



**GRUPO II**

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

**OPÇÕES À GERAÇÃO DIESELÉTRICA PARA SISTEMAS ISOLADOS NA REGIÃO  
NORTE: EÓLICA, HIDROKINÉTICA E BIOMASSA**

Marcos V. G. Nascimento \*  
Leonardo dos S. R. Vieira  
Marcelo R. da Silva  
Guilherme Fleury

Paulo C. Domingues  
Jorge Cury Sadi

Sílvio C. A. Almeida  
Carlos R. P. Belchior

CEPEL

ELETRONORTE

COPPE

**RESUMO**

A geração de energia elétrica em sistemas isolados da Região Norte, em especial os de pequena escala, têm custos de operação e manutenção elevados devido, principalmente, as dificuldades com o suprimento do combustível: óleo Diesel.

Em muitas das localidades hoje não atendidas, nem a geração dieselétrica, com todos os seus problemas, nem tão pouco a tradicional eletrificação por extensão da rede elétrica, se mostram como soluções técnicas e economicamente viáveis.

Na busca de soluções para a questão do suprimento de energia elétrica para a Região Norte, a ELETROBRÁS, a ELETRONORTE e o CEPEL instituíram o projeto *Implantação de Sistemas de Geração Alternativa na Região Norte* que engloba as seguintes etapas de estudo :

1. demonstração da viabilidade técnico-econômica e sócio ambiental da implantação de sistemas eólicos através da medição do regime de ventos dos estados litorâneos e nos estados com montanhas;
2. demonstração da viabilidade do aproveitamento da energia cinética de pequenos rios e cursos d'água, sem represamento e queda (hidrocinética), através do projeto e instalação de planta piloto e levantamento de sítios potenciais para aplicação da tecnologia;

3. demonstração da viabilidade de sistemas de geração baseados em biomassa, com ênfase nos óleos vegetais em grupos geradores Diesel adaptados;
4. mapeamento energético, com o Estado do Amapá como casos estudo, para determinação das vocações micro-regionais utilizando geoprocessamento de dados.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento atual do projeto para os itens 1 a 3.

**PALAVRAS-CHAVE :**

Fontes renováveis - energia eólica - energia de biomassa - hidrocinética .

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O suprimento de eletricidade para os sistemas isolados na Região Norte do Brasil constitui um problema de difícil solução. Os sistemas de pequena escala apresentam custos elevados e inúmeras dificuldades logísticas para o suprimento do óleo Diesel. Existem também localidades que não têm nenhum acesso a energia e que devido a condições de isolamento dificilmente serão eletrificadas via soluções tradicionais de extensão da rede elétrica da concessionária e geração dieselétrica descentralizada.

No entanto, muitas comunidades dispõem de recursos renováveis: solar, eólico, biomassa, e até mesmo a

\* CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Av. Um s/n – Cidade Universitária  
CEP 21.941-590 Rio de Janeiro – RJ – Brasil - Tel (021) 598-2430 – Fax (021) 598-2136

energia de pequenos aproveitamentos hidráulicos. No entanto, o emprego destas fontes para geração de energia elétrica, em condições economicamente competitivas, requer, ainda, desenvolvimentos dos pontos de vista tecnológico e logístico de aproveitamento dos recursos. Neste trabalho, serão apresentados os resultados atuais do projeto CEPEL /ELETROBRÁS/ELETRONORTE: *Implantação de Sistemas de Geração Alternativa para a Região Norte*, cujo objetivo é demonstrar a viabilidade técnico-econômica e ambiental das fontes alternativas para geração de energia elétrica, com aproveitamentos locais, em substituição a geração dieselétrica.

## 2.0 – A ENERGIA EÓLICA

Para a demonstração da viabilidade técnico-econômica e sócio ambiental da implantação de sistema eólicos no litoral dos Estados do Amapá e Pará e regiões montanhosas de Roraima, o CEPEL instalou anemômetros em diversas localidades a partir de junho de 1996 (Figura 1).

A CEA (Amapá), a CELPA (Pará), a CER (Roraima) forneceram o apoio logístico para a instalação, operação e manutenção das estações meteorológicas.



FIGURA 1 - ESTAÇÕES ANEMOMÉTRICAS

Os principais dados coletados são: velocidade média, desvio padrão da velocidade, direção média, desvio padrão da direção e velocidade máxima do período.

