



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

GPT - 28
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO II
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

"USINA EÓLIO-ELÉTRICA EXPERIMENTAL DO MORRO DO CAMELINHO - 10 ANOS DE OPERAÇÃO"

**Henrique Fernando França Costa
Cemig**

**Alexandre Heringer Lisboa
Cemig**

**Ivan Pedro Reis Grego
Cemig**

RESUMO

O documento tem como objetivo realizar uma breve retrospectiva dos últimos 10 anos de operação da primeira experiência brasileira de geração de eletricidade para o sistema interligado, a partir da energia gerada pelos ventos, a Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho - 1 MW.

Serão relatadas as experiências adquiridas com a operação, manutenção e monitoração do desempenho da Usina, apresentando os problemas e soluções encontradas, as características técnicas, econômicas e operacionais desta tecnologia que, pelo seu pioneirismo, teve expressiva participação e contribuição na introdução da "cultura eólica" no Brasil.

PALAVRAS CHAVE

Energia eólica - aerogerador - gerador eólico - máquinas - usina eólio-elétrica - usina eólica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho, localizada sobre a Serra do Espinhaço, no Município de Gouveia-MG, constituiu a primeira experiência brasileira de geração de eletricidade, a partir da energia eólica, alimentando o sistema interligado.

A Usina foi inaugurada em Agosto/94 e teve um custo total de US\$ 1.540.000, sendo 51% custeado a fundo perdido pelo Ministério da Pesquisa e Tecnologia da Alemanha (BMFT), através do Programa Eldorado. A contrapartida da Cemig foi parcialmente financiada pela Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP. As montagens civis, mecânicas e elétricas estiveram a cargo da equipe da Cemig. Os trabalhos de montagem dos aerogeradores e a entrada em operação da Usina foram supervisionados pela equipe técnica do fabricante.

A finalidade principal do projeto foi a de ser um laboratório e não uma usina comercial. O Morro do Camelinho, onde já funcionava uma estação piloto de rádio-comunicação da Cemig, alimentada por energia eólica, era, na época, entre os locais com dados anemométricos pesquisados pela Empresa, aquele que possuía, ao mesmo tempo, as características mais adequadas para a implementação do parque eólico, tais como o melhor regime de ventos, presença de uma rede de transmissão e de uma infra-estrutura civil já desenvolvida.

Tendo em vista os fatores dificultadores e os desafios vencidos ao longo do tempo, esta experiência tem representado importante fonte de informação para futuros projetos. Problemas de diversas características tornaram-se verdadeiros desafios para os técnicos envolvidos no projeto, durante esses 10 anos de

funcionamento. A grande maioria das soluções aplicadas foi desenvolvida internamente, pelos próprios técnicos da Cemig.

A partir de 1997, a Cemig direcionou-se para a identificação de novos sítios eólicos no Estado de Minas Gerais. Com a experiência da UEEE do Morro do Camelinho a Cemig buscou avaliar essa tecnologia, sob os seus vários aspectos técnicos, econômicos e operacionais e também, vale ressaltar, avaliar a introdução dessa fonte energética no seu sistema elétrico para diversificação do seu parque gerador.

Muito se tem discutido, nos dias de hoje, sobre a utilização da tecnologia dos aerogeradores, principalmente na costa brasileira, como uma solução econômica e tecnicamente atrativa para o fornecimento de energia. As empresas, concessionárias de energia elétrica, têm introduzido, em seus planejamentos estratégicos, a utilização de fontes alternativas de geração de energia como possibilidades de negócio concretas e não mais como atividades de pesquisa ou desenvolvimento de tecnologia. Neste momento, a Cemig se orgulha de ter sido pioneira na implementação de um parque eólico, integrado à sua malha de distribuição, o que representou, para a empresa, oportunidade inestimável de aquisição de conhecimento e experiência. É importante salientar que o conhecimento adquirido e as experiências vivenciadas foram compartilhados com outras empresas, durante esses anos, o que certamente contribuiu para encorajar investimentos e trabalhos nessa área.

2.0 - CARACTERÍSTICAS GERAIS:

A UEEE do Morro do Camelinho é composta de quatro aerogeradores (TW250), fabricados pela empresa alemã Tacke Windtechnik. Cada um deles possui capacidade nominal de geração de 250 kW, rotor de eixo horizontal, 3 pás com 26 metros de diâmetro rotórico e sistema de controle de potência por *stall*. Todo o conjunto está montado sobre torre tubular cônica de aço de 30 metros de altura. Os geradores elétricos são trifásicos, do tipo assíncrono de pólos chaveados (8/6 pólos), duplo estágio (80/250 kW) e operam em rotações de 900 e 1200 rpm respectivamente.

