Americana de Eletricidade Rural, Recife.
- [7] ELGERD, O. I. *Introdução à Teoria dos Sistemas de Energia Elétrica*, Mcgraw Hill do Brasil, 1978. 604p.
- [8] ESTANQUEIRO, A. I. L. *Modulação Dinâmica de Parques Eólicos*. Lisboa, Portugal, 1997, 265p. (Dissertação para grau de Doutorado em Engenharia Mecânica )
- [9] FEITOSA, E., Pereira, A. e Rohatgi, J. *Projeto e Operação da Primeira Turbina Eólica de Grande Porte do Brasil/Ilha de Fernando de Noronha*, VI Congresso Brasileiro de Energia, 1993.
- [10] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY C. JR., KUSKO A. *Máquinas Elétricas*, Mcgraw Hill do Brasil, 1975. 618p.
- [11] FRERIS, L.L. (EDITED BY). *Wind Energy Conversion Systems*, Prentice Hall International, UK, 1990.
- [12] HANSEN, J. C. et al (1999). Keys to Success for Wind Power in Isolated Power Systems. European Wind Energy Conference, Nice, France, p. 943-947.
- [13] HEIER, S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Jhon Wiley & Sons, Chichester, England. 381p.
- [14] HUNTER, R and ELLIOT, G. (edited by). *WIND-DIESEL SYSTEMS – A guide to the technology and its implementation*. Cambridge University Press, Uk, 1994. 245p.
- [15] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA – "*Expert Committee*", 1984.23p.
- [16] KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*, 12<sup>a</sup>. Editora Globo, São Paulo, 1996. 624p.
- [17] LEON HEIMER INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 2001.

- [18] LYSSEN, E. H. Introduction to Wind Energy Consultance Service Wind Energy developing Countries (CWD), Netherlands, 1983. 580p.
- [19] LUNDSAGER, P. *WDILOG – A Logistic Wind-Diesel Simulation Model Description and Users Guide*, Risø-M-2822, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1991. p.193.
- [20] MELLO, J. C. P. *Distribuição de Energia Elétrica*, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1978. 96p.
- [21] PEDRO, A . C. R. *Conexão de Turbinas Eólicas à Rede Elétrica – Análise de Operação Normal e Transiente*, Recife, 1999. 74p (Defesa para Grau de Mestre em Engenharia Mecânica- Depto. Eng. Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco).
- [22] PEREIRA, A. L. *Modular Supervisory Controller for Hybrid Power Systems*. Roskilde, Denmark, 2000, 213p. (PhD - Risø National Laboratory)
- [23] PEREIRA, J. C.. *MOTORES E GERADORES - Princípios para o Dimensionamento, Instalação, Operação e Manutenção dos Grupos Diesel-Geradores*. Apostila. 73p.
- [24] SEPÚLVEDA, H. L. *Máquinas Elétricas - Máquinas Síncronas*, Universidade de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 1967. Capítulo II, 243p.
- [25] SPERA, D. A. *Wind Turbine Technology Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, ASME PRESS, New York, 1994. 627p.
- [26] WALKER J. F. JENKINS N. *Wind Energy Technology*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1997. 159p.
- [27] *Wind/Diesel Systems Architecture Guidebook – AWEA STANDARD*, 1991. 24p.

## ANEXO 1

### **Implantação de Turbina Eólica à Sistemas Híbridos Eólico/Diesel em Sistema Isolados.**

#### 1. Logística

A partir de maio de 1999, foi dado início ao levantamento logístico que proporcionou a instalação da turbina eólica de 225 kW na Ilha de Fernando de Noronha. Foram identificadas as condições disponíveis de infra-estrutura oferecida pelo local e coletas de dados realizadas na ilha, tais como:

- o acesso ao tráfego dos componentes da turbina eólica até o local de instalação;
- os dados pertinentes ao solo e a área do terreno destinado às obras civis de fundação;
- a viabilidade do porto da ilha, indicado para a desembarque dos equipamentos;
- o planejamento da utilização e do posicionamento adequado dos recursos disponíveis, como por exemplo, mão-de-obra, guindaste e veículos de apoio à montagem da turbina eólica.

#### 3. Transporte da Turbina Eólica para Fernando de Noronha

Concluído o processo de desembaraço do material importado e após a permissão da fiscalização da alfândega, concedendo a sua retirada do Porto de Suape, onde estava armazenado, iniciou-se o deslocamento da carga até os locais de embarque com destino à Fernando de Noronha. Um ponto de embarque foi o porto de Natal, utilizado para embarcar um guindaste de 50 toneladas, utilizado no içamento da turbina eólica, uma torre tubular, e outras cargas, devido ao porto do Recife não operar com carga acima de 25 toneladas. Outro destino foi o pátio do Correio Aéreo Nacional (CAN) para o embarque da nacelle, dos equipamentos de controle, das pás e do material a ser utilizado na fundação.

