

BORYS W. D. HORBATIUK

**NOVAS METODOLOGIAS PARA A MEDIÇÃO
DE RENDIMENTO DE GERADORES EM HIDRELÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Alfranci Freitas Santos

Curitiba

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a ANEEL/COPEL pela oportunidade de poder trabalhar com este tema assim como ao apoio material dado.

Agradeço a equipe da divisão de serviços mecânicos pelo apoio nos ensaios.

Agradeço aos meus colegas do CPGEI pela ajuda dada durante o decorrer do curso.

Agradeço a Eng^o Mecânico Carlo G. Filippin e ao Eng^o Mecânico Walter A. Kapp por me darem a oportunidade de trabalhar com eles na área de pesquisa quando ainda era aluno de engenharia mecânica e por me ensinarem grande parte do que sei.

Agradeço ao meu orientador Alfranci Freitas Santos por acreditar no tema proposto.

Agradeço aos meus pais João Carlos e Maria Luiza por me darem a possibilidade de ter chegado até aqui.

Agradeço a minha querida Adriana Scheschowitsch por me suportar e me dar apoio durante todo o transcurso do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 MOTIVAÇÕES	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
2 CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 O MÉTODO CALORIMÉTRICO	14
2.1.1 <i>Perdas Mecânicas</i>	16
2.1.2 <i>Perdas Elétricas</i>	20
2.2 O ENSAIO.....	22
2.2.1 <i>Critério de Estabilidade Térmica</i>	22
2.2.2 <i>Variação dos Parâmetros</i>	24
2.3 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO	25
2.4 INCERTEZA DO MÉTODO CALORIMÉTRICO.....	26
3 CAPÍTULO 3 UMA PRIMEIRA ALTERNATIVA AO MÉTODO CALORIMÉTRICO.....	28
3.1 O MÉTODO EXTENSOMÉTRICO.....	28
3.1.1 <i>O Gerador</i>	28
3.1.2 <i>Medição das Tensões</i>	47
3.1.2.1 <i>Princípio de Funcionamento</i>	48
3.1.2.2 <i>O Extensômetro Semicondutor</i>	51
3.1.2.3 <i>A Ponte de Wheatstone</i>	53
3.1.3 <i>Medição no Eixo do Gerador</i>	55
3.1.4 <i>Medição do Rendimento</i>	56
3.2 CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO DO EIXO (MÉTODO EXTENSOMÉTRICO).....	57
4 CAPÍTULO 4 UMA SEGUNDA ALTERNATIVA AO MÉTODO CALORIMÉTRICO.....	60
4.1 O MÉTODO FASE PERÍODO	60
4.1.1 <i>Considerações físicas sobre o eixo</i>	61
4.1.2 <i>A metodologia</i>	62
4.1.3 <i>Metodologia proposta</i>	65
4.2 CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO DO EIXO (MÉTODO FASE-PERÍODO).....	73
5 CAPÍTULO 5 QUALIFICAÇÃO DAS METODOLOGIAS.....	76
5.1 INCERTEZA DA MEDIÇÃO	76
5.2 INCERTEZA DO MÉTODO EXTENSOMÉTRICO.....	77
5.3 INCERTEZA DO MÉTODO FASE-PERÍODO	79

6	CAPÍTULO 6 A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO EXTENSOMÉTRICO EM CAMPO.....	83
6.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	83
6.2	PREPARAÇÃO DO ENSAIO.....	83
6.2.1	<i>Posicionamento e traçagem</i>	84
6.2.2	<i>Colagem</i>	86
6.2.3	<i>Montagem do circuito</i>	89
6.2.4	<i>Proteção dos extensômetros</i>	90
6.2.5	<i>Ligação do circuito ao sistema de telemetria</i>	91
6.3	RESULTADOS.....	91
7	CAPÍTULO 7 ENSAIO FASE-PERÍODO.....	95
7.1	A INSTRUMENTAÇÃO.....	97
7.2	O ENSAIO.....	98
7.3	RESULTADOS.....	99
8	CONCLUSÃO.....	102
8.1	TRABALHOS FUTUROS.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Balanço de energia de um gerador elétrico.....	14
Figura 2: Corte esquemático mostrando as principais perdas do gerador	16
Figura 3: Desenho esquemático do gerador mostrando o torque de entrada e o torque reativo (segundo a Lei de Lenz).....	29
Figura 4: Desenho mostrando um corte no eixo a uma distância l da extremidade de entrada.	30
Figura 5: Desenho mostrando o corte realizado no eixo a uma distância l da extremidade de entrada e as reações internas do eixo.	30
Figura 6: Secção do eixo do gerador isolado.....	31
Figura 7: Seccionamento de um corpo qualquer (a) . Parte anterior ao corte (b). Parte posterior ao corte (c).	32
Figura 8: Corpo seccionado	32
Figura 9: Vista ampliada da área ΔA com os componentes de ΔF	33
Figura 10: Imagem de um ensaio de tração realizado no Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN)- Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (retirado do endereço http://ipen.br/cctm/labs/cm.html).....	35
Figura 11: Curva tensão x deformação típica.	35
Figura 12: Desenho de um eixo circular em torção. (a) eixo sem a aplicação da carga. (b) eixo após a aplicação de um torque. (c) fatia infinitesimal do eixo.....	40
Figura 13: Elemento superficial do eixo sob torção (a deformação do elemento foi exagerada por questão de visualização). (a) elemento somente com as tensões instantâneas. (b) elemento com as tensões totais.	41
Figura 14: Estado de tensões na superfície do eixo	42
Figura 15: Transformação de tensões. (a) forças aplicadas nas faces. (b) força normal equivalente às forças cisalhantes	43
Figura 16: Transformação das tensões cisalhantes em tensões normais pela mudança do plano de referência	44
Figura 17: Desenho esquemático do extensômetro.....	48
Figura 18: Esquema construtivo de um extensômetro semicondutor.....	52
Figura 19: Ponte de Wheatstone	53
Figura 20: Figura demonstrando o posicionamento dos extensômetros no eixo (imagem retirada do site www.vishay.com)	55
Figura 21: Sinal de saída em função da potência elétrica no gerador, para o método extensométrico (para $k=2$).....	58
Figura 22: Sinal de saída em função da potência elétrica no gerador, para o método extensométrico (para $k=140$).....	59
Figura 23: Corpo deformado devido ao torque T	61
Figura 24: Disposição das marcações e dos sensores segundo método de Du	64
Figura 25: Esquema de montagem proposta por Horbatiuk	66
Figura 26: Sinais característicos (com ruído) dos medidores de proximidade	66
Figura 27: Sinal após passagem por comparadores	67
Figura 28: Sinais após passagem por portas inversoras.	68
Figura 29: Geração da onda de medição	68
Figura 30: Sinal tratado pronto para a medição.	69
Figura 31: Exemplo de dados deformação x rotação	72

