



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS (GPT)**

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA UM SISTEMA DE GERAÇÃO ELÉTRICO HÍBRIDO COM GERAÇÃO EÓLICA,  
DIESEL, CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

Márcia da Rocha Ramos  
Ana Paula C. Guimarães  
Lauro Barde Bezerra  
Hamilton Moss de Souza

Gabriel Landa Noronha  
Leonardo Dalcin Silva

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso  
Suckow da Fonseca – CEFET/RJ

**RESUMO**

Neste trabalho estão contidos estudos e análises sobre a viabilidade técnica e econômica de um sistema híbrido de geração de energia elétrica composto pelas fontes eólica, diesel e da rede da concessionária, para alimentação de um grande consumidor com exigências elevadas de confiabilidade para o seu suprimento de energia. O objetivo principal do estudo é contribuir para a diversificação da matriz energética, mostrando o potencial significativo do recurso eólico como parte de um sistema híbrido, em termos econômicos, quando comparado ao fornecimento de energia elétrica através exclusivamente da rede nos horários de ponta e fora de ponta da carga.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistema híbrido, Energia eólica, Grupo gerador diesel

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Tendo em vista o potencial eólico do país e a necessidade de diversificação da matriz energética, torna-se importante o desenvolvimento de estudos para implantação de sistemas de geração de energia elétrica utilizando aerogeradores. É importante ressaltar que o recurso eólico, assim como qualquer fonte intermitente de energia, apresenta limitações quanto à sua disponibilidade, e, portanto, a aplicação de um sistema híbrido utilizando diversas formas de geração de energia elétrica possibilita a complementaridade dos recursos energéticos locais.

Neste trabalho está apresentado um estudo de viabilidade técnica e econômica de um sistema de geração híbrido, composto pelas fontes eólica, diesel e da rede da concessionária, alimentando um grande consumidor com exigências elevadas de confiabilidade para o seu suprimento de energia. Para tanto, fazem parte da metodologia aplicada, a análise do recurso de vento na região, o levantamento da curva de carga típica do consumidor, o dimensionamento do sistema de geração (aerogerador e gerador Diesel) e, finalmente, os cálculos dos custos e análises econômicas do investimento.

O gerador Diesel é programado para a operação no horário de ponta, quando os ventos não são suficientes para a geração e o adequado suprimento da carga. Este critério de programação permite uma economia significativa nas despesas com energia elétrica, devido ao valor da tarifa praticado pela concessionária neste horário. Tal critério de operação do sistema privilegia o recurso eólico, sempre que possível, em virtude do custo zero do “combustível”. Desta forma, este trabalho apresenta uma alternativa com potencial significativo para beneficiar tanto o consumidor, com características especiais de carga, como a concessionária de energia nas áreas onde estão disponíveis boas condições de vento.

## 2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema proposto é constituído por um gerador eólico, principal fonte de energia do consumidor, interligado à rede elétrica da concessionária, além de um dispositivo UPS (*Uninterruptable Power System*) necessário para garantir a estabilidade do fornecimento elétrico durante a troca da fonte alimentadora. Está incluído, também, um conjunto gerador diesel, para operações de emergência - baixa velocidade de vento e falta de energia na rede - e para operação no horário de ponta.

Em qualquer horário a principal fonte de energia será o gerador eólico, durante o horário de ponta a fonte secundária será o gerador diesel, devido ao preço elevado da tarifa de eletricidade nesse período, e no horário fora de ponta esta fonte secundária será a rede elétrica da concessionária. O controle do horário para comutação da chave estática será realizado utilizando um relé horário. A fonte de tensão para o fornecimento de energia elétrica do sistema será de 480 V. Na Figura 1 está apresentado o esquema básico do sistema proposto.

