

ANÁLISE DAS PERDAS DE EFICIÊNCIA PRODUTIVA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Daniel E. Castro – daniel@plusengenharia.com.br

Shirley Mota Pedreira – Shirley_mota@bol.com.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET-MG , Dept° do Mestrado de Engenharia da Energia

Cláudio C. Pellegrini – pelle@ufsj.edu.br

Universidade Federal de São João Del Rey- UFSJ, Dept° do Mestrado de Engenharia da Energia

Alexandre Heringer Lisboa – ahlisboa@cemig.com.br

Companhia Energética de Minas Gerais- CEMIG

Resumo. *A crescente demanda por fontes renováveis, o aumento no consumo de energia das últimas décadas e as exigências cada vez maiores em relação à qualidade da energia fornecida são os aspectos fundamentais a serem considerados na geração de energia nos próximos anos. Entre as possíveis opções existentes para satisfazer estas exigências, a energia eólica está assumindo um papel cada vez mais importante. Existem, no entanto, pontos críticos que devem ser analisados, como o impacto da variabilidade na geração devido às oscilações climáticas e os altos custos operacionais devido à manutenção dos diferentes componentes dos sistemas de geração eólicos. Este trabalho visa desenvolver um método para avaliar a eficiência produtiva de sistemas de geração de energia eólica, considerando aspectos tais como a incidência de ventos (prospecção probabilística) e também aspectos operacionais (manutenção, monitoramento e inspeção). Será utilizado o conceito de Eficiência Global de Equipamento ou OEE (Overall Equipment Efficiency), desenvolvido pela JUSE (Japan Union of Scientists and Engineers) e aplicado para medir as perdas de eficiência em sistemas produtivos devido a paradas, baixas velocidades de operação e perdas por qualidade.*

Palavras-chave: Energia eólica, Manutenção, Confiabilidade, Eficiência global.

1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento econômico mundial e a crescente necessidade da sociedade moderna de transformar matérias primas em produtos e serviços de valor agregado cada vez maiores exigem capacidades de geração e de transmissão de energia cada vez maiores.

Entre todos os aspectos mencionados, o mais importante é o relativo à sustentabilidade. A questão ambiental está sendo bastante valorizada quanto à escolha futura de uma forma de energia. Aquecimento climático e esgotamento de recursos não renováveis como o petróleo estão exigindo uma mudança nos conceitos de geração e utilização de energia.

Entretanto, de nada adiantará se os recursos energéticos não estivessem disponíveis em grande quantidade, de forma que possam suprir a crescente demanda energética do mercado. Esta mesma energia deverá também ter um baixo custo e ser renovável para que consiga competir equilibradamente com as fontes de energia convencionais.

Um dos principais problemas inerentes à produção de energia eólica é a aleatoriedade na fonte de energia, que depende da época do ano e também das características do local de instalação. Esta característica não pode ser gerenciada facilmente. Assim, a gestão de um sistema de geração eólico deve otimizar a disponibilidade da instalação nas épocas de máxima incidência dos ventos. Um dos pontos mais críticos na operação deste tipo de sistemas de geração de energia é o alto custo de manutenção. Nestes sistemas, os custos de manutenção são de modo geral muito altos. O objetivo deste trabalho é realizar um levantamento dos fatores envolvidos na disponibilidade e eficiência de produção dos sistemas de geração eólicos. Serão levantados parâmetros de operação de sistemas já existentes e estes dados serão processados e utilizados na elaboração de um mapeamento dos principais fatores que definem a eficiência global de um sistema de geração eólico.

2. FATORES QUE INFLUENCIAM A DISTRIBUIÇÃO DO VENTO

2.1 Fatores que influenciam a distribuição dos ventos

A atmosfera terrestre pode ser considerada como uma gigantesca máquina térmica, cuja fonte energética é o sol, onde as massas de ar são transportadas devido aos diferentes potenciais térmicos existentes. Devido à forma esférica do planeta, a irradiação solar é máxima no equador, diminuindo em direção aos pólos. Estabelece-se, então, um fluxo

permanente de calor sensível e latente na direção do equador-pólo, de forma a reduzir o excesso de energia térmica existentes nos pólos. O processo é responsável pela denominada circulação atmosférica global. Desta forma, existe um excesso de energia térmica no equador e um déficit nos pólos e para equilibrar este processo se gera um fluxo de calor através das massas de ar do equador para os pólos. Este processo é o responsável pelo denominado sistema global de ventos.