Figura 32: Exemplo dos dados mostrando o desalinhamento inicial do sistema.....	72
Figura 33: Desenho esquemático da deformação torsional sofrida pelo eixo devido a um torque T	74
Figura 34: Gráfico mostrando a defasagem em função da potência elétrica no gerador	74
Figura 35: Gráfico do número de pulsos de defasagem em função da potência elétrica	75
Figura 36: Gráfico mostrando a incerteza da medição em função da potência no gerador....	79
Figura 37: Gráfico mostrando a incerteza da medição em função da potência no gerador....	82
Figura 38: Fotografia mostrando o posicionamento com o gabarito	84
Figura 39: Fotografia mostrando o eixo preparado para a colagem.....	86
Figura 40: Fotografia mostrando os extensômetros instalados.....	88
Figura 41: Fotografia mostrando a soldagem dos extensômetros e a montagem da ponte de Wheatstone.	89
Figura 42: Fotografia mostrando a proteção da instalação.....	90
Figura 43: Dados brutos do ensaio	92
Figura 44: Dados do ensaio após filtragem	92
Figura 45: Regiões de carga.....	93
Figura 46 : Motor Peugeot utilizado no ensaio fase-período.....	95
Figura 47: Gráfico de potência do motor Peugeot.	96
Figura 48: Gráfico de torque do motor Peugeot.....	96
Figura 49: Banco de motores, onde pode ser visto o motor, o eixo cardã (instrumentado) e à direita o dinamômetro.	97
Figura 50 : Eixo instrumentado.....	98
Figura 51 : Base de medição do sistema fase período.....	99
Figura 52 : Torque medido no dinamômetro (bancada).	100
Figura 53: Ângulo de defasagem medido no eixo do motor (sistema fase-período).	100
Figura 54: Gráfico mostrando as variações de velocidade e aceleração angular, para ½ volta do eixo de acionamento (180°). Neste caso a junta apresenta um ângulo de 30° entre os eixos de entrada e de saída (Filippin, 2002).	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Erro de medição do método calorimétrico em gerador resfriado à água (Norma IEC 34-2A página 19)	27
Tabela 2: Comparação entre as metodologias de medição de rendimento	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- COPEL - Companhia de Energia Elétrica do Paraná
- DIN - *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão de Normatização)
- IEC - *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
- IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
- LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
- LEME - Laboratório de Emissões Veiculares
- u* - Incerteza

RESUMO

O presente trabalho traz duas novas alternativas ao método calorimétrico descrito na norma da *International Electrotechnical Commission (IEC) 34-2A – “Rotating electrical machines, part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)”* para a medição do rendimento de geradores resfriados a água em hidroelétricas.

O grande motivo para a apresentação desta metodologia é a grande quantidade de tempo de máquina parada (indisponível para a rede) necessária para a execução do método calorimétrico, da quantidade de equipamentos envolvidos, assim como a complexidade envolvida no ensaio.

As metodologias apresentadas simplificam ao máximo os cálculos necessários para a obtenção do rendimento do gerador.

ABSTRACT

The present Master Degree Thesis brings two new alternatives to the calorimetric method described in International Electrotechnical's Commission (IEC) standart 34-2A- "Rotating electrical machines, part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles) to the measurement of water cooled generators in hydroelectric powerplants.

The great reason for developping this methodologies is the large amount of stopped machine time (unavailable for the network) for the execution of the calorimetric method and the quantity of involved equipments as well the complexity involved in the test.

The presented methodologies simplify the calculus necessary for measure efficiency of the generator.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

O parque gerador de energia elétrica no Brasil é constituído principalmente por plantas de geração de energia com base hidráulica. As plantas que compõem o parque apresentam uma capacidade nominal de geração de energia instalada que depende da potência do conjunto de hidrogeradores.

Muitas delas operam em regimes inferiores à sua capacidade máxima em função do manejo dos reservatórios e da própria característica da usina, que pode ser de base ou de ponta. Uma usina de base é projetada para operar na sua capacidade nominal. Uma usina de ponta tem uma capacidade de geração de energia instalada maior que a capacidade do reservatório em manter seu nível, operando em regime nominal apenas uma fração do dia.

Como o sistema elétrico brasileiro é interligado, cada concessionária pode ser solicitada a gerar em sua capacidade máxima (nominal ou não, conforme o tipo de usina) em função de variações de demanda ou da ocorrência de eventos que impeçam outra unidade de gerar energia. O operador do sistema de energia interligado controla variáveis macro do processo. Do ponto de vista de geração de energia por meio hidroelétrico a capacidade do sistema é dada pela quantidade de água armazenada nos reservatórios em relação à potência instalada em cada unidade. A potência instalada é descrita como a potência passível de ser disponibilizada para transmissão. Logo, o rendimento de cada unidade geradora (turbina e gerador) exigirá um determinado volume de água para cada MW de energia gerado. Portanto, o conhecimento preciso dos rendimentos da turbina e do gerador é vital para o gerenciamento do potencial do parque gerador de energia. Com base nestas informações, tem-se três aspectos relevantes:

A concessionária, pode reduzir custos operacionais e otimizar o desempenho de seu parque gerador a partir do melhor conhecimento dos valores de rendimento de seus grupos geradores de energia, atendendo à demanda e aos respectivos contratos;

Em situações críticas de geração de energia, particularmente em estiagens prolongadas, a interligação do sistema pode exigir de algumas unidades sua capacidade máxima de geração por períodos prolongados. Neste caso, o desconhecimento de forma

precisa do rendimento do hidrogerador pode levar a falhas de logística de geração de energia por insuficiência de água no reservatório em função da potência líquida exigida;

As concessionárias celebram contratos de fornecimento de energia firme para a alimentação do sistema em função da capacidade de seus reservatórios e do rendimento dos hidrogeradores. O desconhecimento dos valores de rendimento, com precisão, pode levar à celebração de contratos que venham a lesar uma das partes.