Para transportar uma turbina eólica composta por uma torre tubular de 31 metros de altura, pesando 14 toneladas, uma nacelle de 10 toneladas, três pás de 14 metros de comprimento e 800 kg cada, entre outros equipamentos e materiais de porte elevado senão em tamanho, mas em peso, foram investigados meios de transporte, capazes de realizar tal tarefa. Uma busca meticulosa indicou o meio de transporte adequado para cada item a ser transportado. O intuito era conseguir o maior nível de segurança durante o transporte para a garantia da entrega, dentro do prazo estabelecido. Uma análise precisa uniu as condições de entrega, em relação ao tempo disponível para a instalação. Todos os esforços objetivaram minimizar os custos adicionais.

Os transportes escolhidos para a realização das tarefas foram os seguintes:

##### a) Marítimo

A embarcação adequada para suprir o transporte de equipamentos de içamento e cargas para a montagem de turbina eólica foi a do tipo Embarcação de Desembarque de Veículos Motorizados (EDVM), apresentada na figura 1. Ela foi escolhida devido à falta de infra-estrutura do porto de Fernando de Noronha, havendo a necessidade de realizar o seu desembarque na praia. A qual foi utilizada no transporte da torre da turbina eólica, o transformador e um guindaste com 42 toneladas, 20 m de comprimento, 5 metros de largura e os demais equipamentos,

O estudo da maré foi de fundamental importância devido às características especiais da carga e do procedimento de risco a que ficaria submetida a embarcação, durante a operação no porto. As pedras expostas devido ao assoreamento da praia, na região de desembarque, diminuíram o tempo de operação de descarga/carga para aproximadamente três horas por maré cheia. Após a constatação de que os meses de novembro e dezembro de 1999, janeiro e fevereiro de 2000 estariam favoráveis para a operação de desembarque, foi permitido o desembarque na praia a cada 15 dias. Neste período, o vento de proa é predominante durante todo o trajeto do Recife a Fernando de Noronha, o que aumenta o grau de dificuldade e de risco à operação desse tipo de transporte.

As características obtidas nos estudos de viabilidade para a utilização dessa embarcação que definiram a sua escolha, foram:

Fundo chato: para desembarque do guindaste em terreno de praia;

- Capacidade útil: 72 toneladas;
- Comprimento: 15 m ( mais 5 m na tomada da rampa).



Figura 1 - Embarcação de Desembarque de Veículos Motorizados Fernando de Noronha: 1. Capacidade de 72 toneladas; 2. Comprimento de 15 m.

#### b) Aéreo

Algumas visitas técnicas foram realizadas para verificação das condições, com relação ao comprimento e largura (1845 m x 45 m) da pista do aeroporto, para que fosse incluída no planejamento logístico. O amplo pátio de manobras serviu para descarga dos equipamentos/cargas, com poucos obstáculos, os quais foram facilmente transpostos.

A Força Aérea Brasileira (FAB) realiza transporte periódico de abastecimento de cargas, tais como, combustível (óleo diesel), para geração de eletricidade, veículos e passageiros, além de suprimentos ao destacamento militar e aos moradores da ilha, utilizando a aeronave C-130H (o avião cargueiro Hércules), figura 2.

Foi dado o parecer favorável pelo Ministério da Aeronáutica (MAer), após a análise de viabilidade técnica, ou seja, quantidade de combustível para o trajeto relacionado ao peso e ao volume das cargas, para realização do transporte das peças e equipamentos que compunham a turbina eólica, assim como, as peças e materiais a serem utilizadas na obra de fundação



Figura 2 - Avião cargueiro C130H – Hércules .  
Força Aérea Brasileira - FAB.

### c) Transporte Terrestre

A verificação do percurso entre o aeroporto e a área de instalação da turbina eólica foi um dos itens importantes para a operação de instalação dessa turbina . O transporte das peças e dos materiais foi realizado em uma distância de 7 km, na Rodovia BR-363, a partir do aeroporto até o local da montagem. Os obstáculos identificados durante o percurso foram os seguintes:

- curvas acentuadas;
- galhos de árvores;
- fiação elétrica;
- fiação telefônica.