Sobrepostos aos ventos globais existem distribuições locais de vento originadas por inúmeros fatores, dentre os quais dois se destacam para as finalidades que temos em mente: as circulações Mar-Terra e Montanha-Vale. No caso da circulação Mar-Terra trata-se de um sistema de vento de periodicidade diária nas regiões de costa marítima e de forma menos intensa nas regiões de lagos de grande porte. Nestas regiões, durante o dia a terra aquece mais rapidamente do que a superfície das águas. Isto origina uma elevação das massas de ar na terra que sobem e são direcionadas ao mar. Simultaneamente, estas massas de ar frio são direcionadas para a costa, originando um vento frio carregado de umidade, conhecido como vento marino. Durante a noite este processo se inverte, devido ao fato de que a terra resfria mais rapidamente do que o mar. Estes ventos noturnos são menos intensos devido ao fato de que são detidos pelas irregularidades do terreno e também pela vegetação existente nas terras da costa.

Nas regiões montanhosas são formados diversos tipos de fluxos locais de vento originados também em diferenças térmicas e nas características do terreno. Existem ventos de ladeiras, cuja direção muda do dia para a noite.

Outra fonte de variação dos ventos é o atrito das massas de ar com a superfície originada no processo de fricção das massas de ar com o solo. Esta região é denominada camada limite atmosférica e origina uma variação do perfil de velocidades.

Os equipamentos de geração de energia eólica trabalham precisamente dentro da camada limite atmosférica. Dependendo da rugosidade do terreno, do perfil vertical de temperatura e da velocidade do vento, a altura da camada limite atmosférica varia de forma significativa. Em geral, é considerada uma altura média desta camada limite atmosférica de aproximadamente 1.000 metros.

Devido às influências mencionadas, a intensidade e direção dos ventos variam significativamente, tornando necessária uma seleção criteriosa para a instalação de geradores eólicos.

2.2 Caracterização da energia disponível nos ventos

A energia disponível no vento é originada na energia cinética existente nas massas de ar em movimento e pode ser expressa pela Eq. (1)

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Nesta equação m é a massa de ar e v a velocidade do ar.

A potência ($Pot.$) do vento que atravessa uma superfície de controle F numa corrente de vento que pode ser expressa pela variação da energia no tempo conforme é mostrado na Eq. (2)

$$Pot. = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) v^2 = \frac{1}{2} \rho F v^3 \quad (2)$$

Sendo ρ a densidade da massa de ar.

Para calcular a potência que um rotor de um gerador elétrico pode extrair de uma massa de ar que incide com uma velocidade v no rotor, pode ser utilizado o modelo de Betz (Gasch, 2007). Neste modelo, é considerado um fluxo ideal de vento cuja velocidade antes de se chocar às pás do rotor é v_1 , a velocidade v_2 é a que chega ao equipamento E a que sai deste é a velocidade v_3 . A Fig. 1 mostra o fluxo de corrente incidente num rotor de acordo com o modelo de Betz (Gasch, 2007).

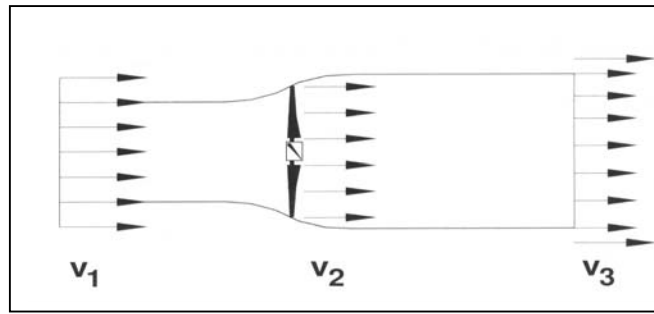


Figura 1 – Fluxo de corrente de acordo com o modelo de Betz

De acordo com este modelo, a potência que pode ser extraída do motor é definida pela seguinte Eq (3)

$$Pot_{rotor} = \frac{1}{2} \rho F v_1^3 \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \left(1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right) \right] = \frac{1}{2} \rho F v_1^3 C_p Betz \quad (3)$$

Onde v_1 é a velocidade do vento e v_3 a velocidade que sai do rotor. Assim, $C_{p, Betz}$ pode ser definido por:

$$CpBetz = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \left(1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right) \quad (4)$$

O valor máximo deste coeficiente, $C_{p, Betz} = 0,59$, é atingido para a seguinte relação:

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3}$$

Implicando que a máxima energia possível de se extrair fica em torno de 60% da energia contida na massa de ar. O modelo, porém, não considera as perdas aerodinâmicas existentes no rotor e perdas devidas aos torques reativos nas pás do rotor. Para considerar estas perdas introduz-se um coeficiente de eficiência real, $C_{p, real}$, (Gasch, 2007) que depende do tipo de perfil aerodinâmico utilizado no rotor, do número de pás e da relação entre a velocidade máxima tangencial no rotor e de incidência do vento (v_1). A Fig.2 mostra o diagrama de variação de $C_{p, real}$ em função dos parâmetros mencionados.