A Usina é totalmente automática, prescindindo da presença de operador (telecomandada). Todos os processos de operação/monitoração dos aerogeradores podem ser realizados remotamente pela equipe de operação através de sistema computadorizado de telesupervisão e telecontrole, tais como: partida e parada das turbinas, sinalização de eventos de erros como sobretensão e subtensão, falha de frequência, vibração, dentre outros, perfazendo um total de 50 registros diferentes.

A eletricidade gerada em 380 V e 60 Hz é elevada para 13,8 kV e transmitida para uma subestação de 1 MW construída no local. Nessa, a tensão é novamente elevada para 34,5 kV e então conectada a LT 34,5 kV Parauna-Gouveia, que passa a 500 metros da subestação.

Alguns obstáculos dificultaram o andamento do projeto, como a alta resistividade do solo, a complexidade do terreno, a exposição a uma área de alta densidade de descargas atmosféricas e a conexão a uma rede de alta instabilidade - que depois se revelou no maior fator de interrupção das máquinas.



FIGURA 1 - Usina Eólico-Eletrica Experimental do Morro do Camelinho

2.1 - O sítio Eólico

O sítio onde a Usina foi instalada está situado sobre a Serra do Espinhaço, a 1.350 metros de altitude, no Município de Gouveia, a 240 km ao norte de Belo Horizonte. Possui topografia complexa, bem característica dos sítios eólicos encontrados no norte do Estado. Os ventos mais freqüentes provêm da região de alta pressão situada no Oceano Atlântico e têm como origem predominante a direção leste (66 %).

Devido à essas características topográficas, a velocidade dos ventos varia significativamente com a localização dentro do sítio e com a altura. Estas variações causam diferentes desempenhos nos 4 aerogeradores, conforme descrito no item 3.3. A densidade média do ar no local é $1,042 \text{ kg/m}^3$, o que reduz em aproximadamente 15% a produção de energia em relação às mesmas condições de vento ao nível do mar.

2.2 - As medições

As medições das características dos ventos foram realizadas em 3 etapas. A primeira (1982-1984) permitiu avaliações preliminares das potencialidades do sítio. A segunda (1992-1993) permitiu a obtenção de dados básicos para seleção e localização dos aerogeradores. A terceira foi realizada de abril/95 até meados de 1977 e os dados obtidos foram utilizados para monitoração do desempenho da Usina.

Foi utilizada uma estação meteorológica "AMONNIT" cedida pelo DEWI (Instituto Alemão de Energia Eólica), localizada de forma a não sofrer interferência dos aerogeradores, com sensores para medição de temperatura, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos (12 e 30 metros de altura). Além da estação meteorológica existem sistemas anemométricos montados sobre cada nacela que permitem avaliar as variações locais do regime de ventos e o desempenho de cada máquina. Os dados apresentados na Tabela 1 são provenientes dessa terceira etapa.

Os dados foram obtidos dos anemômetros instalados sobre as nacelas, no período entre agosto/94 e dezembro/96. Devem ser consideradas, neste caso, as possíveis turbulências causadas pelas pás dos aerogeradores, as diferentes posições no sítio e os períodos de medição.

A velocidade média dos ventos a 30 m medida no período foi de 6,48 m/s, sendo que os meses mais favoráveis foram os de agosto a novembro e os menos favoráveis de dezembro a maio. O fator $\alpha [V_{30}/V_{12} = (30/12)^\alpha]$, que mostra a variação da velocidade de vento com altura, foi de 0,09 médio. As calmarias apresentadas, no período de 12 meses, com velocidades de vento inferiores a 3,5 m/s, foram de 13,1% médio.

As velocidades médias dos ventos, medidas nos pontos de instalação de cada máquina, apresentam diferenças significativas entre si e com a estação meteorológica, conforme se pode observar na Tabela 1.

TABELA 1 - Distribuição de freqüência das classes de velocidade de vento medidas sobre as nacelas (%)

Faixas de velocidade do vento (m/s)	AEROGERADOR			
	1	2	3	4
3 - 4	7,4	5,6	9,5	4,7
4 - 5	22,3	25,2	26,4	24,8
5 - 6	21,8	22,6	23,9	21,5
6 - 7	17,8	18,2	17,2	17,7
7 - 8	13,1	12,1	10,9	12,7
8 - 9	8,8	8,4	6,7	8,6
9 - 10	5,0	4,5	3,1	5,3
10 - 11	2,4	1,9	1,3	2,6
11 - 12	0,6	0,7	0,5	1,1
12 - 13	0,3	0,3	0,1	0,4
13 - 14	0,1	0,1	0,1	0,2
V.med. (m/s)	6,23	6,17	5,88	6,31