1.2 OBJETIVOS

Para a medição do rendimento do gerador existem diversas normas. Estas normas são baseadas quase inteiramente na norma da *International Electrotechnical Commission* (IEC), nomeada como IEC 34-2A. Esta norma contempla a medição de diversas máquinas elétricas por diversos meios. No caso de hidrogeradores, o método utilizado é o método calorimétrico. Esta metodologia tem diversas desvantagens que motivaram o desenvolvimento de alternativas capazes de substituí-la. São apresentadas neste texto duas alternativas ao método calorimétrico, que apresentam grandes melhorias em relação ao método descrito na norma.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 inicia-se o texto descrevendo os aspectos teóricos do método normatizado. Primeiramente descrevendo-se qual o seu princípio, discutindo-se alguns pontos importantes durante o texto, como, por exemplo, os cálculos de perdas térmicas e o equilíbrio térmico necessário para a medição. Posteriormente, como efetivamente são elaborados os cálculos do rendimento do gerador com plena carga e com suas aproximações para carregamentos parciais do gerador.

Em seguida no Capítulo 3 apresenta-se o método extensométrico, mostrando-se que, mesmo apresentando uma matemática mais elaborada, no final consegue-se uma função para o rendimento muito mais simples e direta em comparação ao método calorimétrico.

No Capítulo 4 é apresentada uma metodologia inédita desenvolvida a fim de melhorar as desvantagens do método extensométrico.

O Capítulo seguinte é dedicado a análise de incertezas dos dois métodos apresentados.

Segue-se, então, para a execução do ensaio extensométrico em campo na usina de Foz do Chopim e a análise dos resultados obtidos (capítulo 6). No capítulo 7 é realizado o teste com o método fase-período em um banco de ensaios de motores sendo demonstrado também os resultados deste teste.

Na conclusão comparam-se efetivamente as três metodologias (a calorimétrica e as duas apresentadas neste trabalho) mostrando-se os prós e contras de cada uma delas, assim como outras opções para a utilização dos métodos apresentados.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para se medir o rendimento de um gerador hidrelétrico é utilizada a metodologia calorimétrica (IEC 34-2A, 1972).

2.1 O MÉTODO CALORIMÉTRICO

O método calorimétrico é o único ensaio normatizado para a medição de rendimento em hidrogeradores de grande porte.

Em função da dificuldade de calcular o rendimento do gerador diretamente, isto é, a razão entre a potência de saída e a potência de entrada, medem-se efetivamente a potência de saída e as perdas de energia do próprio gerador.

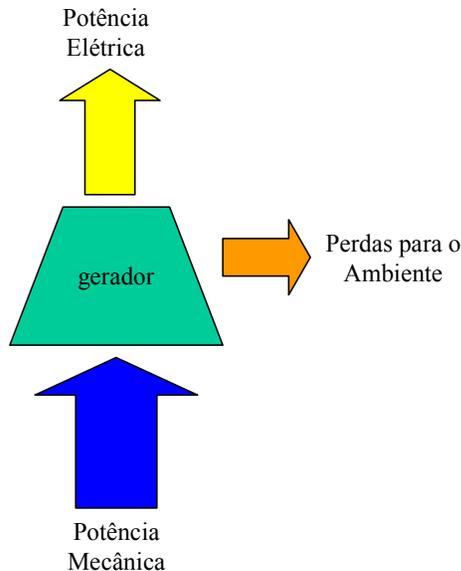


Figura 1: Balanço de energia de um gerador elétrico

O balanço de energia do gerador (Figura 1) pode ser representado pela equação:

$$P_{mecânica} = P_{elétrica} + P_{dissipada} \quad (1)$$

ficando o rendimento do gerador expresso como:

$$\eta_{gerador} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{elétrica}}{P_{mecânica}} \quad (2)$$

$$\eta_{gerador} = \frac{P_{elétrica}}{P_{elétrica} + P_{dissipada}}, \quad (3)$$

onde:

$P_{mecânica}$ - potência mecânica cedida ao gerador [W];

$P_{elétrica}$ - potência elétrica gerada pelo gerador [W];

$P_{dissipada}$ - potência dissipada para o ambiente pelo gerador [W];

$\eta_{gerador}$ - rendimento do gerador [adimensional].

Existem várias normas que descrevem este ensaio e a grande maioria delas são baseadas na norma “*Rotating electrical machines – part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests*” da *International Electrotechnical Commission (IEC) IEC 34-2A*.

De acordo com o método presente nesta norma, as perdas existentes em um gerador (Figura 2) podem ser classificadas em perdas mecânicas e elétricas.

As perdas mecânicas são divididas em 4 grupos:

- P_1 - perdas transferidas para a água de resfriamento: provenientes do sistema de resfriamento dos mancais, de resfriamento do ar ou sistemas de resfriamento em malha aberta.
- P_2 - perdas por radiação e por convecção para o ambiente.
- P_3 - perdas por fricção da água na tubulação do sistema de resfriamento.
- P_4 - perda de calor pela fundação da máquina e pelo eixo da mesma. De acordo com a norma citada esta perda é tão pequena que pode ser desconsiderada.