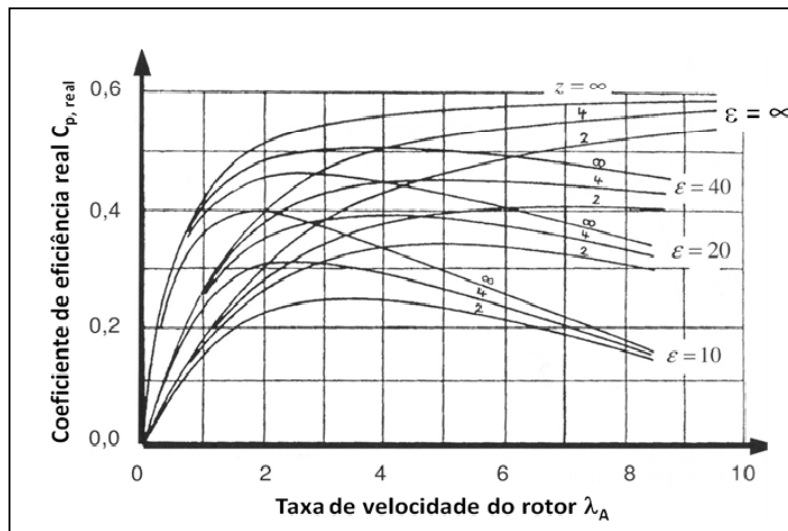


Figura 2 – Variação do coeficiente de eficiência real de um rotor $C_{p, real}$

Nesta figura 2 λ_A é a taxa de velocidade na ponta da pá e é definida pelo quociente entre a velocidade tangencial máxima do rotor e a velocidade incidente da massa de ar (v_1),

$$\lambda_A = \frac{\omega R}{v_1} \quad (5)$$

Sendo ω a velocidade angular do rotor e R o raio do rotor. O parâmetro ε da Fig.4 é denominado coeficiente de deslizamento e é a relação entre a força de sustentação e a força de arrasto do perfil aerodinâmico utilizado no rotor. Onde:

$$\varepsilon = \left(\frac{\text{Força de Sustentação}}{\text{Força de Arrasto}} \right)_{\text{perfil}} \quad (6)$$

Observa-se na Fig. 2 que a eficiência máxima real do rotor pode variar significativamente dependendo do tipo de perfil aerodinâmico utilizado (ε), do diâmetro do rotor (λ_A) e do número de pás do rotor (z). Para perfis aerodinâmicos eficientes, com valores de ε superiores a 40, mais precisamente, ε infinito e taxas de velocidade do rotor λ_A superiores a 5 ou 6, é possível atingir coeficientes de eficiência máxima de 0,55, ou seja, na melhor das condições construtivas do rotor é possível extrair no máximo 55% da potência existente na massa incidente de ar.

2.3 Influência de fatores eletromecânicos na transformação da energia disponível no rotor em energia elétrica

Os geradores de energia eólica são atualmente utilizados para gerar energia elétrica. Para transformar a potência disponível no rotor em potência elétrica fornecida à rede elétrica devem ser utilizados equipamentos mecânicos e elétricos, tais como redutores de velocidades, geradores elétricos, sistemas de freio para controlar a velocidade de rotação da hélice, etc. Todos estes consomem parte da energia disponível no rotor em perdas mecânicas decorrentes de fricção entre componentes mecânicos, perdas elétricas devido a aquecimento de condutores (efeito Joule) e perdas indutivas nos diversos componentes do sistema elétrico entre outras perdas inerentes aos sistemas eletromecânicos necessários para a transformação da potência existente no rotor em potência fornecida à rede.

Com esta finalidade, foi implementado no LAER (Petry et al, 2006), Laboratório de Energias Renováveis do NUTEMA (Núcleo Tecnológico de Energia e Meio Ambiente), uma bancada de testes para geradores de pequeno porte, onde foram medidas as perdas observadas nos geradores elétricos utilizados em geradores eólicos de pequeno porte. Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 3:

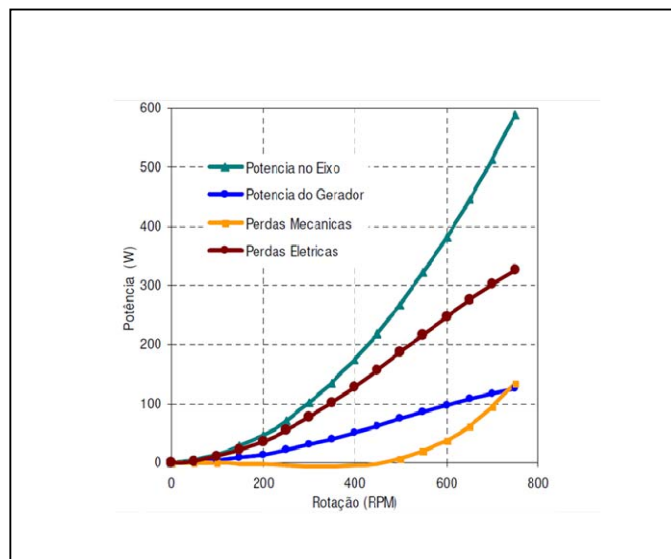


Figura 3 – Comparação entre a potência e as perdas num gerador elétrico (Petry et al, 2006)

Pode-se observar na Fig.3 que as perdas mecânicas são muito inferiores às perdas observadas nos sistemas elétricos. Este é um dos motivos que limitam os projetos dos geradores eólicos, já que rotações elevadas geram perdas significativas nos diversos componentes eletromecânicos, necessários para transformar a energia disponível no rotor do gerador eólico em energia elétrica. Os dados apresentados na Fig.3 não podem ser considerados como definitivos para avaliar as perdas nos geradores eólicos de grande porte, já que foram obtidos em geradores de pequeno porte.

2.4 Influência de fatores operacionais na eficiência energética de sistemas de geração de energia eólica

Apesar das perdas aerodinâmicas e por transformação da energia do rotor em elétrica serem muito significativas, ainda não podemos garantir que toda a energia cinética no vento transformada em energia elétrica vai ser fornecida com eficiência máxima à rede elétrica. Nos sistemas modernos de geração eólica, o principal problema operacional que limita a eficiência dos parques eólicos é a forte incidência de paradas imprevistas por manutenção e os altos custos de manutenção ao longo da vida útil dos geradores. A Fig.4 apresenta a evolução dos custos operacionais dos geradores eólicos com a idade dos equipamentos (Gasch, 2007)

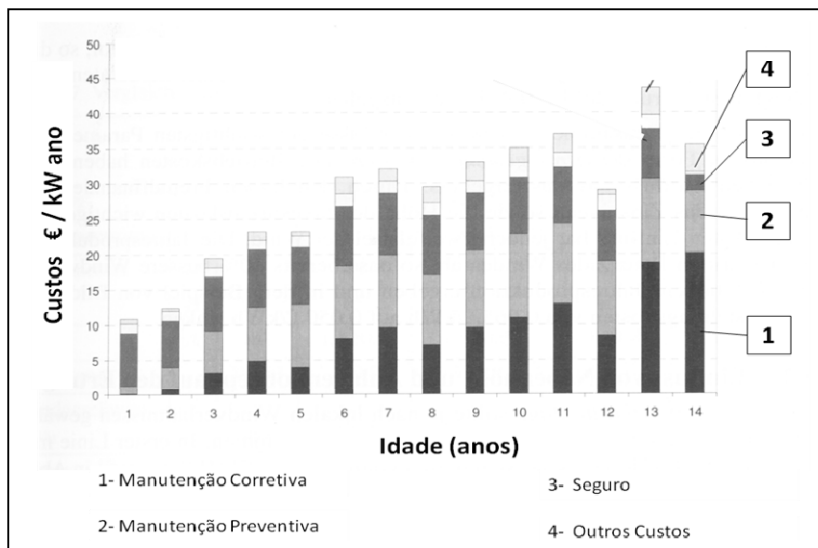


Figura 4 – Evolução dos custos operacionais anuais das centrais eólicas

Pode-se observar na Fig.4 que depois de uma década de operação os custos operacionais, ou seja, custos com a manutenção corretiva, preventiva, seguros e outros custos necessários para se produzir energia, percebe-se que estes chegam a quadruplicar. E pode-se observar também que um maior aumento de custos está ligado à manutenção corretiva.

Para avaliar o impacto global dos fatores operacionais na geração de energia eólica serão utilizados dados reais fornecidos pela Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG) relativos à sua estação piloto de energia eólica, como produção total em quilowatt, horas efetivas de produção e horas disponíveis, período de calmaria, etc.