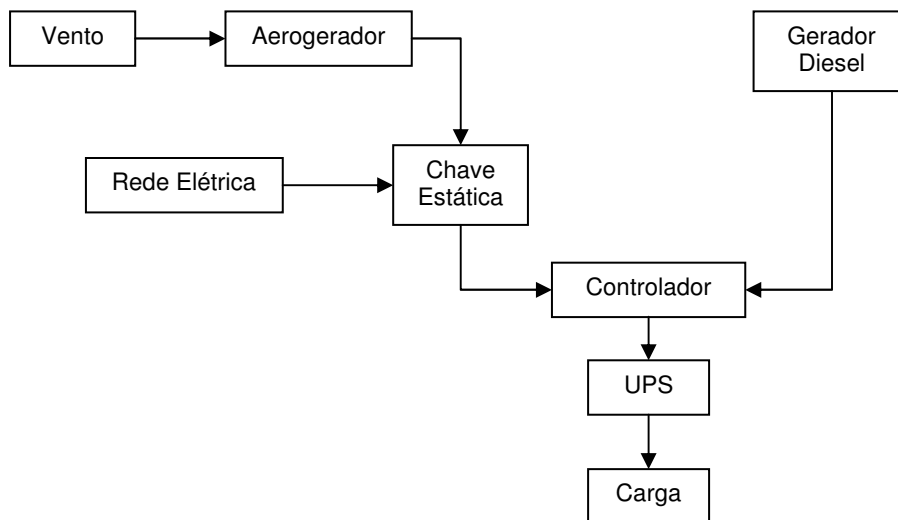


FIGURA 1 – Esquema básico do sistema de geração elétrica

## 3.0 - CARACTERÍSTICAS DO VENTO E DA CARGA

O consumidor apresenta uma carga instalada de aproximadamente 380 kW. Foram analisados, no decorrer de dois meses, os dados da demanda de energia elétrica local para a obtenção do dia típico da curva de carga. Na Tabela 1 estão apresentados os valores mensais da demanda e do consumo de energia elétrica local. Na Figura 2 está ilustrada a curva representativa do dia típico da demanda de energia elétrica.

TABELA 1 - Demanda e consumo mensais de energia elétrica

Ponta		Fora de Ponta	
Demanda (kW)	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Consumo (kWh)
345,5	32.916,0	335,9	91.477,6

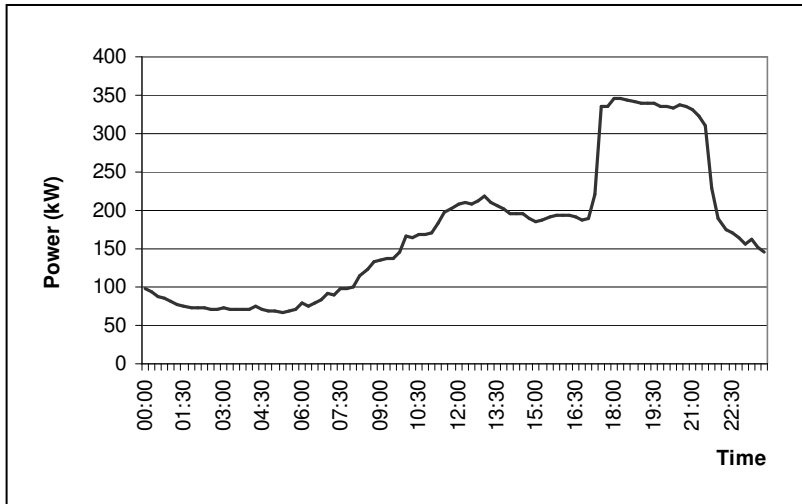


FIGURA 2 - Dia típico da curva de carga

Os dados de vento utilizados no desenvolvimento deste trabalho são referentes a uma série histórica consolidada do período de novembro de 2004 a outubro de 2005 de um local hipotético. A Figura 3 mostra o comportamento dos ventos ao longo do período em questão de acordo com o valor médio das velocidades mensais. Observa-se na Figura 3(a) que os maiores valores médios de velocidade ocorreram nos meses de fevereiro e agosto, enquanto que os valores mais baixos acontecerem nos meses de março e abril. A Figura 3(b) apresenta a curva do dia típico a qual foi obtida a partir dos valores médios horários de velocidade. Em todos os casos as velocidades médias horárias superaram 6 m/s atingindo o valor máximo de 7,2 m/s. O resultado mostra que as maiores intensidades horárias do vento concentram-se, em geral, durante o dia.