As perdas elétricas são divididas em 2 grupos:

- P_{fe} - perdas dependentes da tensão elétrica.
- P_i - perdas dependentes da corrente elétrica.

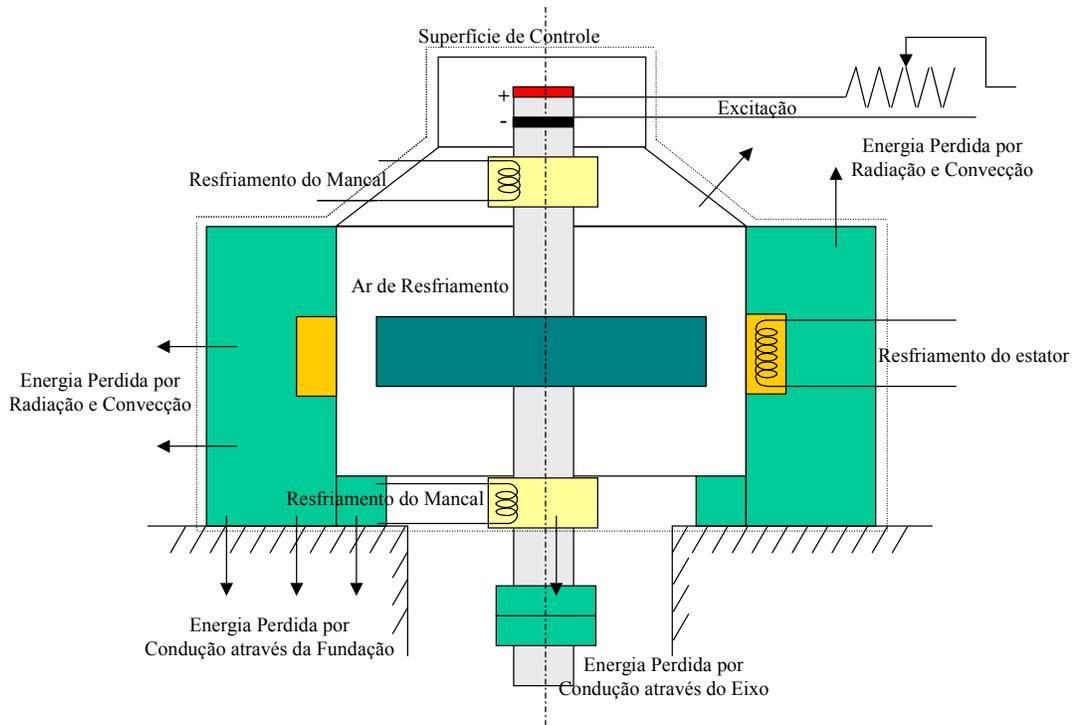


Figura 2: Corte esquemático mostrando as principais perdas do gerador

2.1.1 Perdas Mecânicas

Geradores resfriados com água, geralmente são de grande porte e conseqüentemente têm massa e inércia elevadas. Elementos mecânicos deste porte, quando em movimento, liberam uma enorme quantidade de energia decorrente do atrito nos mancais. Em função disto, existe um sistema de resfriamento para a retirada desta energia, mantendo assim, a temperatura do óleo dos mancais em níveis aceitáveis. A parcela de energia cedida à água de resfriamento é uma parcela considerável, se não a maior das perdas totais do gerador.

A perda para o sistema de resfriamento (P_f) é calculada por:

$$P_1 = c_p \cdot \rho_n \cdot Q_{ref} \cdot \Delta\theta_{1,2} , \quad (4)$$

onde:

$\Delta\theta_{1,2}$ - diferença de temperatura ($\Delta\theta_{1,2} = \theta_2 - \theta_1$) [K];

θ_1 - temperatura da água que entra no sistema (fria) [K];

θ_2 - temperatura da água que sai do sistema (quente) [K];

c_p - calor específico da água de resfriamento na temperatura média $\theta_m = (\theta_1 + \theta_2)/2$ $\left[\frac{kWs}{kg \cdot K} \right]$;

ρ_n - densidade da água de resfriamento à temperatura θ_m $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;

Q_{ref} - vazão de água do sistema de resfriamento $\left[\frac{m^3}{s} \right]$.

Existe uma transferência de calor (energia) do gerador para o meio, devido ao fato do gerador aquecer durante a geração de energia e a sua temperatura geralmente estar maior que a temperatura ambiente. Esta energia cedida ao meio, é dividida em duas frações: a primeira refere-se a perda de calor através da convecção e a segunda através da radiação. Normalmente a energia transferida por convecção é dada por (INCROPERA, 1992):

$$q_{conv} = h \cdot (T_{sup} - T_{amb}) , \quad (5)$$

onde:

q_{conv} - fluxo de calor convectivo $\left[\frac{W}{m^2} \right]$;

h - coeficiente de transferência convectiva de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$;

T_{amb} - temperatura do meio circundante (ambiente) [K];

T_{sup} - temperatura da superfície do gerador [K].

A energia transferida para o ambiente através da radiação é equacionada segundo literatura (INCROPERA,1992) como:

$$q_{rad} = \varepsilon_t \cdot \sigma_{sb} \cdot (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) , \quad (6)$$

onde:

q_{rad} - fluxo de calor radiado $\left[\frac{W}{m^2} \right]$;

ε_t - emissividade (varia entre 0 e 1) [adimensional];

σ_{sb} - constante de Stefan-Boltzmann $\left(5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$.

Conforme a norma IEC 34-2A as perdas por radiação e convecção (P_2) perfazem no máximo 2,5% das perdas no sistema de resfriamento (P_1). Levando em conta que a diferença de temperatura entre o ambiente (T_{amb}) e a superfície do gerador (T_{sup}) é muito pequena, considera-se desprezível a fração de energia perdida por radiação fazendo com que a perda P_2 seja dada por:

$$P_2 = h \cdot A_{conv} \cdot (T_{sup} - T_{amb}) , \quad (7)$$

onde:

h - coeficiente de transferência convectiva de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$;

A_{conv} - área de troca de calor [m^2].

