

ANÁLISE DAS PERDAS DE EFICIÊNCIA PRODUTIVA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA UTILIZANDO O COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA GLOBAL OEE DO TPM

Daniel E. Castro, PhD. (1)

Cláudio C. Pellegrini, PhD. (2)

Alexandre Heringer Lisboa (3)

Shirley Mota Pedreira (4)

Resumo

A crescente demanda por fontes renováveis de energia junto com o aumento no consumo de energia das últimas décadas e as exigências cada vez maiores em relação à qualidade da energia fornecida são 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 devido ao seu baixo impacto ambiental. 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, que aumentam significativamente com o tempo de operação e podem chegar a inviabilizar economicamente este tipo de fontes de energia. Este trabalho visa desenvolver um método para avaliar a eficiência produtiva de sistemas de geração de energia eólica, considerando aspectos climáticos e também aspectos operacionais (manutenção, monitoramento e inspeção). Será utilizado o conceito de Eficiência Global de Equipamento ou OEE (Overall Equipment Efficiency), desenvolvido pela JIPM (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. Um dos objetivos primários deste trabalho é desenvolver uma metodologia para avaliar as perdas globais dos sistemas de geração eólicos e otimizar os processos de manutenção, visando maximizar a produtividade dos sistemas de geração de energia eólica.

(1)- CEFET-MG – Professor de ensino superior e Coordenador de Grupo de pesquisa

(2)-UFSJ – Universidade de São João Del Rey – Professor de Ensino Superior

(3)- CEMIG – Gerente de Sistemas de Geração de Energia Eólica

(4)-CEFET-MG – Aluna do curso de Mestrado de Engenharia de Energia

Abstract

The increasing demand for renewable energy sources joined to the increase in the last decades of energy consumption and the higher quality requirements of energy supply are the basic aspects to be considered for energy generation in the next years. Eolic energy is becoming one of the more attractive options due to its low environmental impact. 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 eolic 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 eolic energy generation systems considering aspects like the incidence of winds 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 eolic generation systems and to optimize maintenance processes in order to maximize the productivity of eolic generation systems.

1 - Caracterização do Problema

O acelerado crescimento econômico mundial e a crescente necessidade da sociedade moderna de transformar matérias primas em produtos e serviços de maior valor agregado exigem capacidades de geração e de transmissão de energia cada vez maiores. Neste contexto, a produção de energia deveria ser capaz de atender princípios básicos de sustentabilidade (preservação do meio ambiente, utilização de recursos renováveis, etc.), e de desempenho técnico (alta eficiência de produção, minimização de perdas, alta confiabilidade, baixo risco, etc.). Entre todos os aspectos mencionados anteriormente, o mais importante a ser considerado é, sem dúvida, o relativo à sustentabilidade. A questão ambiental está sendo bastante valorizada quanto à escolha futura de uma forma de energia. A utilização de fontes não renováveis de energia nas últimas décadas levou o planeta a um limite nas condições de sobrevivência de todas as espécies. Aquecimento climático e esgotamento de recursos não renováveis como o petróleo estão exigindo uma mudança radical 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. Com base no exposto, este trabalho analisa uma fonte renovável de energia, que está sendo cada vez mais aplicada em países do primeiro mundo, especialmente na Europa, que é a energia eólica. Países como Alemanha têm atualmente mais de 18.000 geradores eólicos com uma produção de 18.500 MW, o que representa aproximadamente 6% do consumo energético total do país. 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, já que não é possível armazenar a energia dos ventos. Assim, a gestão de um sistema de geração eólico teria que otimizar a disponibilidade da instalação nas épocas de máxima incidência dos ventos. As atividades de manutenção e teste deveriam acontecer somente quando a incidência dos ventos for baixa. Isto significa que os planos de manutenção devem ser ajustados às condições ambientais e mesmo neste contexto, teriam que garantir a eficiência funcional máxima da instalação nas épocas de ventos

mais propícios. Um dos pontos mais críticos na operação deste tipo de sistemas de geração de energia é o alto custo operacional. Nestes sistemas, os custos de manutenção são, de modo geral, três vezes superiores aos custos de manutenção em sistemas convencionais de geração de energia. É necessário investir em sistemas sofisticados de diagnóstico da condição de elementos mecânicos (pás, redutores, geradores, etc.) e não é fácil a substituição e reparo destes sistemas, que demandam ações demoradas e que interferem significativamente no ciclo produtivo do equipamento. Por este motivo, o objetivo deste trabalho é fazer um levantamento de todos os fatores envolvidos na disponibilidade e eficiência de produção dos sistemas de geração eólica. 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