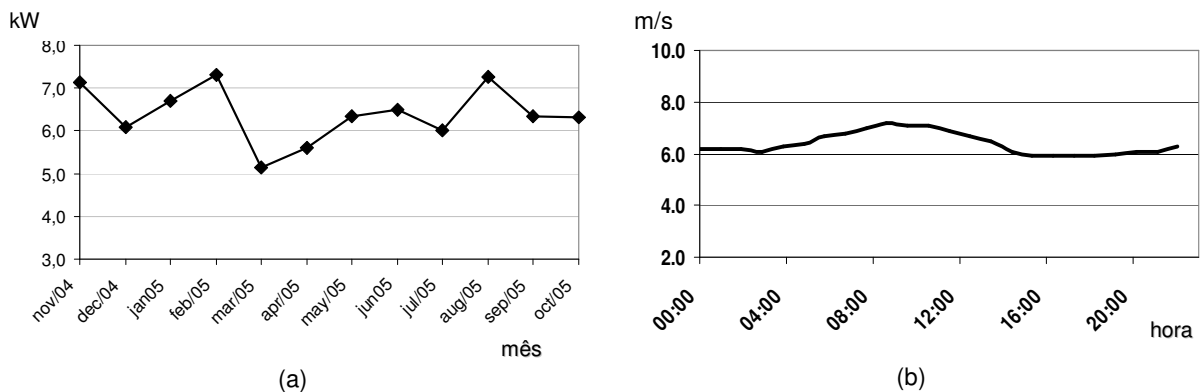


FIGURA 3 – (a) Valores médios mensais de velocidade de vento; (b) Curva característica do dia típico de velocidades do vento

Na Tabela 2 estão apresentados os valores da velocidade média e dos parâmetros da distribuição de Weibull correspondentes ao período analisado. O cálculo da densidade de potência efetuado pelo WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) utiliza o valor da densidade do ar nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

TABELA 2 – Parâmetros da distribuição de Weibull do período medido

Período	Velocidade Média (m/s)	c (m/s)	k	Dens. de Potência (W/m <sup>2</sup> )
Nov/04 a Out/05	6,5	7,2	3,17	228

Nas Figuras 4(a) e 4(b) são apresentados, respectivamente, o histograma de velocidades e a freqüência de distribuição da direção dos ventos (rosa dos ventos). A análise do período coletado permitiu verificar que a localidade apresentou ventos freqüentes em dois quadrantes bem definidos. Embora não apresentem intensidades altas, os ventos são praticamente constantes, o que indica que os ventos são promissores.

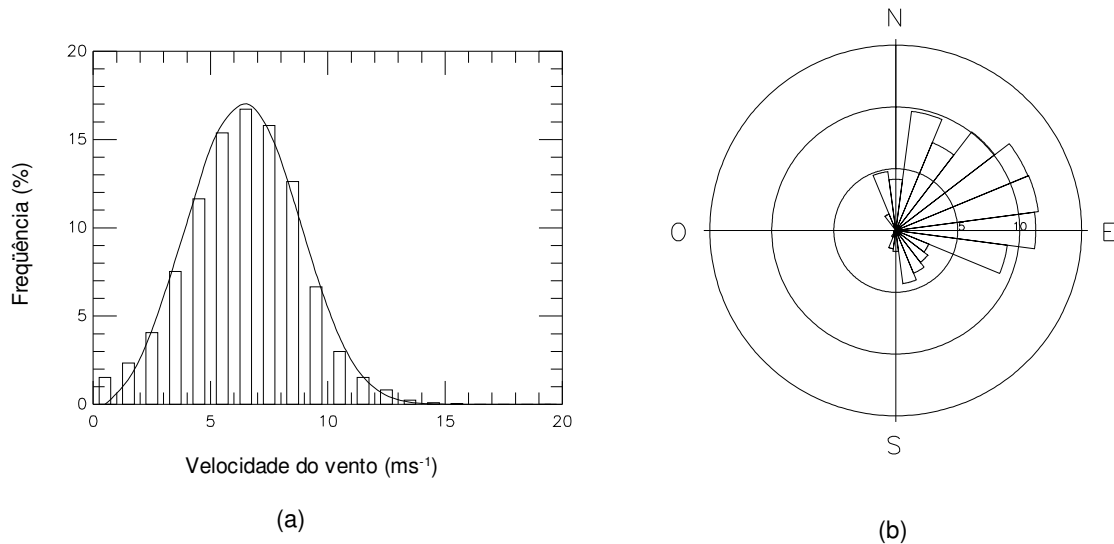


FIGURA 4 – (a) Histograma de velocidades; (b) Distribuição da direção do vento por setores de 15°.