Os dados de velocidade média, obtidos para algumas estações no ano de 1998 são apresentados na Tabela 1. Os valores foram obtidos para a altura padrão de 30 metros.

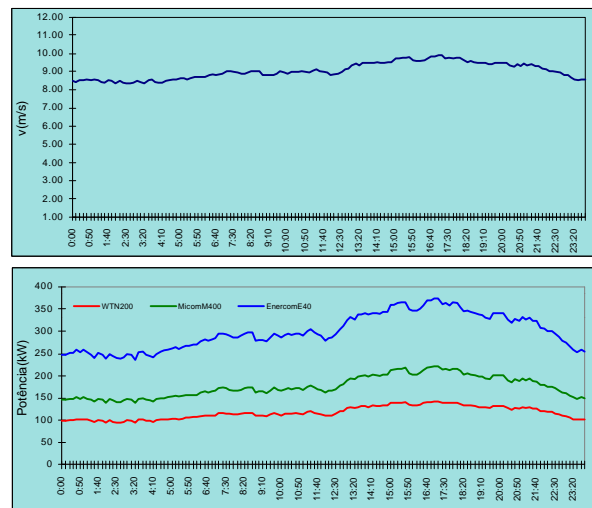
Os dados obtidos das estações anemométricas são tratados e apresentados segundo a Distribuição de Weibull e serão correlacionados através de *software* apropriado, visando à avaliação de potenciais eólicos

em outros sítios.

TABELA 1 – VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO (m/s)

| Estação         | mês (1998) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 1          | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| Goiabal         | 6,6        | 8,4 | 7,3 | 5,2 | 5,6 | 5,3 | 5,1 | 6,1 | 6,3 | 6,0 | 6,1 |     |
| Ilha de Santana | 5,5        | 7,1 | 6,2 | 5,4 | 4,1 | 3,4 | 3,9 | 4,2 | 4,0 | 4,2 | 2,9 | 3,3 |
| Guimarães       | 4,1        | 5,9 | -   | 4,8 | 4,2 | -   | 5,3 | 5,3 | -   | -   | -   | -   |
| Ajuruteua (8)   | -          | 8,3 | 6,7 | 5,8 | 7,8 | 8,0 | 8,3 | 8,7 | 10  | 8,9 | 6,2 | 6,2 |
| Chaves (6)      | -          | -   | -   | 4,6 | 5,1 | 6,5 | -   | 6,4 | -   | 7,8 | 7,3 | 6,9 |
| Soure (7)       | 5,7        | 6,8 | 5,1 | 4,4 | 4,6 | 5,0 | 6,3 | 7,1 | 7,8 | 7,7 | 7,1 | 7,2 |
| Viseu (9)       | 4,1        | 5,1 | 3,5 | 3,1 | 4,6 | 4,5 | 5,4 | 5,5 | 5,5 | 8,9 | 4,8 | 4,5 |

Para a localidade de Ajuruteua foi avaliado o potencial de geração anual considerando aerogeradores de mercado para potências de 200kW, 400kW e 500kW. A Figura 2, a seguir, apresenta o resultado dessa análise para o pior e o melhor dia da série temporal. O fator de capacidade anual obtido foi de 36%.



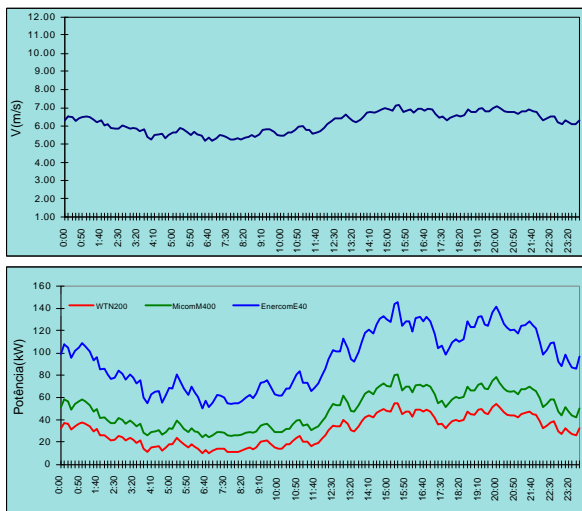


FIGURA 2 – Perfil de velocidade e potência gerada para o pior e o melhor dia da série temporal da localidade de Ajuruteua.