A atmosfera terrestre pode ser considerada como uma gigantesca máquina térmica, onde as massas de ar são transportadas de forma constante devido aos diferentes potenciais térmicos existentes sobre a superfície do planeta. A fonte de energia desta máquina térmica é o sol. Devido à forma esférica do planeta, a irradiação solar é máxima no equador, diminuindo em direção aos pólos. Desta forma, existe um excesso de energia térmica no equador e um déficit nos pólos e para equilibrar este processo é gerado 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. A figura 1 mostra a distribuição dos ventos globais no planeta. Pode-se observar que em cada hemisfério existem três regiões: a tropical, a temperada e a polar. A região tropical se estende do equador até o paralelo de 30° em cada hemisfério. Nesta região se forma uma corrente ascendente de ar quente e úmido que se direciona até as regiões polares. Devido à rotação da terra, estas massas de ar são desviadas para o oeste. Aproximadamente no paralelo de 30° estas massas descem mais frias e secas e são novamente direcionadas para o equador, gerando um fluxo global de ar denominado Circulação de Hadley (Gasch, 2007). A região temperada se estende aproximadamente entre os paralelos de 30° e 60° , onde predominam ventos ciclônicos na direção oeste. Finalmente, na região polar existem correntes frias predominantemente direcionadas para o leste.

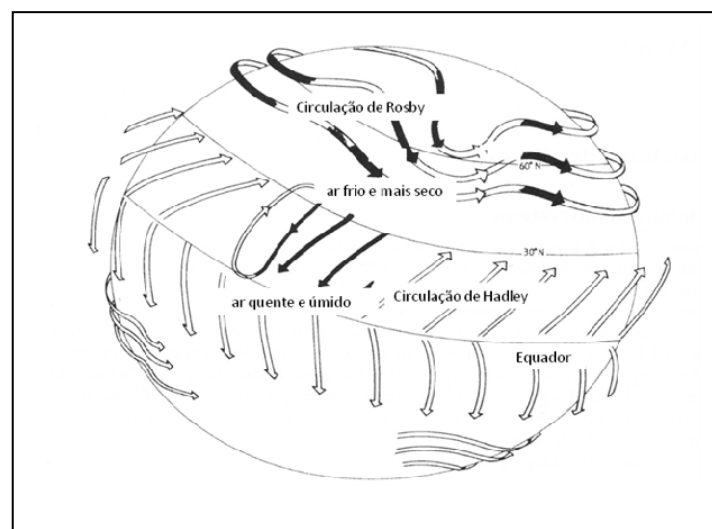


Figura 1 – Distribuição dos ventos globais

Sobrepostos aos ventos globais, existem distribuições locais de vento originadas principalmente por dois fatores: circulação Mar-Terra e Circulação 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 pelo 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. A figura 2 mostra o princípio dos ventos locais gerados entre Mar e Terra.

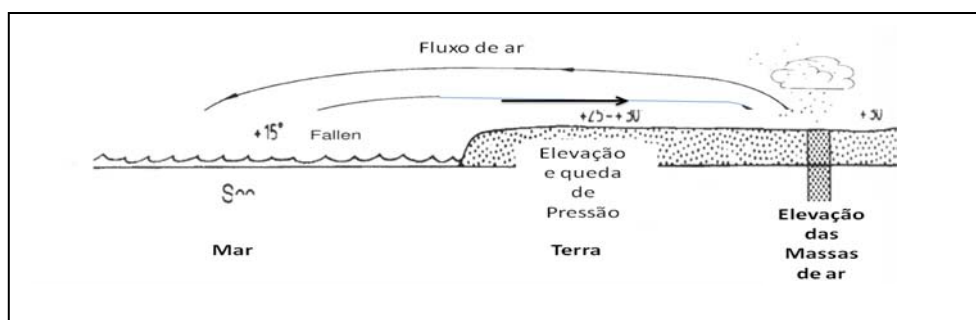


Figura 2 – Origem dos ventos e brisas marinas

Nas regiões de montanha 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. A figura 3 mostra os principais sistemas de ventos em regiões de montanha. Pode-se observar que, durante o dia, as correntes no vale e nas ladeiras da montanha são ascendentes e durante a noite são descendentes.