#### 4.0 - MODELAGEM COMPUTACIONAL

Primeiramente, foi necessário definir o aerogerador que seria utilizado nas simulações. Para tanto, foi utilizado o programa Alwin. Trata-se de um *software* gratuito desenvolvido pelo DEWI (*German Wind Energy Institute DEWI*) para análise de dados de vento e prognóstico de geração de energia. Com base nos dados de vento medidos e nas características técnicas dos aerogeradores disponíveis no mercado, o programa calcula o prognóstico da quantidade de energia a ser gerada naquele local específico, com o aerogerador selecionado. Além disso, o programa apresenta como resultado o fator de capacidade para as mesmas condições de vento e aerogerador. Foram testados vários modelos de aerogeradores, e o que apresentou melhor resultado foi o modelo E-48 da Enercon, de 800kW, alcançando um fator de capacidade da ordem de 29,2%.

Para a obtenção do dimensionamento e análises de viabilidade técnica do sistema híbrido foram realizadas simulações utilizando um programa computacional chamado HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*), desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) cuja metodologia consagrada vem sendo utilizada em grande escala por diversos países.

A simulação foi realizada utilizando somente a geração eólica e o gerador Diesel para atender à demanda, ou seja, não foi incluída a rede elétrica. O programa utilizado nas simulações (HOMER) não faz distinção entre o horário de ponta e fora de ponta, desta forma, os dados resultantes foram exportados e tratados por meio de uma macro da planilha Excel. Esta macro separa os dados em dois grupos, horário de ponta e fora de ponta, e dentro de cada grupo, verifica, para cada hora, qual fonte é capaz de suprir a carga, de acordo com os critérios estabelecidos e descritos no item 2.0. A Figura 5 apresenta a tela do resultado do HOMER para esta configuração.

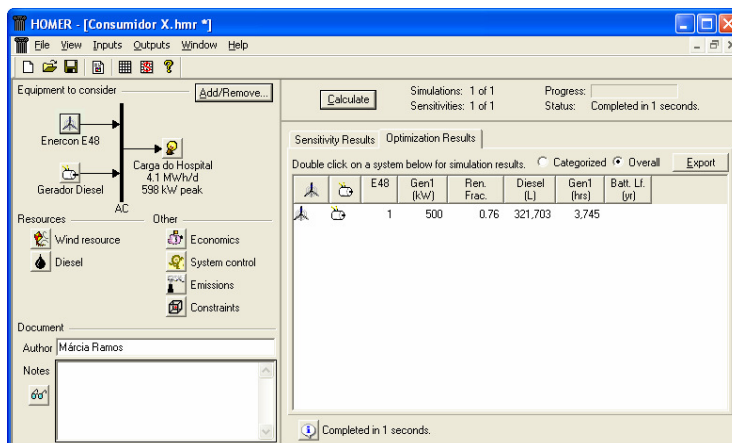


FIGURA 5 - Tela do resultado da simulação no HOMER

## 5.0 - RESULTADOS

Os resultados obtidos através da simulação no HOMER e posterior tratamento na planilha Excel, referentes à utilização da energia eólica para o suprimento da carga nos horários de ponta e fora de ponta, são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – Suprimento da carga utilizando energia eólica

Período do dia	Porcentagem do tempo para suprimento da carga
Ponta	23,65 %
Fora de ponta	62,06%

Os cálculos realizados para a obtenção do gasto anual com energia elétrica levaram em consideração a quantidade de horas em que o aerogerador atende à demanda, a utilização do gerador diesel e os valores tarifários reais, praticados no ano de 2007, de uma distribuidora. Os resultados destes cálculos são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 - Gasto anual com energia elétrica híbrida

Período do dia	Demanda/Consumo	Seco	Úmido
Ponta	Geração à Diesel	R\$93.360,51	R\$66.686,08
	Demanda	R\$47.943,01	R\$34.245,01
Fora de ponta	Consumo	R\$55.318,85	R\$35.871,01
	Gasto Total Anual do período	R\$196.622,37	R\$136.802,09
Gasto Total Anual		<b>R\$333.424,46</b>	