3.0 - DESEMPENHO DA USINA

3.1 - Disponibilidade das máquinas para geração

Atualmente a Usina tem operado abaixo de sua capacidade devido à alguns problemas técnicos e ocorrências de manutenção. Essas ocorrências impactaram negativamente no desempenho operacional da Usina, reduzindo seu

fator de disponibilidade e o fator de capacidade. Parte significativa dos períodos de indisponibilidade das máquinas é relativa a desligamentos causados pela instabilidade do sistema local que leva os parâmetros operacionais a extrapolarem a faixa ajustada.

O ajuste inicial dos valores permitidos para os parâmetros operacionais foi realizado pelos técnicos do fabricante, quando da instalação. Diante da necessidade de reajustá-los para torná-los mais adequados às condições locais.

Na Tabela 2 estão descritos alguns parâmetros em análise e seus atuais níveis de ajuste. Estes níveis são idênticos nos 4 aerogeradores.

1.0 - TABELA 2 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DA USINA

Parâmetro	Nível atual
1. Freqüência	55 - 65 Hz
2. Tensão	180 - 260 V
3. Vel. vento de interrupção	26,0 m/s
4. Max. rot. gerador 80 kW - G2	1000 rpm
5. Max. rot. gerador 250 kW -G1	1280 rpm
6. Max. rot. do rotor	46 rpm
7. G2 >> G1	70 kW / 1 min
8. G2 > G1	50 kW / 10 min
9. G1 >> G2	15 kW / 1 min
10. G1 > G2	30 kW / 10 min
11. Max. defasagem entre fases	+ / - 6°
12. Vel. vento de partida	3,0 m/s

Os parâmetros 7, 8, 9 e 10 da Tabela 2 referem-se aos chaveamentos entre os geradores de 80 kW - G1 e de 250 kW - G2 e procuram otimizar a eficiência de geração para diferentes velocidades de vento, por exemplo: - o parâmetro 7 indica que haverá chaveamento de G2 para G1 quando a potência permanecer acima de 70 kW por um período contínuo de 1 minuto (chaveamento rápido). O parâmetro 8 indica que haverá o mesmo chaveamento, porém com potência de 50 kW durante um período contínuo de 10 minutos (chaveamento lento).

3.2 - Principais problemas operativos

Nesses 10 anos, as manutenções preventivas programadas foram realizadas a cada 2 anos através de ensaios elétricos nos geradores e a cada 6 meses na parte mecânica, que consta de inspeções visuais, lubrificação de mancais, utilizando o guia do fabricante. As principais manutenções nesses anos foram a substituição de 1 pá do aerogerador 1, avariado por descarga atmosférica, substituição dos acoplamentos gerador-turbina nas máquinas 1, 2 e 4, recuperação do cilíndrico hidráulico de acionamento do freio aerodinâmico, reparo do vazamento de óleo hidráulico e reparos no motor de frenagem. Na parte eletroeletrônica foram os reparos nos modems de comunicação, circuito de comando da máquina 4 e defeito nas CPUs das máquinas 1 e 4.

Os principais problemas operativos decorreram principalmente da grande instabilidade elétrica da LT Parauna-Gouveia de 34,5 kV, que apresenta elevado número de interrupções e manobras além de, em certas condições operacionais, provocava desligamentos e flutuação de tensão e freqüência além dos limites admissíveis pelas máquinas. A variabilidade na velocidade do vento obrigou a um grande número de operações nos tiristores que chaveavam os dois estágios do gerador elétrico, provocando desgastes e queima. Os eventos que mais ocorreram durante foram:

- *Frequency Fault (Falha de Freqüência)*: Responsável pela maioria das interrupções no funcionamento dos aerogeradores. Esse evento não ocorre, necessariamente, em função de uma variação de freqüência no sistema elétrico. Na maior parte das vezes, ocorre quando os aerogeradores perdem as referências do sistema elétrico, ou seja, quando este é interrompido (*Grid Drop*), e/ou quando a Usina opera momentaneamente isolada do sistema elétrico local.