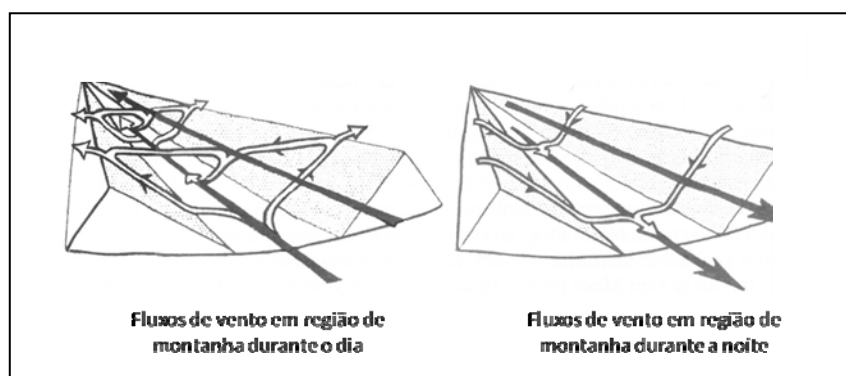


Figura 3 – Fluxos de vento em regiões de montanha

Além dos aspectos mencionados anteriormente, existe uma terceira fonte de variação dos ventos, 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, como mostrado na figura 4.

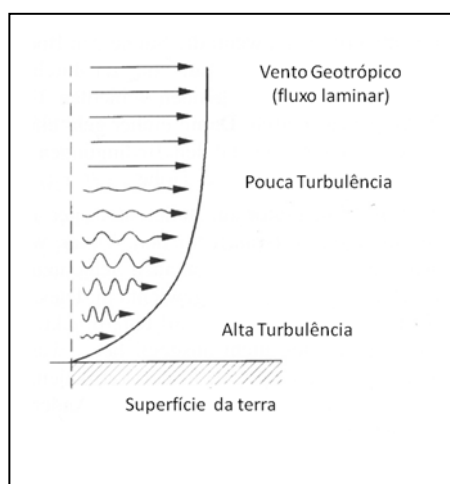


Figura 4 – Variação do perfil de ventos devido à camada limite atmosférica

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. Durante uma noite clara, a altura da camada limite pode atingir 100 metros e durante um dia de sol e com velocidades relativamente baixas de vento pode atingir até 2.000 metros de altura. Em geral, é considerada uma altura média desta camada limite atmosférica de aproximadamente 1.000 metros.

Devido a todas as influências mostradas anteriormente e a superposição do sistema global e sistemas locais de vento, a intensidade e direção dos ventos variam significativamente. Por este motivo, é necessário selecionar um local adequado para a instalação de geradores eólico para maximizar a intensidade dos ventos e também minimizar as influências negativas que possam interferir com o fluxo dos ventos como, por exemplo, a presença de edificações, plantações, etc.

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 seguinte equação

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Onde m é a massa de ar em movimento e v a velocidade desta massa de ar.

A potência do vento medida através de uma superfície de controle F numa corrente de vento pode ser expressa pela variação da energia no tempo

$$\text{Pot} = dE/dt = \frac{1}{2} [dm/dt] v^2 = \frac{1}{2} \rho F v^3$$

Sendo ρ a densidade da massa de ar.

Para considerar inicialmente a potência que um rotor de um gerador de energia eólica 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 que incide com uma velocidade v_1 num rotor, chegando ao rotor a uma velocidade v_2 . O rotor atua como um elemento de absorção de energia, de forma que a

velocidade na saída do rotor diminui a um valor v_3 , inferior ao valor v_1 . A figura 5 mostra o fluxo de corrente incidente num rotor de acordo com o modelo ideal de Betz (Gasch, 2007).

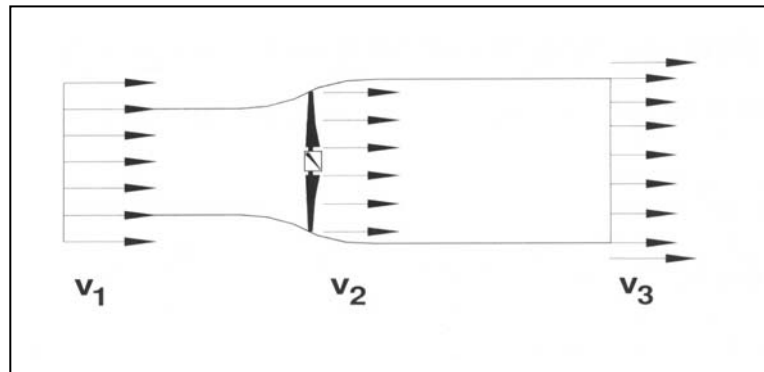


Figura 5 – Fluxo de corrente de acordo com o modelo de Betz

De acordo com este modelo, a potência que pode ser extraída do motor é definida pela seguinte expressão

$$\text{Pot}_{\text{rotor}} = \frac{1}{2} \rho F v_1^3 \left[\frac{1}{2} (1+v_3/v_1) (1-v_3/v_1)^2 \right]$$