A Usina Eólico-Elétrica Experimental (UEEE) 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 principal finalidade 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 implantação do parque eólico, tais como o melhor regime de ventos, presença de uma rede de transmissão e de uma infra-estrutura civil já desenvolvida. A UEEE do Morro do Camelinho é composta de quatro aero geradores (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 tais como: partida e parada das turbinas, sinalização de eventos de erros como sobre tensão 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 Paraúna-

Gouveia, que passa a 500 metros da subestação. A Usina foi instalada a 1.350 metros de altitude, a 240 km ao norte de Belo Horizonte. Os ventos mais frequentes são provenientes da região de alta pressão situada no Oceano Atlântico e têm como origem predominante a direção leste (66 %). Na Tab.1 é mostrada a distribuição de ventos medida em cada aerogerador.

Tabela 1 - Distribuição de Frequência das Classes de Velocidade de Vento Sobre as Naceles (%) (Fonte CEMIG, 1998)

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

2.5 Quantificação da eficiência operacional dos aerogeradores utilizando o conceito OEE (Overall Equipment Efficiency)

Um dos problemas mais sérios para quantificar a eficiência de sistemas de produção é avaliar adequadamente todas as perdas que realmente afetem a operação. A JUSE (Japan Union of Scientists and Engineers) do Japão criou uma técnica de manutenção denominada TPM (Total Productive Maintenance) que tem como princípio eliminar todas as perdas existentes em sistemas de produção. Essas perdas podem ser classificadas em três tipos diferentes:

- Perdas por paradas de máquina
- Perdas por velocidades reduzidas de operação
- Perdas de qualidade (produtos defeituosos e retrabalho)

Para quantificar estes três tipos de perdas, a JUSE criou um indicador denominado OEE (Overall Equipment Efficiency) (Hansen, 2002) ou Eficiência Global de um Equipamento, que é calculado da seguinte maneira:

$$\text{OEE} = \text{Fator de Disponibilidade} \times \text{Fator de Velocidade} \times \text{Fator de Qualidade} \quad (7)$$

Fator de Disponibilidade (A):

O Fator de Disponibilidade é calculado em função do tempo calendário e o tempo de paradas, seja por paradas programadas (manutenção preventiva ou ajustes de produção), falhas em equipamentos (manutenções corretivas) ou problemas de processo. Este fator é calculado através da seguinte relação,

$$A = \frac{\text{TempoCalendário} - \text{TempodeParadas}}{\text{TempoCalendário}} \quad (8)$$

Fator de Desempenho (B):

O Fator de Desempenho é calculado com base no tempo operacional efetivo considerando um tempo padrão unitário e no tempo operacional (tempo calendário - tempo de paradas), e a fórmula é como segue:

$$B = \frac{\text{TempoPadrão} \times N^{\circ} \text{ de Pr odutos Pr oduzidos}}{\text{TempoCalendário} - \text{TempodeParadas}} \quad (9)$$

Fator de Qualidade (C):

Através do Fator de Qualidade, demonstra-se que a qualidade do produto tem influência direta no rendimento da produção. O Fator de Qualidade é calculado com base no tempo de eficaz operação, ou seja, tempo de produção de qualidade padrão e no tempo operacional.

$$C = \frac{N^{\circ} \text{ de Pr odutos Pr oduzidos} - N^{\circ} \text{ de Pr odutos Re jeitados}}{N^{\circ} \text{ de Pr odutos Pr oduzidos}} \quad (10)$$

2.6 Cálculo do OEE nos aero geradores do complexo de Morro do Camelinho

O objetivo é determinar as perdas operacionais observadas na geração do parque eólico de Morro do Camelinho da CEMIG, utilizando o conceito de Eficiência Global de um Equipamento de forma a quantificar todas as perdas observadas na geração deste parque eólico.

Na Tab.2 são mostrados os dados operacionais fornecidos pela CEMIG em relação à produção dos quatro aerogeradores existentes no parque eólico de Morro do Camelinho, os quais compreendem o período de agosto de 1994 até junho de 1997. A coluna (I) desta tabela indica a produção total mensal das quatro unidades geradoras em kW. A coluna (II) as horas efetivas de produção, ou seja, as horas reais de produção descontando todo tipo de parada nos aerogeradores. A coluna (III) corresponde às horas disponíveis nos quatro aero geradores que seriam as horas calendário menos o percentual de calmaria de cada mês. A calmaria corresponde a períodos de tempo onde a intensidade do vento é inferior a 3,33 m/s, de acordo com as informações fornecidas pela CEMIG. O tempo padrão foi obtido como o menor quociente entre as horas efetivas produzidas (coluna II) e a produção total de cada mês (coluna I). Este valor corresponde a 3,57 hr/kW e foi utilizado para o cálculo do coeficiente de desempenho [B].