O custo de geração estimado, para a máquina de 500kW, tomando como base um custo de instalação de US\$1000/kW, taxa de retorno do investimento de 15%, vida útil de 20 anos, impostos de 38%, seguro de 2% e O&M de 10US\$/MWh é de US\$ 70/MWh.

Apesar dos dados promissores em relação a possíveis aproveitamentos eólicos, deve-se ter cautela com relação a empreendimentos eólicos na região. É preciso avaliar as características dos terrenos e a área necessária para a disposição dos aerogeradores.

### 3.0 - ETAPA HIDROCINÉTICA

O aproveitamento da energia cinética da correnteza dos rios é uma alternativa de geração com elevado fator de capacidade (energia firme), normalmente quatro vezes superior ao aproveitamento eólico de mesma potência.

No ano de 1998 o CEPEL desenvolveu e testou dois protótipos de sistemas hidrocinéticos. O primeiro, com turbina axial submersa, foi construído com a Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE e teve como principal objetivo a avaliação de concentradores locais de velocidade para elevação da potência gerada. O segundo, com turbina do tipo roda d'água, foi construído através de uma parceria com um fabricante de rodas d'água nacional para bombeamento (HIDROMETAL) com recursos da FINEP e consultoria da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE para simulação do sistema no rio.

As principais características destes protótipos e os resultados encontrados nos ensaios são apresentados a seguir.

O protótipo de turbina axial foi construído em escala reduzida 5/1. Na entrada do hélice, com duas pás, foi construído um bocal convergente de seção retangular e foram realizadas medições de velocidade no seu interior, na entrada e próximo ao hélice em vários níveis de profundidade. Nesta bateria de testes não foi possível comprovar variações significativas na velocidade próximo à turbina devido à grande dispersão nas medições realizadas.

Em função da dispersão dos resultados observada, foi realizada uma segunda bateria de testes, na qual, a medição da potência da turbina foi avaliada comparando-se os resultados com concentrador e sem concentrador, conforme indicado na Figura 3.

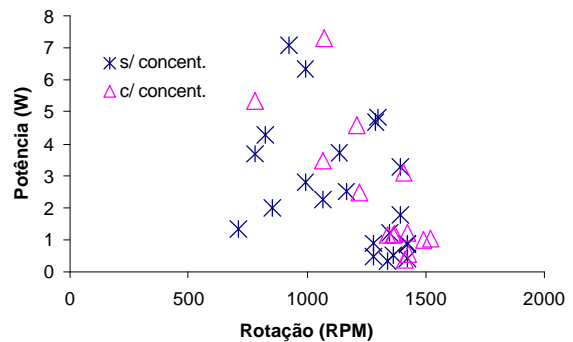


FIGURA 3 – Avaliação da potência com concentrador

A Figura 3 indica que não foi possível observar incremento da potência com a utilização do concentrador de perfil retangular. Em função dos resultados adversos obtidos, decidiu-se pela reavaliação do tipo de perfil de concentrador a ser utilizado em turbinas axiais submersas.

O protótipo de roda d'água em escala real foi desenvolvido a partir das simulações realizadas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, que indicaram os seguintes parâmetros de dimensionamento:

Largura da roda: 3 metros  
 Diâmetro da roda: 2 metros  
 Ângulo de inclinação das pás: entre 20 e 30 graus  
 Número de pás: 12

A potência de projeto para este sistema a uma velocidade do rio de 1,5 m/s é de 3,5 kW com uma rotação 10 RPM. Para a geração de energia elétrica foi

acoplado ao eixo da roda um multiplicador com relação de transmissão 100:1 e um variador de velocidade para ajuste da rotação em condições variadas de velocidade do rio. Um gerador elétrico de alto rendimento (acima de 85%) foi selecionado, com capacidade de 5 kVA e rotação de 900 RPM. O sistema flutuante foi construído na HIDROMETAL e colocado em operação no Rio Pirapó, no Paraná (Figura 4), tomando-se o cuidado de não ultrapassar o custo total previsto para este sistema [SNPTE 98]. (Tabela 2). O sistema flutuante é colocado para operar através do enchimento dos tubulões com água até que a roda entre em contato com a água.