Esta equação pode também ser escrita da seguinte forma

$$\text{Pot}_{\text{rotor}} = \frac{1}{2} \rho F v_1^3 C_{p,\text{Betz}}$$

Sendo $C_{p,\text{Betz}}$ um coeficiente de eficiência, que permite calcular a fração de potência, que é possível extrair num rotor sobre o qual incide uma massa de ar com uma velocidade v_1 . Este coeficiente é definido pela seguinte relação,

$$C_{p,\text{Betz}} = \left[\frac{1}{2} (1+v_3/v_1) (1-v_3/v_1)^2 \right]$$

O valor máximo deste coeficiente é atingido para uma relação $v_3/v_1=3$. Para esta relação, o coeficiente de eficiência atinge o seguinte valor,

$$C_{p,\text{Betz}} = 0,59$$

Isto significa que, de acordo com o modelo de Betz, a máxima energia, que é possível extrair de uma massa de ar através de um rotor, é de aproximadamente 60% da energia disponível na massa de ar incidente no rotor.

Este modelo não considera outras perdas existentes no processo de transformação de energia do vento em energia no rotor, como as perdas por fricção no perfil do rotor, perdas no extremo das pás do rotor por geração de vórtices e perdas devido aos torques reativos originados nas pás do rotor. Todos estes fatores reduzem ainda mais a energia que pode ser extraída do vento. Para considerar estas perdas é medido um coeficiente de eficiência real $C_{p,\text{real}}$ (Gasch, 2007) que depende do tipo de perfil aerodinâmico utilizado no rotor, do número de pás do rotor e da relação entre a velocidade máxima tangencial atingida no rotor e a velocidade de incidência do vento (v_1). A figura 6 mostra o diagrama de variação do coeficiente de eficiência real $C_{p,\text{real}}$ em função dos parâmetros mencionados anteriormente,

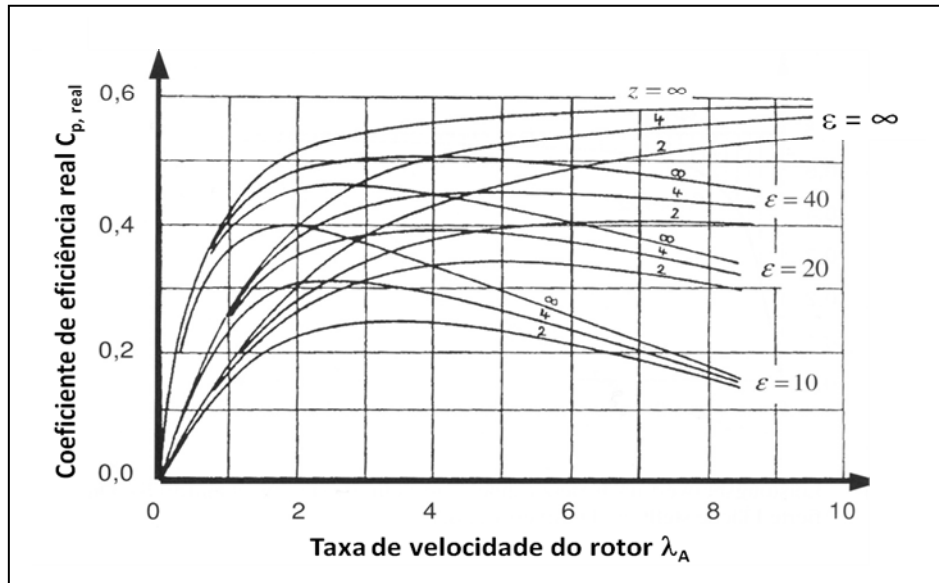


Figura 6 – Variação do coeficiente de eficiência real de um rotor $C_{p,real}$

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

$$\lambda_A = \omega R / v_1$$

Sendo ω a velocidade angular do rotor e R o raio do rotor.