O serviço recebeu a colaboração do IBAMA, que providenciou a poda dos galhos de árvore sem que isso pudesse prejudicar o meio ambiente, devido à ilha ser uma área de preservação ambiental, amparada pelo Governo Federal. A Companhia Energética de Pernambuco realizou o desligamento, a remoção e a recomposição de alguns trechos da rede ao longo da rodovia e em alguns percursos de necessidade. A empresa de telecomunicações TELEMAR contribuiu com a remoção e a composição da fiação telefônica. Neste serviço foi necessário o deslocamento de funcionários do continente. Os demais veículos e materiais utilizados na operação, partiram do apoio da Secretaria de Administração de Fernando de Noronha e das empresas estabelecidas na ilha (figura 3).



Figura 3. Transporte terrestre utilizado para o deslocamento dos equipamentos na ilha.

#### 4. Construção Civil

A obra civil foi realizada através das empresas particulares do ramo da construção civil, que ficaram responsáveis pelos serviços de cálculos, escavação e terraplanagem. A turbina eólica foi instalada sobre dunas de areia (figura 4).



Figura 4. Serviço de escavação e terraplanagem sobre dunas de areia.

A análise do solo, de formação vulcânica sob as dunas de areia, realizada no laboratório de solos da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, revelou a característica de um solo colapsível. O conhecimento desse fato exigiu uma correção rigorosa do solo, para toda a área de 225 m<sup>2</sup> e profundidade de 3m, que estaria sujeita à influência dos efeitos causados pelos esforços exercidos pela turbina eólica. Para efetuar essa correção foram tomados os seguintes procedimentos:

- compactação do solo, 20cm de altura ;
- construção de uma laje de 15 cm de altura;
- formação de uma camada de 45 de solo cimento.

A confecção de formas para as lajes de concreto, armação de ferragens e contratação de mão-de-obra é apresentada na figura 5.



Figura 5. Colocação da malha da laje de 15 cm, sobre o solo compactado.

Sobre a laje de 15 centímetros de altura foi construída uma sapata de concreto (figura 6) de 7x7 metros de base e 1,30 metro de altura, pesando 160 toneladas. A sapata comporta um cilindro de aço com dimensões de 2 metros de altura, 1 ½" polegada de espessura e 2,40 metros de diâmetro, oferecendo extrema praticidade e maior segurança à montagem. Esse cilindro está incluído na estrutura de sustentação da base da turbina eólica para suportar os esforços causados pela turbina, via fixação por parafusos. Toda a sapata foi envolvida por solo cimento, compactado em camadas de 30 centímetros, traço - 1:20, de volume total de 587m<sup>3</sup>.



Figura 6. Concretagem da sapata com o suporte cilíndrico de aço da base da turbina.

Para a realização do projeto e da execução da obra da fundação após o conhecimento das análises do solo, feitas às devidas correções, para oferecer a estabilidade necessária à instalação da turbina, foram tomados os seguintes procedimentos:

- utilizou-se uma folha de cálculo relacionada a fundação, fornecida pelo fabricante da turbina eólica, repassada aos engenheiros calculistas;
- durante a concretagem foram coletadas as amostras para formarem os corpos de prova, para os testes que definiriam o tempo de cura do concreto e permitiram a montagem da turbina;
- a área destinada à implantação do canteiro de obras foi demarcada para preservar a segurança dos turistas e dos ilhéus.

Para tornar o serviço ágil e funcional foram instalados containers para oferecer apoio de funções, tais como:

- laboratório e escritório da obra;
- instalações elétricas e hidráulicas;
- linha telefônica.

## 5. Instalações Elétricas

A energia é gerada em baixa tensão (480V), pela turbina, que através de um transformador elevador de tensão 480V/13.800V – 400kVA (figura 7a), é conectada à rede elétrica. O transformador utilizado é do tipo ecológico em pedestal, com o objetivo de não causar impacto ao meio ambiente. As instalações elétricas (figura 7b) seguiram as especificações dos materiais e determinações de projeto requeridos pelo fabricante da turbina eólica V27-225kW, de acordo com as Normas Técnicas Brasileiras.

No quadro de proteção consta um disjuntor, que tem a função de desconectar a turbina eólica da rede, caso haja a ocorrência de falha do sistema de geração da ilha. A medição da energia gerada pela turbina eólica é realizada tanto pelo próprio sistema de medição da turbina, quanto pelos instrumentos instalados pela CELPE.



(a)



(b)

Figura 7 - (a) Transformador elevador de tensão 0,48/13,8 kV - tipo ecológico; (b) Instalação elétrica realizada sob fiscalização do CBEE, conforme as Normas Técnicas Brasileiras.