TABELA 2- Custos estimados do sistema

| ITEM         | CUSTO (US\$) |
|--------------|--------------|
| Flutuador    | 11000        |
| Alternador   | 1000         |
| Transmissão  | 5000         |
| Outros       | 3000         |
| <b>TOTAL</b> | <b>20000</b> |



FIGURA 4 – Roda d'água CEPEL/HIDROMETAL

Nos ensaios realizados foram tomadas medidas de velocidade do rio, de rotação da roda e da potência desenvolvida. Com geradores acoplados, embora sem carga, a rotação da roda foi avaliada em 12 RPM, para um velocidade média do rio de 1,6 m/s. Nesta situação os tubulões encontravam-se totalmente submersos, embora a pá da roda sempre apresentasse parte de sua seção fora do contato com água. Com a colocação de carga, observou-se redução acentuada da rotação da roda, impedindo seu funcionamento.

Atualmente estão sendo investigadas as possíveis causas do resultado insatisfatório observado. O conjunto multiplicador- gerador será testado em laboratório na rotação da roda para determinação de seu rendimento. Paralelamente, estão sendo investigados os efeitos fluidodinâmicos sobre a pá quando a mesma não é totalmente submersa em

relação a situação em que ela é totalmente submersa. Para isto, construiu-se um protótipo em escala reduzida, testando-o com diferentes profundidades de submersão. Estes testes revelaram que pás totalmente submersas fornecem rotações ligeiramente superiores do que pás parcialmente submersas, para uma mesma área.

Após a realização dos testes de rendimento do sistema de transmissão e gerador, a geometria da roda deverá ser alterada para a realização de uma nova bateria de testes.

#### 4.0 - ETAPA BIOMASSA

Nesta etapa serão apresentados os resultados dos testes laboratoriais realizados para comprovação da solução de adaptação de um moto gerador de 75kVA ao funcionamento com óleo dendê "in natura".

Conforme previsto nos objetivos do projeto [artigo SNPTE 1998] foram realizadas as seguintes modificações no motor convencional para operação com óleo de dendê:

- Pré-aquecimento do óleo antes da injeção visando à redução de sua viscosidade, tornando-a mais próxima do Diesel
- Introdução de um sistema de alternância de combustível de forma a permitir a partida e o desligamento do motor utilizando Diesel.

A Figura 5 apresenta um diagrama simplificado do sistema de adaptação utilizado nos testes.

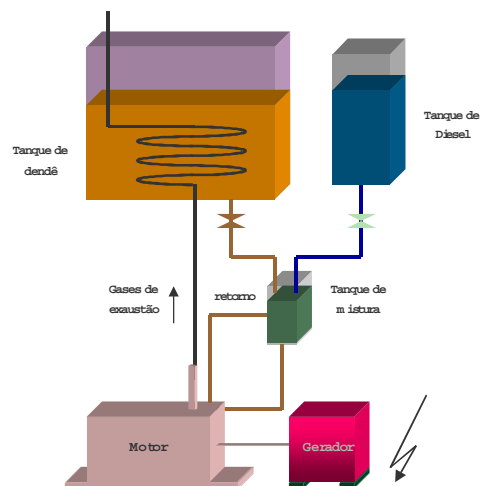


FIGURA 5 - ESQUEMA BÁSICO DE TESTES

As principais variáveis monitoradas nos testes foram as seguintes: temperaturas de injeção do óleo, da água



de refrigeração, do ambiente e dos gases de exaustão, pressão do óleo lubrificante, pressão atmosférica, pressão de descarga, vazão de combustível, potência elétrica gerada e emissões dos gases de descarga. A Tabela 3 abaixo apresenta uma das principais atividades já realizadas no grupo gerador até abril de 1999.

TABELA 3 – ATIVIDADES REALIZADAS COM O GRUPO GERADOR ADAPTADO

| Atividade   |
|---|
| Análise físico-química do Diesel e do dendê   |
| Amaciamento do motor (50 horas com Diesel)  |
| Análise físico-química do óleo lubrificante novo e após amaciamento                                 |
| Desmontagem de todos os cabeçotes para inspeção após amaciamento                                    |
| Teste de bicos injetores após amaciamento   |
| Testes de desempenho (eficiência, emissões) com Diesel  |
| Testes de desempenho (eficiência, emissões) com dendê   |
| Testes de resistência usando ciclos de carga variável com dendê (35 horas até início de abril 1999) |

Após 50 horas de operação com dendê, serão verificados o depósito de carbono nas câmaras, através de inspeção por fibra ótica, a deterioração do óleo lubrificante através de análises físico química, e a perda de rendimento através de medição da potência de saída e do consumo de combustível..