O parâmetro ϵ da figura 6 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.

$$\epsilon = (\text{Força de Sustentação} / \text{Força de Arrasto})_{\text{perfil}}$$

Pode-se observar na figura 6 que a eficiência máxima real do rotor pode variar significativamente em função 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 e taxas de velocidade de rotor λ_A superiores a 5 ou 6, é possível atingir coeficientes de eficiência máximos 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. Pode-se concluir que as perdas totais no rotor devido aos fatores aerodinâmicos estão na faixa de 40 a 45% para perfis aerodinâmicos mais eficientes e rotores de grandes diâmetros, podendo atingir valores superiores a 60% no caso de rotores com perfis aerodinâmicas menos eficientes e pequenos diâmetros de rotor.

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. Na maioria dos casos são utilizados geradores de corrente alternada que alimentam diretamente a rede elétrica respeitando a frequência utilizada na rede (por exemplo, 50

Hz na Alemanha ou 60 Hz nos Estados Unidos). 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 componentes 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.

No que se refere aos geradores elétricos que são acoplados aos geradores eólicos, é necessário conhecer suas características elétricas e seu desempenho para diferentes faixas de rotações. Com esta finalidade, foi implementado no LAER (Petry et al, 2006), Laboratório de Energias Renováveis do NUTEMA, 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 seguinte figura:

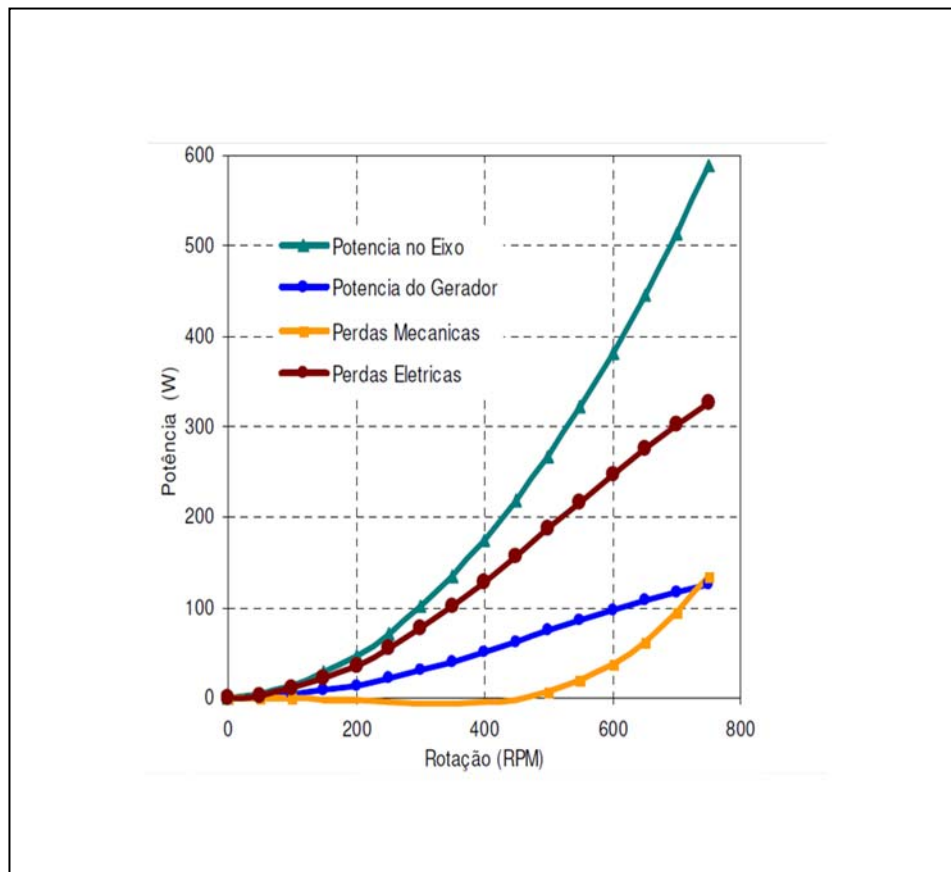


Figura 7 – Comparação entre a potência e as perdas num gerador elétrico (Petry, 2006)

Pode-se observar na figura 7 que as perdas mecânicas são muito inferiores às perdas nos sistemas elétricos. Ambas as perdas aumentam significativamente com a velocidade do rotor (velocidade no eixo). 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 figura 7 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. Entretanto, é importante observar que as perdas na transformação da potência no rotor em potência elétrica fornecida à rede elétrica são muito significativas e podem atingir valores entre 28% e 47% dependendo da rotação do rotor e devem ser cuidadosamente avaliadas na definição de uma central de energia eólica.