O coeficiente de transferência convectiva de calor, segundo a norma IEC 34-2A, pág 3, está entre 10 e 20 ($W/m^2 \cdot K^{-1}$), por conveniência a norma adota então um valor médio de 15 ($W/m^2 \cdot K^{-1}$), considerando que não existem correntes de ar em torno do gerador. Em ambiente onde existe corrente de ar, o coeficiente de transferência convectiva é dado por:

$$h = 11 + 3 \cdot v_{ar} , \quad (8)$$

onde:

v_{ar} - velocidade do ar ambiente (não considerando a direção) $\left[\frac{m}{s} \right]$.

O fluido de resfriamento percorre a máquina através de tubulações e precisa vencer a perda de carga, conseqüentemente existe uma energia cedida pela água ao ambiente (P_3) que pode ser calculada por (DIN EN 60034-2).

$$P_3 = K \cdot Q_{ref} \cdot (p_1 - p_2) , \quad (9)$$

onde:

K - fator de conversão $\left[\frac{kWs}{m^3 \cdot bar} \right]$;

Q_{ref} - vazão de água do sistema de resfriamento $\left[\frac{m^3}{s} \right]$;

p_1 - pressão da água na entrada do sistema de resfriamento [bar];

p_2 - pressão da água na saída do sistema de resfriamento [bar].

Segundo a norma IEC 34-2A, pág 17, uma queda de pressão de 42 bar equivale a uma diferença de temperatura de 1 K. Logo pode-se considerar a perda P_3 diretamente no cálculo de P_1 como:

$$P_1 = c_p \cdot \rho_n \cdot Q_{ref} \cdot (\Delta \theta_{1,2} - \Delta \theta_3) , \quad (10)$$

onde:

$\Delta \theta_{1,2}$ - diferença de temperatura [K];

θ_1 - temperatura da água que entra no sistema (fria) [K];

θ_2 - temperatura da água que sai do sistema (quente) [K];

c_p - calor específico da água de resfriamento na temperatura média

$\theta_m = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ $\left[\frac{kWs}{kg \cdot K} \right]$;

ρ_n - densidade da água de resfriamento à temperatura θ_m $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

Q_{ref} - vazão de água do sistema de resfriamento $\left[\frac{m^3}{s}\right]$;

$\Delta\theta_3=(p_1-p_2)/42$ [K].

2.1.2 Perdas Elétricas

Sabe-se que não existem máquinas com rendimento de 100% . Especialmente em máquinas elétricas, considera-se que quando há uma corrente circulando, a potência dissipada que pode ser calculada por:

$$P = i^2 \cdot R , \quad (11)$$

onde:

P - potência dissipada [W];

i - corrente circulante [A];

R - resistência do meio [Ω].

Existem duas formas predominantes de perda de energia por motivos elétricos:

- em função das perdas decorrentes da tensão elétrica (P_{fe}). Esta perda é essencialmente função de correntes parasitas no ferro do gerador e não é calculada, ela é medida conforme (13);
- em função das perdas decorrentes da corrente circulante (P_i). Esta perda pode ser separada em duas porções: a perda relativa a corrente no rotor denominada P_{ir} e a perda relativa a corrente no estator denominada P_{ie} .

Portanto a perda devida à corrente circulante pode ser representada por:

$$P_i = P_{ie} + P_{ir} , \quad (12)$$

onde:

P_{ir} - potência dissipada no rotor do gerador [W];

P_{ie} - potência dissipada no estator do gerador [W].

A potência dissipada no rotor não é calculada e sim medida.

$$P_{ir} = I_i^2 \cdot R_l , \quad (13)$$

onde:

P_{ir} - potência dissipada no rotor do gerador [W];

I_i - corrente de excitação do rotor [A];

R_l - resistência elétrica do rotor [Ω].

A norma enfatiza que os valores de R_l devem ser tomados a uma temperatura dependente da classe do gerador. À temperatura de 75°C para as classes A, B e E, e à temperatura de 115°C para as classes F e H.

Existe ainda uma pequena perda mecânica relativa ao atrito das escovas, e elétrica devido à corrente de excitação.

No caso das perdas nas escovas não serem incorporadas ao sistema de resfriamento do gerador, estas devem somar-se às perdas medidas.

A perda por atrito das escovas é dada por:

$$P_{escAtrito} = 0,6 \cdot A \cdot v_t , \quad (14)$$

onde:

$P_{escAtrito}$ - potência dissipada devido ao atrito nas escovas [W];

A - soma da superfície de contato de todas as escovas [cm^2];

v_t - velocidade tangencial dos anéis $\left[\frac{m}{s} \right]$.

A perda devido à corrente de excitação, para escovas de carbono e grafite é:

$$P_{escCorrente} = 2 \cdot I_i , \quad (15)$$

onde:

I_i - corrente de excitação do rotor [A].

E para escovas de carbono metalizadas:

$$P_{escCorrente} = 0,6 \cdot I_i , \quad (16)$$

2.2 O ENSAIO

O ensaio calorimérico é composto basicamente de três etapas:

- A primeira etapa chamada de ‘giro 1’ consiste em girar (na rotação nominal) o gerador sem excitação e assim identificar as perdas puramente mecânicas, como por exemplo a potência dissipada nos mancais devido ao movimento da máquina.
- A segunda etapa, o ‘giro 2’, consiste em girar (na rotação nominal) o gerador excitado, mas com o circuito aberto. Desta forma levanta-se somente as perdas referentes a tensão elétrica. Para ter as perdas relativas a tensão, deve-se subtrair as perdas medidas no ‘giro 1’ e as perdas ocasionadas pela excitação do rotor P_{ir} .
- O ‘giro 3’ é a terceira parte do ensaio. Nesta etapa, gira-se (na rotação nominal) o gerador excitado com seu circuito trifásico em curto, permitindo determinar as perdas relativas a corrente. Para ter somente as perdas em função da corrente deve-se subtrair as perdas medidas no ‘giro 1’ e as perdas no sistema de excitação P_{ir} .