- Undervoltage/Overvoltage (Sobre/Subtensão): Estes eventos foram gerados, na sua grande maioria, devido ao fato da faixa de ajustes dos sensores de tensão estar fora dos valores admissíveis para as condições do sistema elétrico local. Como o sistema local apresenta variações de tensão freqüentes, tornou-se necessário à adequação do ajuste dos parâmetros aos níveis do local.
- Grid Drop (Queda de Linha): Estes eventos foram gerados devido às interrupções na alimentação da rede, atuando no funcionamento dos aerogeradores.
- Security Chain (Cadeia de Segurança): Este evento faz parte do sistema de segurança dos aerogeradores. Inclui vários sensores (indicador de velocidade, vibração, parada de emergência etc.) e desliga imediatamente o aerogerador, independentemente da operação do computador de controle (mesmo se ocorrer uma falha no mesmo). Quando este evento (security chain) é ativado, a tensão nos contadores e válvulas é interrompida, desconectando o aerogerador do sistema elétrico.

Um outro problema que acarretou um grande número de paradas foi devido ao sistema de orientação da nacela (*yaw*), causado em parte pela grande variação da direção dos ventos e parte por falha no mecanismo de destorção dos cabos.

3.3 - Energia produzida

A Tabela 3 apresenta o tempo de efetiva produção de energia e o total de produção de energia de cada gerador da Usina em 1996. A variação da produção entre as máquinas deve-se, principalmente, as variações abruptas freqüentes - de intensidade e direção - no fluxo dos ventos provocados pela complexidade do terreno, as diferentes velocidades médias de vento em cada aerogerador e as interferências de um aerogerador/torre sobre o outro devido aos locais em que os mesmos estão instalados.

TABELA 3 - Período de efetiva produção (h) e total de energia produzida em 1996 (MWh)

	1.1 AEROGERADOR								
	1		2		3		4		Usina
	h	MWh	h	MWh	h	MWh	h	MWh	MWh
Jan	0	0	603	16,5	388	9,0	440	16,9	42,3
Fev	0	0	436	15,8	218	8,5	435	13,8	38,0
Mar	308	10,7	560	13,7	306	7,0	578	14,7	46,2
Abr	551	28,5	498	17,1	420	11,7	541	17,9	75,2
Mai	522	13,9	398	9,2	211	3,0	491	12,9	38,9
Jun	462	21,6	479	17,7	250	9,8	495	19,0	68,2
Jul	588	20,4	556	16,0	219	7,6	572	17,2	61,2
Ago	217	16,7	179	11,8	213	13,5	219	15,9	57,9
Set	67	3,7	611	35,8	596	30,7	594	34,5	104,7
Out	546	24,7	538	20,8	527	17,9	558	22,3	85,7
Nov	607	38,0	552	29,8	521	25,4	598	34,8	128,0
Dez	578	15,8	548	12,4	499	10,7	566	14,1	53,0
Ano	4446	194	5958	217	4368	155	6087	234	800

3.4 - Qualidade de Energia

Com a finalidade de aumentar a disponibilidade e a produção de energia da Usina, foi feita uma adequação nos parâmetros operativos do Sistema de Supervisão e Controle dos aerogeradores, considerando as diversas interferências externas já mencionadas.

Para tal, foi realizado pelo DEWI (Instituto Alemão de Energia Eólica), em conjunto com a Cemig e o acompanhamento da UFMG, um trabalho de medições de qualidade da energia e melhorias operacionais da

Usina, em 1997. Nesse trabalho (*Power Quality Measurement and Wind Turbine Operational Improvement at Cemig Morro do Camelinho Wind Farm*) foram diagnosticadas algumas anomalias, levantadas as causas dos constantes desligamentos da Usina do sistema elétrico, principalmente aquelas ocasionadas por eventos transitórios e proposta alternativas de ação.

Porém, o estudo de qualidade da energia, as investigações sobre os transitórios que poderiam estar desligando a Usina do sistema elétrico constantemente e outros trabalhos, não tiveram a devida continuidade e conclusão.

A justificativa se deve ao fato das constantes mudanças na regulamentação do setor elétrico nos últimos 10 anos e especificamente em 1997, quando a Cemig passou por uma grande reestruturação, segmentando e priorizando os projetos e negócios a serem implementados. Com isso os estudos e projetos na área eólica ativeram-se apenas à prospecção de novos sítios de vento para implantação de novas usinas eólicas.

4.0 - CONCLUSÕES

A Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho operou de forma satisfatória durante esses anos. Nos 3 últimos, porém, problemas mecânicos têm sido bastante desafiadores, ainda mais no que se refere a uma tecnologia que foi lançada há cerca de 15 anos atrás. A empresa fornecedora dos aerogeradores, a Tacke Windthecnick, encerrou suas atividades no final da década de Noventa, sendo comprada pela Enron Wind, que também encerrou suas atividades poucos anos depois. Esse problema - a falta de um fornecedor para assistência técnica - prejudicou imensamente a manutenção dos aerogeradores. Atualmente duas máquinas estão com grande dificuldade de manutenção.