3-Influência de fatores operacionais na eficiência energética de sistemas de geração de energia eólica

Como detalhado nas seções anteriores, a potência máxima que pode ser extraída de uma massa de ar em movimento com uma velocidade média v_1 através de um rotor varia entre 40% e 60%. Para transformar esta energia obtida no rotor em energia elétrica, é necessário também pagar um alto preço, já que as perdas nos sistemas eletromecânicos envolvidos nesta transformação são também muito significativas (entre 27% e 47% aproximadamente).

Mas ainda não podemos garantir que toda a energia cinética no vento transformada em energia elétrica vai ser fornecida com eficiência máxima à rede elétrica. Existem ainda fatores operacionais envolvidos, que podem interferir significativamente na eficiência da energia global fornecida pelos parques de geração eólicos.

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 figura 8 apresenta a evolução dos custos operacionais dos geradores eólicos com a idade dos equipamentos (Gasch, 2007)

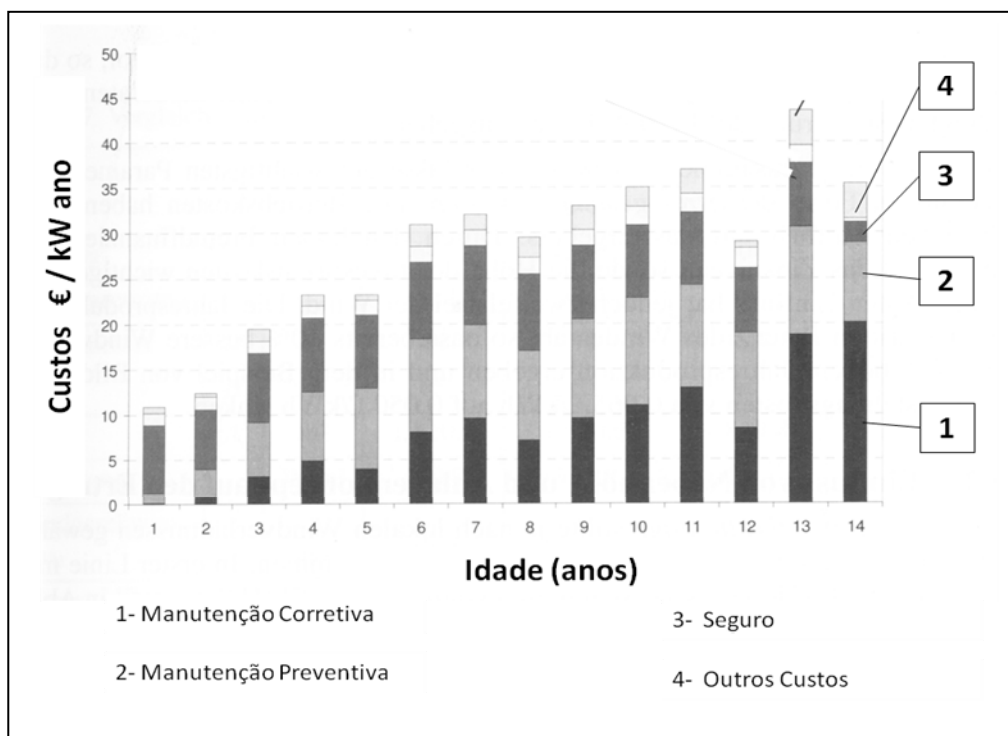


Figura 8 – Evolução dos custos operacionais anuais das centrais eólicas

Pode-se observar na figura 8 que depois de uma década de operação os custos operacionais chegam a quadruplicar. É evidente que esta evolução não é muito aceitável para nenhum sistema de produção. Na figura 8, pode-se observar também que o maior aumento de custos está ligado à manutenção corretiva. Este fato é bastante importante e merece muita atenção já que, em geral, o aumento de custos diretos com manutenção corretiva também está associado à perdas indiretas por indisponibilidade de equipamentos e perdas de produção de energia, que geralmente resultam em valores muito superiores aos custos diretos de manutenção.

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, localizada em Camelinho - Minas Gerais. A Usina Eólio-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 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. 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, dispensando a 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 Paraúna-Gouveia, que passa a 500 metros da subestação. 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 frequentes são provenientes da região de alta pressão, situada no Oceano Atlântico, e têm como origem predominante a direção leste (66 %). Na tabela 1 é mostrada a distribuição de ventos medida em cada aerogerador.