Com base nestes dados foram calculados os coeficientes do OEE utilizando as seguintes relações:

$$A = \frac{\text{ColunaII}}{\text{ColunaIII}} \quad (11)$$

$$B = \text{TempoPadrão}(3,57 \text{ hr} / \text{kW}) \frac{\text{Coluna(I)}}{\text{Coluna(II)}} \quad (12)$$

$$C = 1 \text{ (não foram consideradas perdas de qualidade de energia)} \quad (13)$$

$$OEE = A \times B \times C \quad (14)$$

Tabela 2. Dados fornecidos pela CEMIG e resultados do cálculo de OEE para os 4 aerogeradores do Morro do Camelinho

Mês	(I) Produção Total KW	(II) Horas efetivas de produção	Horas calendário	Calmaria [%]	(III) Horas disponíveis	(IV) Tempo Padrão [hr/KW]	Fator de Disponibilidade [A]	Fator de Desempenho [B]	Fator de Qualidade [C]	OEE = AxBxC
ago94	28,816	209,75	744	6,70	659,44	7,28	0,32	0,49	1,00	0,16
set94	133,343	610,75	720	9,00	622,44	4,58	0,98	0,78	1,00	0,77
out94	127,697	575,00	744	13,60	610,68	4,50	0,94	0,79	1,00	0,75
nov94	43,618	307,00	720	9,60	618,34	7,04	0,50	0,51	1,00	0,25
dez94	12,698	88,75	744	18,30	577,46	6,99	0,15	0,51	1,00	0,08
jan95	12,735	190,00	744	12,40	619,16	14,92	0,31	0,24	1,00	0,07
fev95	24,372	248,25	672	13,50	552,22	10,19	0,45	0,35	1,00	0,16
mar95	33,246	245,00	744	13,80	609,26	7,37	0,40	0,48	1,00	0,19
abr95	0	0,00	720	11,80	603,29	10000,00	0,00		1,00	
mai95	15,297	196,00	744	17,04	586,36	12,81	0,33	0,28	1,00	0,09
jun95	46,617	373,25	720	13,50	591,66	8,01	0,63	0,45	1,00	0,28
jul95	97,608	485,25	744	9,60	638,95	4,97	0,76	0,72	1,00	0,55
ago95	90,651	461,00	744	6,70	659,44	5,09	0,70	0,70	1,00	0,49
set95	121,385	433,75	720	9,00	622,44	3,57	0,70	1,00	1,00	0,70
out95	56,227	366,00	744	13,60	610,68	6,51	0,60	0,55	1,00	0,33
nov95	56,15	351,50	720	9,60	618,34	6,26	0,57	0,57	1,00	0,32
dez95	56,32	377,50	744	18,30	577,46	6,70	0,65	0,53	1,00	0,35
jan96	42,301	357,75	744	12,40	619,16	8,46	0,58	0,42	1,00	0,24
fev96	38,039	272,25	696	13,50	571,94	7,16	0,48	0,50	1,00	0,24
mar96	46,2004	438,00	744	13,80	609,26	9,48	0,72	0,38	1,00	0,27
abr96	75,1643	502,50	720	11,80	603,29	6,69	0,83	0,53	1,00	0,45
mai96	38,93	405,50	744	17,04	586,36	10,42	0,69	0,34	1,00	0,24
jun96	68,188	421,50	720	13,50	591,66	6,18	0,71	0,58	1,00	0,41
jul96	61,2283	483,75	744	9,60	638,95	7,90	0,76	0,45	1,00	0,34
ago96	57,9288	207,00	744	6,70	659,44	3,57	0,31	1,00	1,00	0,31
set96	104,7139	467,00	720	9,00	622,44	4,46	0,75	0,80	1,00	0,60
out96	85,7381	542,25	744	13,60	610,68	6,32	0,89	0,57	1,00	0,50
nov96	127,9983	569,50	720	9,60	618,34	4,45	0,92	0,80	1,00	0,74
dez96	52,9816	547,75	744	18,30	577,46	10,34	0,95	0,35	1,00	0,33
jan97	65,4579	528,25	744	12,40	619,16	8,07	0,85	0,44	1,00	0,38
fev97	135	592,00	672	13,50	552,22	4,39	1,00	0,81	1,00	0,87
mar97	122	611,50	744	13,80	609,26	5,01	1,00	0,71	1,00	0,72
abr97	80,88	574,25	720	11,80	603,29	7,10	0,95	0,50	1,00	0,48
mai97	35,97	236,75	744	17,10	585,94	6,58	0,40	0,54	1,00	0,22
jun97	39,36	391,00	720	13,50	591,66	9,93	0,66	0,36	1,00	0,24
							Valores Médios			
					Tempo Padrão	3,57	0,64	0,56	1,00	0,39