2.2.1 Critério de Estabilidade Térmica

Para ter uma medição dos parâmetros reais da máquina (os que representam efetivamente o regime permanente) é necessário ter certeza de que o hidrogenador está efetivamente em regime e conseqüentemente em equilíbrio térmico.

A estabilidade térmica segundo a norma IEC-34-2A, pág 11, é alcançada quando:

- As perdas medidas na diferença da temperatura entre a entrada e a saída da água (respectivamente θ_1 e θ_2) do sistema de resfriamento do gerador e a medida de vazão do mesmo circuito, não variam mais de $\pm 1\%$ durante um período de duas horas.
- As temperaturas da água do sistema de resfriamento do gerador não variam mais de $\pm 1\%$ durante um período de um hora contanto que a vazão de água permaneça constante.

Efetivamente o tempo para se obter o equilíbrio térmico depende do tamanho da máquina e das condições ambientais. Segundo a norma IEC-34-2A este tempo pode chegar a 15 horas e não raramente este tempo pode ser maior (DIN EN 60034-2).

Para efetivar o ensaio deve-se executar as três etapas (giro 1, giro 2 e giro 3) e em cada uma delas deve-se alcançar o equilíbrio térmico. Este, muitas vezes, ocorre depois de muitas horas da máquina girando, sendo assim cada etapa pode ter sido realizada em temperaturas e pressões ambiente diferentes.

Para calcular o rendimento deve-se ter todos os parâmetros tomados a partir da mesma referência. Logo tem-se de corrigir os dados medidos nas etapas em função da temperatura e pressão ambiente reinantes no primeiro ‘giro’.

Esta correção é feita da seguinte forma:

Corrige-se a massa específica do ar para a pressão ambiente no ensaio;

$$\rho_b = \rho_{b0} \cdot \frac{b}{b_0} , \quad (17)$$

onde:

ρ_b - massa específica do ar a pressão b $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;

ρ_{b0} - massa específica do ar $\left(1,11 \frac{kg}{m^3} \right)$ à pressão padrão b_0 (1013,24 mbar) $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;

b - pressão ambiente do ensaio [mbar];

b_0 - pressão ambiente padrão (1013,24 mbar) [mbar].

Corrige-se então as perdas utilizando a massa específica:

$$P_{corrigida} = P_{medida} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ensaio}}{\rho_{giro1}}}, \quad (18)$$

onde:

$P_{corrigida}$ - potência corrigida para as condições climáticas do primeiro ensaio [W];

P_{medida} - potência perdida medida nas etapas de ‘giro 2’ ou ‘giro 3’ [W];

ρ_{ensaio} - massa específica do ar no momento do ensaio (na temperatura média do ar do trocador de calor) $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;

ρ_{giro1} - massa específica do ar na etapa de ‘giro 1’ (na temperatura média do ar do trocador de calor) $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

2.2.2 Variação dos Parâmetros

Muitas vezes os parâmetros da máquina (dados de placa) estão fora do controle da equipe de ensaio (e podem variar do valor nominal). Na etapa de ‘giro 2’ a tensão elétrica de saída do gerador pode não ser a mesma tensão definida como “de placa”, isto é, especificada como nominal. Então se deve corrigi-la conforme (DIN EN 60034-2):

$$\frac{P_{fen}}{P_{feTest}} = \left(\frac{U_n}{U_{test}} \right)^2, \quad (19)$$

onde:

P_{fen} - potência perdida devido a tensão nominal [W];

P_{feTest} - potência perdida devido a tensão medida [W];

U_n - tensão elétrica nominal [V];

U_{test} - tensão elétrica no momento do ensaio [V].

De acordo com o mesmo princípio, na etapa de ‘giro 3’ muitas vezes a corrente não estabiliza na especificada como nominal, e deve se corrigi-la conforme (DIN EN 60034-2):

$$\frac{P_{in}}{P_{iTest}} = \left(\frac{I_n}{I_{test}} \right)^2, \quad (20)$$

onde:

P_{in} - potência perdida devido a corrente nominal [W];

P_{iTest} - potência perdida devido a corrente medida [W];

I_n - corrente elétrica nominal [A];

I_{test} - corrente elétrica no momento do ensaio [A].

2.3 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

Normalmente quando se mede o rendimento de um gerador, procura-se uma curva de rendimento em função da carga elétrica. Geralmente para levantar a curva utiliza-se as cargas parciais de 4/4, 3/4, 2/4, 1/4 da potência nominal da máquina. Para isto, as perdas relativas as correntes elétricas no estator, ao enrolamento do rotor e nas escovas, devem ser convertidas conforme :

$$P_{i-carga} = P_i \cdot \left(\text{carregamento parcial} \right)^2, \quad (21)$$

onde:

$P_{i-carga}$ - perdas devido a corrente corrigida para dado carregamento parcial [W];

P_i - perda medida para carga total [W];

carregamento parcial - fração de carga para a qual se deseja corrigir (ex. 1/4)[*adimensional*].

Para medir o rendimento conforme equação (3) necessita-se da potência elétrica referente a cada componente parcial de carga e da carga total. Isto consegue-se medindo a potência entregue pela máquina para cada condição (de trabalho normal, não nas etapas do

ensaio). Esta medição é feita por um wattímetro conectado a transformadores de corrente (TC) e tensão (TP) no barramento de saída do gerador. Somando todas as perdas (corrigidas para a mesma temperatura e pressão), encontrando as perdas em carregamentos parciais do gerador conforme equação (21) e medindo as potências entregues pelo gerador nos respectivos carregamentos, pode-se calcular conforme equação (3) os rendimentos de cada carregamento.