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

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

3.1-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 afetam a operação. No início da década de 1970 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. A JUSE chegou à conclusão que as perdas operacionais podem ser classificadas em 3 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:

$$\text{OEE} = \text{Fator de Disponibilidade} \times \text{Fator de Velocidade} \times \text{Fator de Qualidade}$$

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,

$$A = \frac{\text{Tempo Calendário} - \text{Tempo de paradas}}{\text{Tempo Calendário}}$$

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), como se segue:

$$B = \frac{\text{Tempo padrão} \times \text{N}^{\circ} \text{ de produtos produzidos}}{\text{Tempo calendário} - \text{Tempo de paradas}}$$

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 operação eficaz, ou seja, tempo de produção de qualidade padrão e no tempo operacional.

$$C = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de Prod. produzidos} - \text{N}^{\circ} \text{ de Prod. rejeitados}}{\text{N}^{\circ} \text{ de Prod. produzidos}}$$

3.2-Cálculo do OEE nos aerogeradores 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 tabela 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 dados compreendem o período de agosto de 1994 até junho de 1997. A coluna (I) desta tabela indica a produção total mensal dos quatro aerogeradores 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 aerogeradores, 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 hs/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:

$$A = \text{Coluna (II)} / \text{Coluna (III)}$$

$$B = \text{Tempo padrão (3,57 hs/kW)} \times \text{Coluna (I)} / \text{Coluna (II)}$$

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

$$\text{OEE} = A \times B \times C$$

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			
							0,64	0,56	1,00	0,39

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

A figura 9 mostra a evolução do OEE no período em análise para todos os aerogeradores do Morro do Camelinho

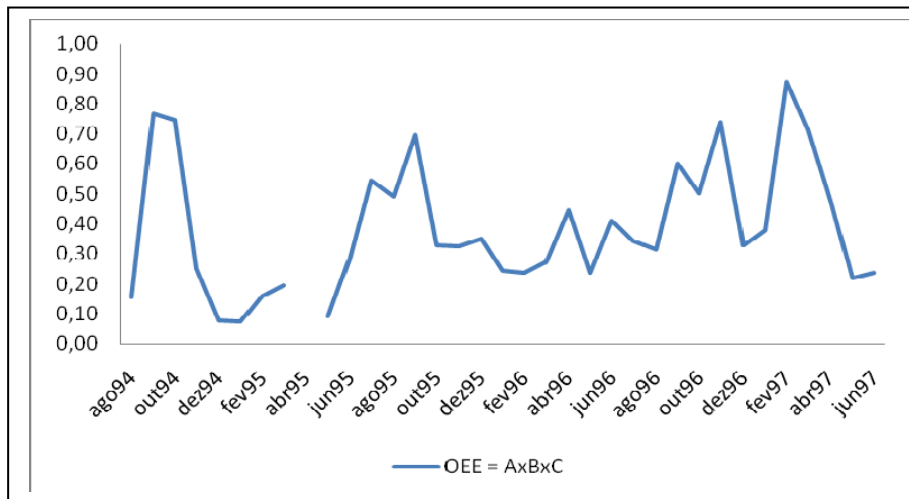


Figura 9 – Variação da Eficiência Operacional Global (OEE) dos quatro aerogeradores do parque eólico Morro do Camelinho

Pode-se observar na figura 9 que a eficiência operacional global dos aerogeradores 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 para sistemas automatizados de produção, que seria o caso dos aerogeradores de Morro do Camelinho, 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 aerogeradores. Estas perdas merecem uma análise mais detalhada, no futuro, para identificar as suas causas reais e tentar tomar ações adequadas para sua eliminação. 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 da condição física dos aerogeradores, que permitam avaliar a evolução do desgaste e evitem o acontecimento de quebras e falhas imprevistas nos diversos sistemas dos aerogeradores. Outro ponto importante, que merece ser observado, é a variação dos ventos já que, como pode ser visto na tabela 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.

4- 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 muito importante 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 local eólico, de forma de maximizar o aproveitamento da energia dos ventos do local. Este trabalho mostrou que em um parque eólico existem três grandes tipos de perdas: as perdas por fatores aerodinâmicos, que reduzem a energia disponível nas massas de ar em um fator que pode superar 60%, dependendo da característica aerodinâmica das pás, das dimensões do rotor e do número de pás do rotor, e também as perdas existentes no fluxo de ar que circula pelo rotor. Desta forma, no rotor de um gerador eólico somente pode ser aproveitada entre 40 e 55% da energia

disponível nas massas de ar. Existe um segundo tipo de perda, que é originada no processo de transformação da energia mecânica, que chega ao rotor, em energia elétrica. Neste processo, existe o envolvimento de componentes eletromecânicos que continuam absorvendo a energia disponível e transformando em diversas perdas por fricção, térmicas, indutivas, etc. Estas perdas são também muito significativas e podem superar 50% da energia disponível no rotor. Assim, a energia que chega à rede não supera 25% da energia disponível nas massas de ar. Adicionalmente, este trabalho mostrou 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%.