A Fig.5 mostra a evolução do OEE no período em análise para todos os aero geradores do Morro do Camelinho

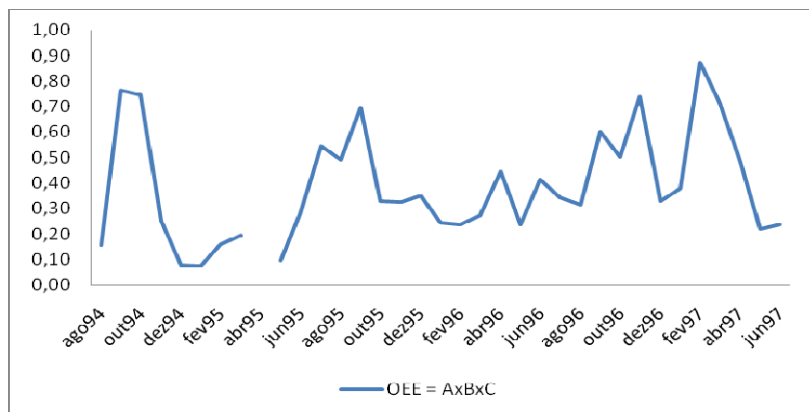


Figura 5 – Variação da Eficiência Operacional Global (OEE) dos quatro aero geradores do parque eólico Morro do Camelinho

Pode-se observar na Fig.5 que a eficiência operacional global dos aero geradores do Morro do Camelinho foi inferior a 80% durante todo o tempo analisado. A eficiência média foi de 0,39, ou seja, as perdas médias de produção foram superiores a 60% neste período de operação. A disponibilidade média foi de 64% (fator A do OEE) e o fator de desempenho que mede as perdas por velocidade reduzida de produção foi de 56% (fator B).

De acordo com as metas colocadas pela JIPM, teria que ser atingida uma eficiência global superior a 90%.

As perdas de produtividade observadas são originadas em paradas imprevistas de manutenção e baixas velocidades de operação dos aero geradores. Entre os aspectos fundamentais, que devem ser analisados, se encontra a análise crítica dos procedimentos de manutenção (Castro, 2006), já que paradas imprevistas devem ser eliminadas através de monitoramentos preventivos e preditivos eficazes que monitorem a condição física dos aero geradores e antecipem o acontecimento de quebras e falhas imprevistas nos diversos sistemas dos aero geradores. Outro ponto importante, que merece ser observado, é a variação dos ventos já que, como pode ser visto na Tab.1, existe uma variação nas correntes de vento, que podem explicar os baixos fatores de desempenho B do OEE, que respondem por velocidades reduzidas de produção.

2.7 Conclusões

A energia eólica é uma das fontes de energia mais promissoras para o futuro e, no presente, sua aplicação está crescendo significativamente na Europa e nos Estados Unidos. Um aspecto a ser considerado neste tipo de geração de energia é a adequada gestão operacional dos parques eólicos já que, em geral, vários geradores são instalados num mesmo local de forma a maximizar o aproveitamento da energia dos ventos. Neste trabalho foi mostrado que num parque eólico existem três grandes tipos de perdas: as perdas devido a fatores aerodinâmicos que reduzem a energia disponível nas massas de ar em um fator que pode superar os 60%. As perdas, também muito significativas e podem superar 50% da energia disponível no rotor. Assim, a energia que chega à rede não supera a 25% da energia disponível nas massas de ar. Mas neste trabalho foi mostrado que ainda existe uma terceira fonte de perdas no processo de geração de energia eólica, que é originado em fatores operacionais, ou seja, paradas imprevistas de máquina, perdas de velocidade, etc. Que podem ainda reduzir a energia gerada pelo parque eólico em fatores superiores a 50%.

Assim, o coeficiente de eficiência global OEE mostrou ser um parâmetro adequado para a avaliação de todas as perdas operacionais num parque eólico, tais como paradas de produção, velocidade reduzida de produção e perdas por qualidade. Dos três tipos de perdas mencionados: aerodinâmicas, de transformação de energia mecânica em elétrica e operacional, destas, as únicas que podem ser gerenciadas durante a vida útil dos parques eólicos são as de caráter operacional, já que as duas primeiras são definidas no projeto das instalações e uma vez erguido o parque eólico é praticamente impossível sua redução. Assim, para a utilização do OEE (Overall Energy Efficiency) em sistemas de geração de energia eólica foi necessário criar uma adaptação do OEE (Overall Equipment Efficiency) atualmente utilizado nas indústrias. Entretanto, feita essa adaptação com suas significativas modificações, conseguiu-se obter um indicador totalmente voltado para mostrar a eficiência de sistemas eólicos energéticos. Essa reformulação é inédita na literatura e exclusivamente desenvolvida para a produção de energia eólica.