Atualmente o gasto anual com energia elétrica é de R\$733.356,35, e o custo total do investimento, para este projeto, é da ordem de R\$2.536.410,0. Com relação ao gerador Diesel foi considerado o valor de R\$0,5307/kWh para o custo total de operação, incluindo o combustível, o lubrificante e a manutenção. Para a geração eólica, o valor utilizado como base para a estimativa do custo de O&M foi de R\$98,00/kW por ano (MOLLY, 2004). Neste valor estão inclusos seguros, manutenção, reposição de peças, reparos, gerenciamento, aluguel de terreno, desmontagem e etc. Para o estudo em questão, por se tratar de somente um aerogerador, não se aplicam todos estes custos, portanto, foi utilizada a divisão dos custos de O&M por categorias (EWEA, 2004), na qual 26% do custo total são destinados a serviços e troca de peças. Logo, o custo total anual de O&M para o aerogerador foi estimado em R\$20.000,00.

A partir destes valores foi realizada a análise de viabilidade econômica utilizando o critério do Valor Presente Líquido (VPL), com uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% ao ano, o que resultou em um VPL de R\$697.262,68 e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 14%. A Figura 6 mostra o gráfico da distribuição do VPL ao longo dos anos de vida útil do projeto, 20 anos.

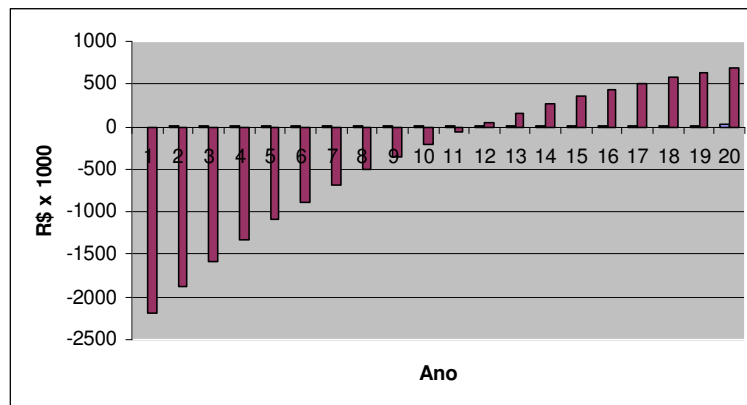


FIGURA 6 - Gráfico da distribuição do VPL

Através do gráfico da Figura 6 verifica-se que o período de recuperação (*payback*) do investimento é de 11 anos.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Trata-se de uma alternativa em sintonia com as tendências ecológicas mundiais, com o aproveitamento de uma fonte de baixo impacto ambiental e ainda pouco explorada no Brasil. É importante ressaltar que não foi considerada qualquer forma de incentivo governamental, como por exemplo, financiamento com juros mais baixos ou isenção de impostos. Um aumento dos preços dos combustíveis fósseis ou acréscimos na tarifa de energia elétrica convencional, circunstâncias possíveis num cenário de médio prazo, podem também contribuir para tornar o investimento proposto mais atrativo.

Conforme mostra o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, existem diversas regiões que apresentam velocidade média anual de vento superior à utilizada neste trabalho, sendo possível, portanto, obter um resultado melhor, ou seja, reduzir o tempo de retorno do investimento.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, e., "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons, Ltd. 2001.
- (2) Grubb, M. J. e Meyer, N. I., Wind Energy: Resources, Systems, and Regional Strategies. In: Johansson, T. B. et al. Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity. Washington, D.C: Island Press, 1993.
- (3) Pavinatto, E. F., Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica. Tese de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005.

- (4) Pereira, J. C., Motores e Geradores: Princípios de Funcionamento, Instalação, Operação e Manutenção de Grupos Diesel Geradores. Apostila disponibilizada em <http://www.joseclaudio.eng.br/diesel1.html>, acessado em maio de 2007.
- (5) ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução ANEEL n° 505, de 26/11/2001. DOU 27/11/2001 – republicada DOU 28/11/2001.
- (6) Molly, J. P., “Economics of Wind Farms in Brazil”, DEWI Magazin Nr. 25, August 2004.
- (7) EWEA, “Wind Energy – The Facts, Costs & Prices”, 2004.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Márcia da Rocha Ramos

Nascida no Rio de Janeiro, RJ em 19 de novembro de 1971.

Mestre (1997) em Engenharia Elétrica na UFF-RJ e Graduada (1994) em Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica no CEFET-RJ.

Empresa: CEPTEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica.

Atua no Departamento de Tecnologias Especiais – DTE.