Os ciclos de carga variável adotados nos testes apresentam as seguintes características:

- Rotação: 1800 RPM, mantida constante
- Tensão de saída: 220 V com oscilação máxima de 2,5%
- Corrente: depende da carga, constituída por resistências elétricas imersas em tanques de água
- Partida: realizada com Diesel, inicialmente sem carga e em seguida com 25% de carga, para o aquecimento adequado do motor.
- Corte do abastecimento do Diesel e início da injeção de dendê
- Ciclos de carga (repetidos no período aproximado de 8 horas) : 30 minutos a 25% de carga, 60 minutos a 50% de carga, 60 minutos a 75% de carga e 60 minutos a 100% de carga
- Desligamento: realizado com Diesel, após interrupção do fornecimento de dendê com 100% de carga e redução progressiva da carga para evitar resfriamento brusco do motor.

Alguns dos principais resultados dos ensaios são descritos a seguir. Para avaliação da temperatura de aquecimento do óleo, foi levantada a curva de viscosidade em função da temperatura. Os ensaios com dendê foram realizados à temperatura média de injeção de 54°C, correspondente a uma viscosidade de

25 mm<sup>2</sup>/s, o que representa uma redução de 65% em relação a viscosidade na temperatura ambiente (25°C). Ainda assim, a viscosidade resultante é muito superior a do Diesel à temperatura ambiente (1 a 6 mm<sup>2</sup>/s).

As Figuras 6 e 7 mostram respectivamente os depósitos de carvão observados nos bicos injetores e tampas do cabeçote após o período de amaciamento. O nível de depósitos observado pode ser considerado normal. Os bicos e câmara foram limpos antes de sua remontagem. Esta inspeção servirá de referência para as inspeções posteriores após os ciclos de funcionamento com óleo de dendê



FIGURA 6 – Bicos injetores



FIGURA 7 – Tampa do Cabeçote

Nas primeiras 35 horas de operação com dendê não foram registradas anormalidades na operação do motor. As variáveis monitoradas foram similares nos dois casos, com exceção da potência máxima a 1800 RPM, inferior para o dendê, e o consumo específico, superior para o dendê, conforme ilustra a Figura 8

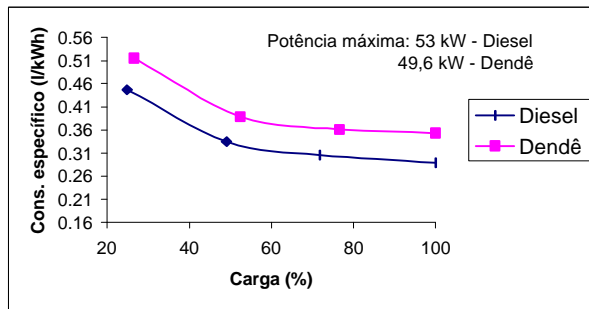


FIGURA 8 – Comparação dos ensaios

Observa-se um aumento de consumo específico de 15 a 22% dependendo da carga de operação. Completado o período de 50 horas de testes com o dendê, serão retiradas amostras do óleo lubrificante para análise, retirada dos bicos injetores para teste, inspeção das câmaras através de fibra ótica e abertura de um dos cilindros para análise dos depósitos. Nesta ocasião avaliar-se-á a necessidade de um aquecimento maior do óleo vegetal na injeção.

## 5.0 - CONCLUSÕES

O projeto foi concebido para a demonstração da viabilidade de fontes alternativas de energia em substituição à geração dieselétrica. As três alternativas avaliadas são, sob certas circunstâncias, economicamente justificáveis em função da vocação das localidades.

## 6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) VIEIRA, S.R.L., NASCIMENTO, M.V.G.  
Hidrocinética: Uma alternativa de geração de pequenos blocos de energia para comunidades isoladas na Região Norte. Relatório Técnico DPP/POG-889/96. CEPEL. 1996.
- 2) ABULNAGA, B. E. Water power without waterfalls, Water Power & Dam Construction. julho 1988.
- (3) RIBEIRO, C. M. Implantação de Sistema Híbrido para Eletrificação na Vila de Joanes (Pará). XIII SNPTE. Florianópolis. 1995