Este trabalho será continuado, com o objetivo de investigar as causas raízes das falhas operacionais e determinar ações adequadas para sua eliminação ou bloqueio.

Agradecimentos

À CEMIG, pelo fornecimento dos dados operacionais do parque eólico de Morro do Camelinho.

REFERÊNCIAS

- Castro D. E.; Pinheiro M. A., "A simple but effective approach to control the performance of maintenance processes", MARCON 2006 Conference, Maintenance and Reliability Center - University of Tennessee - USA - 2006.
- CEMIG. Usina Eólio-Eletrica Experimental do Morro do Camelinho - Relatório de Desempenho Operacional, 1998.
- Dewi/Cemig. Power Quality Measurement and Wind Turbine Operational Improvement at Cemig Morro do Camelinho Wind Farm, 1997.
- Gasch R., Twele J., "Windkraftanlagen- Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb" (equipamentos de geração de energia eólica: Conceitos básicos, Projeto, Planejamento e Operação), Editora B.G.Teubner, Wiesbaden 2007.
- Gazeta Mercantil, "Eólica offshore, a mina de ouro da Alemanha" - Jun/2007. Disponível em: http://www.eletrosul.gov.br/gdi/gdi/index.php?pg=cl_abre&cd=gemb88BOclk-14k. Acesso em: 29 Jan. 2009, 17:10.
- Geller H. S., "Revolução Energética, Políticas para um Futuro Sustentável". Relume Dumará. Ed. 1, p.142-206, 2003.
- Hansen R. C., "Eficiência Global dos Equipamentos", obra originalmente publicada sob o título Overall Equipment Effectiveness: a powerful production/maintenance tool for increased profits, Industrial Press Inc. - New York, 2002.
- Leite, A.; Falcão D.; Borges C., "Modelagem de Usinas Eólicas para Estudos de Confiabilidade". *Revista Controle e Automação*, v.17n2, p.177-186, abril, maio e junho 2006.
- Lobo, A.R., Alvarenga C.A., Lisboa A.H.. Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho - XIII SNPTEE. 1995. BRASIL."Estudos sobre Aproveitamento de Energias Solar e Eólica em Minas Gerais" - Fase 1. 1987, CEMIG. "Levantamento de sítios eólicos em Minas Gerais" - Relatório Interno. 2001.
- Petry M. R., Konzen G., Ale V. J., "Ensaio Laboratorial para testes em bancada de geradores eólicos de pequeno porte", IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2006.

Phalnikar, S., “Alemanha planeja construir seu primeiro parque eólico marítimo“, Jul/2008. Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2008/07/17/alemanha-planeja-construir-seu-primeiro-parque-eolico-maritimo/> - 76k. Acesso em: 29 Jan. 2009, 17:03.

Usher A. P., “Uma História das Invenções Mecânicas”, editado pela primeira vez em 1929 e reproduzido no Brasil pela editora Papyrus Ciência.

ANALYSIS OF PRODUCTIVE EFFICIENCY LOSSES IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS (WECS)

Abstract. *The increasing demand for renewable energy sources joined to the increase in the energy consumption of the last decades and the higher quality requirements of the supplied energy are the basic aspects to be considered for the energy generation in the next years. The wind energy is becoming one of the more attractive options. Some positive points such as its low environmental impact and the use of renewable resources make countries like USA and many European Countries to invest in this energy source. There are, however, critical points that must be analyzed as the impact of the variability in the generation due to climatic oscillations and the high operational costs due to maintenance of the different components of the wind generation systems that increase significantly with the running time and can lead to make economically impracticable the operation of this type of power plants. This work aims to develop a method to evaluate the productive efficiency of wind energy generation systems considering aspects like the incidence of winds (probabilistic prospection) as well as operational aspects (maintenance, monitoring and inspection). The concept of Global Equipment Efficiency or OEE (Overall Equipment Efficiency) developed by the JIPM (Japan Union of Scientists and Engineers) will be used. This concept was developed to measure the efficiency losses in productive systems due to breakdowns, low operation speeds and poor quality. One of the primary objectives of this work is to develop a methodology to evaluate the global losses of the wind generation systems and to optimize maintenance processes considering low wind incidence time periods to make preventive maintenance allowing to maximize the productivity of the wind generation systems.*

Key words: wind power, maintenance, reliability, overall efficiency