Em muitos casos deseja-se um rendimento médio do gerador. Isto é feito em acordo com todas as partes interessadas. O rendimento médio (ponderado) é calculado conforme:

$$\eta_m = \frac{\sum c_n \cdot \eta_n}{\sum c_n}, \quad (22)$$

onde:

η_m - rendimento médio [*adimensional*];

η_n - rendimento com carregamento n [*adimensional*];

c_n - peso dado para η_n [*adimensional*].

2.4 INCERTEZA DO MÉTODO CALORIMÉTRICO

Segundo a norma IEC 34-2A pág 19:

“A exatidão na determinação das perdas pelo método calorimétrico depende do método de medição empregado, do tipo de instrumento usado e qualquer erro na estimativa das perdas P_2 . Duas categorias de erros de medição são dadas na tabela 1:

Categoria A, sendo apropriada para a máxima exatidão obtida;

Categoria B, sendo apropriada para um nível aceitável de exatidão apropriado para a maioria dos casos.

Se o erro relativo nas perdas totais causada por um erro em P_2 for maior de 1,5% no caso da categoria A, ou maior que 3% para a categoria B, o método calorimétrico não é recomendado.”

Tabela 1: Erro de medição do método calorimétrico em gerador resfriado à água
(Norma IEC 34-2A página 19)

Quantidade	Efeito do erro como porcentagem da somatória das perdas	
	Categoria A	Categoria B
Equilíbrio térmico.....	≤ 1	≤ 3
Calor específico x massa específica da água..	≤ 1	
Vazão volumétrica.....	≤ 1	
Ascensão da temperatura.....	≤ 1	
Estimativas da perda P2.....	$\left\{ \begin{array}{l} \leq 0,5 \\ \leq 1,5 \end{array} \right.$	
Perdas totais :95% confiança		≤ 5
Limites do erro = $\sqrt{\sum e^2}$	≤ 2,5	

CAPÍTULO 3

UMA PRIMEIRA ALTERNATIVA AO MÉTODO CALORIMÉTRICO

3.1 O MÉTODO EXTENSOMÉTRICO

Devido a grande dificuldade na realização do método calorimétrico e custo elevado de máquina parada em uma hidroelétrica, está sendo apresentada uma nova maneira de se medir o rendimento do gerador em plantas hidrogeradoras.

3.1.1 O Gerador

O gerador é uma máquina elétrica que transforma energia mecânica (proveniente da turbina hidráulica neste caso em particular) em energia elétrica. Ele é formado basicamente por um rotor e um estator. A potência mecânica entra através do eixo fazendo o rotor girar, gerando um campo magnético oscilante produzindo assim corrente elétrica nos enrolamentos do estator. Segundo Lenz (KOSOW, 2000) tem-se que “a ação eletrodinâmica de uma corrente induzida opõe-se igualmente à ação mecânica que a induziu”. Isto é, uma interface entre a eletricidade e a mecânica em relação à terceira lei de Newton. Logo o eixo tem de vencer esta força contrária (induzida segundo a Lei de Lenz) para que efetivamente se gere potência elétrica (Figura 3).

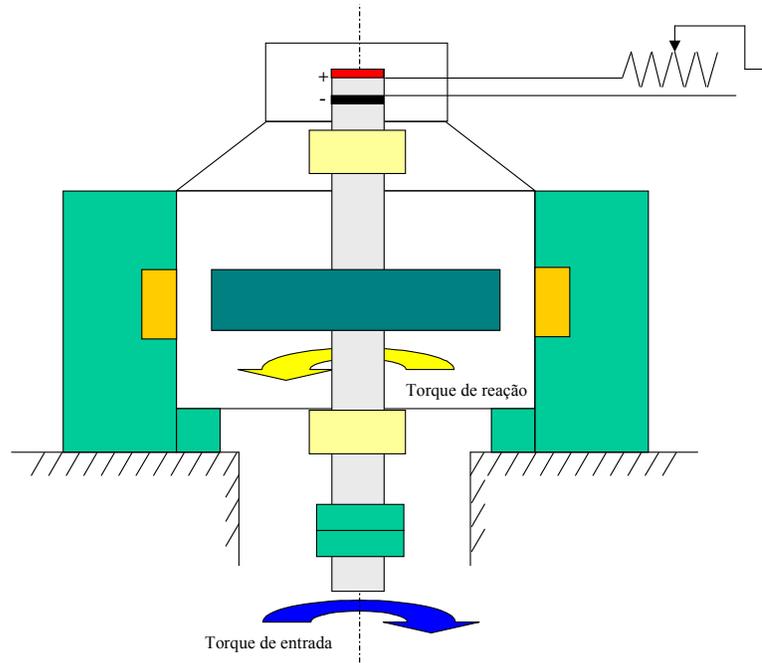


Figura 3: Desenho esquemático do gerador mostrando o torque de entrada e o torque reativo (segundo a Lei de Lenz)

O elemento mecânico que sofre estes esforços é o eixo que liga a turbina hidráulica ao gerador elétrico. Para que o gerador gire a uma velocidade constante (necessária para se manter a frequência constante na rede elétrica) o eixo tem de estar em equilíbrio conforme a primeira Lei de Newton:

$$T_{entrada} = T_{reação} \quad (23)$$

onde:

$T_{entrada}$ - torque de entrada cedido pela turbina hidráulica [Nm];

$T_{reação}$ - torque de reação gerado pelo gerador segundo a Lei de Lenz [Nm].

Analisando o eixo pela visão da mecânica dos sólidos, faz-se uma secção a uma distância “l” de uma das extremidades, conforme Figura 4.

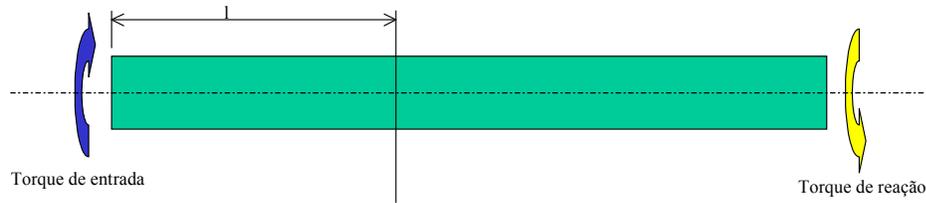


Figura 4: Desenho mostrando um corte no eixo a uma distância l da extremidade de entrada.