A figura abaixo mostra o balanço global das perdas observadas nos geradores eólicos do Parque do Camelinho, considerando todos os tipos de perdas mencionados anteriormente

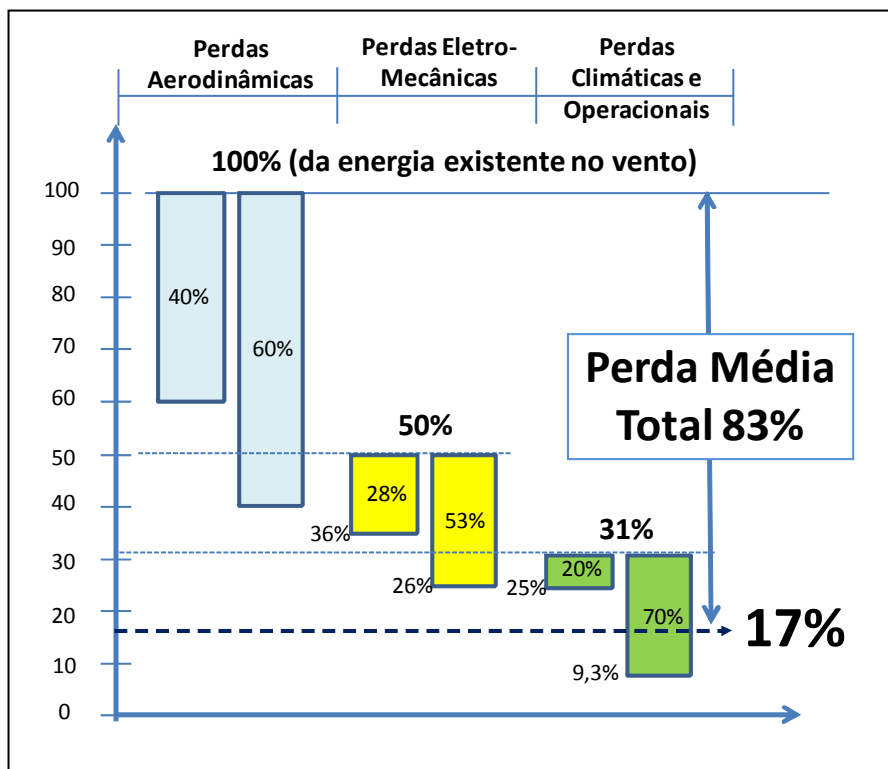


Figura 10 – Balanço global das perdas observadas nos geradores eólicos do Parque do Camelinho

O coeficiente de eficiência global OEE mostrou ser um parâmetro adequado para a avaliação de todas as perdas operacionais em um parque eólico, tais como paradas de produção, velocidade reduzida de produção e perdas por qualidade. Das três perdas mencionadas: aerodinâmicas, de transformação de energia mecânica em elétrica, e operacionais, as únicas que podem ser gerenciadas durante a vida útil dos parques eólicos são as operacionais, já que as duas primeiras são definidas no projeto das instalações e, uma vez erguido o parque eólico, é praticamente impossível a sua redução. Este trabalho terá continuidade, com o objetivo de investigar as causas raízes das falhas operacionais e determinar ações adequadas para sua eliminação ou bloqueio.

Agradecimentos

Agradecemos à Companhia Elétrica de Minas Gerais, CEMIG, pelo fornecimento dos dados operacionais do parque eólico piloto de Morro do Camelinho que permitiram aplicar o conceito de eficiência global de equipamento OEE na avaliação das perdas operacionais. Agradecemos também ao CNPQ pela concessão de bolsa de mestrado ao aluno que participou da pesquisa.

Bibliografia

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-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho - Relatório de Desempenho Operacional, 1998.

DEWI, Power Quality Measurement and Wind Turbine Operational Improvement at Cemig Morro do Camelinho Wind Farm, Relatório interno CEMIG, 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](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, Editora Relume Dumará. Vol. 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.

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