A Cemig agora está voltada para a identificação de sítios eólicos para a exploração comercial e já identificou dois sítios bastante promissores. Pelo propósito a que se destinou - caráter experimental e laboratorial - a Usina forneceu subsídios importantes para análise da tecnologia e serviu para alavancar a indústria eólica no Brasil, culminando com o marco legal - Lei 10.438 e Decreto 5.025, de 30/03/04, mecanismo do Governo Federal que amparou e regulamentou a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA. É importante enfatizar que, em uma primeira fase, este programa objetiva a contratação de 3.300 MW de potência instalada, dos quais 1.100 MW são destinados para projetos eólicos.

A Cemig estuda a destinação da UEEE do Morro do Camelinho para outra finalidade, onde um dos maiores desafios refere-se às características do sistema elétrico local que tem provocado um número significativo de desligamentos nos aerogeradores. Espera-se reduzir este problema através do ajuste dos parâmetros de controle adequando-os à realidade do sistema elétrico local.

Outro aspecto que se configura como um desafio para pesquisa é a avaliação da contribuição da Usina para o sistema elétrico interligado. Esta análise é importante dada as características dos ventos locais, com variação de velocidade média significativa durante o ano e durante o dia.

A tecnologia utilizada se mostrou de alta confiabilidade, relevando-se os aspectos ligados aos ajustes paramétricos. O defeito de maior relevância registrado foi o dano no freio aerodinâmico na ponta de uma das pás, provocado por uma descarga atmosférica. Este foi devidamente substituído e o aerogerador voltou a operar normalmente. A experiência demonstrou, também, a importância da definição do local de instalação das torres dos aerogeradores no terreno, principalmente no caso de topografias complexas. É recomendável realizar estudos de simulação do desempenho do parque eólico, de preferência utilizando diferentes *softwares*, reduzindo-se os riscos na estimativa de produção de energia.

É importante que, em futuros projetos de sítios eólicos com características semelhantes ao da Usina do Morro do Camelinho, sejam considerados na análise os seguintes pontos:

- aerogeradores síncronos com velocidade rotórica variável;
- maiores áreas rotóricas por potência nominal do gerador;
- controle de potência por *pitch*.

O mais importante é que os aerogeradores sejam selecionados de acordo com as características do sítio e do vento local. Mesmo que, economicamente, haja vantagens na aquisição de um certo tipo de equipamento, caso este não seja completamente adequado às características do local e do sítio eólico, não haverá ganhos e a economia gerada na aquisição será rapidamente perdida ao longo do tempo.

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) A.R.Lobo, C.A.Alvarenga, A.H.Lisboa. Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho - XIII SNTPEE. 1995. BRASIL.
- (2) Cemig. Estudos sobre Aproveitamento de Energias Solar e Eólica em Minas Gerais - Fase 1. 1987.
- (3) Cemig. Levantamento de sítios eólicos em Minas Gerais - Relatório Interno. 2001.
- (4) DEWI/Cemig. Power Quality Measurement and Wind Turbine Operational Improvement at Cemig Morro do Camelinho Wind Farm, 1997.
- (5) Cemig. Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho - Relatório de Desempenho Operacional, 1998.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Henrique Fernando França Costa, natural de Belo Horizonte-MG, engenheiro de soluções energéticas da Superintendência de Relacionamento Comercial, trabalhando na Gerência de Utilização de Energia; setor da Cemig encarregado de prover políticas e programas de soluções energéticas. Graduado em engenharia elétrica na Universidade Católica de Minas Gerais - PUC/MG, com especialização em energia eólica pela Universidade de Oldenburg, vem trabalhando na Cemig em vários setores desde 1983, os quais incluem planejamento e desenvolvimento energético, sistema elétrico de potência e sistemas de telecomunicações.

Alexandre Heringer Lisboa, natural de Salinas, MG, engenheiro eletricitista, mestre em engenharia mecânica (térmica) e especialização em energia eólica pela Universidade de Oldenburg. Trabalha na Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas da Cemig, onde exerce as funções de engenheiro de tecnologia e normalização em projetos de P&D e prospecção de alternativas energéticas.

Ivan Pedro Reis Grego, natural de Belo Horizonte-MG, engenheiro mecânico graduado na Universidade Católica de Minas Gerais-PUC/MG em 1985 e pós-graduado em análise de sistemas de informação pela UNA/MG e Gestão Estratégica da Informação e Inteligência Empresarial pela UFMG. É engenheiro da Superintendência de Relacionamento Comercial da Cemig e trabalha atualmente com inteligência empresarial e marketing.