Observando os segmentos do eixo (Figura 5), constata-se que, se eles estão em equilíbrio, existe uma reação interna da estrutura que deve estar de acordo com a primeira lei de Newton.

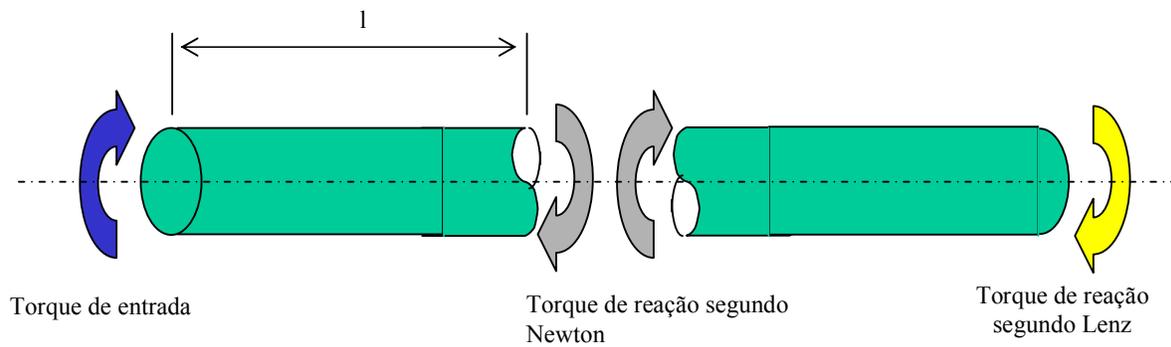


Figura 5: Desenho mostrando o corte realizado no eixo a uma distância l da extremidade de entrada e as reações internas do eixo.

Isolando a peça seccionada (Figura 6).

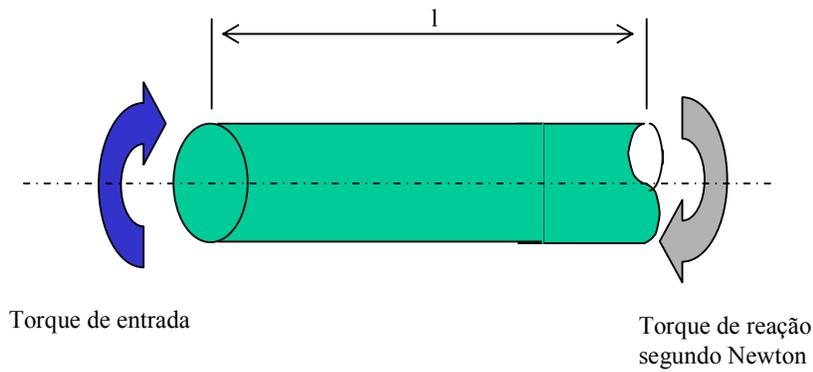


Figura 6: Secção do eixo do gerador isolado

Aplicando a primeira lei de Newton para um corpo em equilíbrio

$$\sum T = 0 \quad (24)$$

$$T_{entrada} + T_{interno} = 0 \Rightarrow T_{entrada} = -T_{interno} \quad (25)$$

onde:

$T_{entrada}$ - torque atuante no eixo [Nm];

$T_{interno}$ - torque de reação interna do eixo [Nm].

Constata-se que para qualquer comprimento 'l' de eixo existe uma reação interna constante igual em módulo ao torque aplicado porém de sentido oposto. Precisa-se entender como esta força (torque) interage com porções infinitesimais do eixo. Segundo Popov (POPOV,1978):

“O principal problema da mecânica dos sólidos é a investigação da resistência interna e da deformação de um corpo sólido submetido a carregamentos. Isso exige o estudo da natureza das forças que aparecem no interior do corpo, para compensarem o efeito das forças externas.”

Considerando-se um corpo no espaço em equilíbrio (Figura 7 (a)) e um plano arbitrário ABCD que o divide em duas partes; para que estas partes do corpo continuem em equilíbrio

surgirão forças internas na seção do corte que se opõem (mesmo módulo e direção porém de sentido oposto) às forças externas (Figura 7 (b) e (c)).

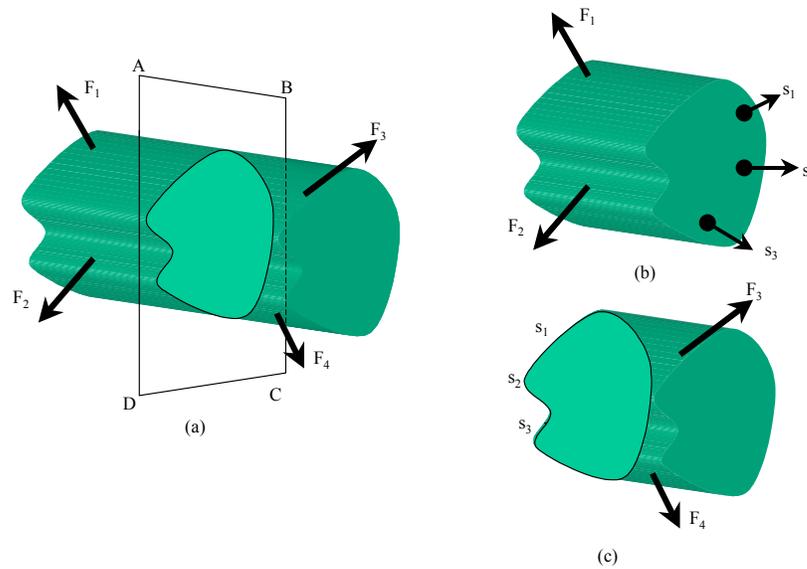


Figura 7: Seccionamento de um corpo qualquer (a) . Parte anterior ao corte (b). Parte posterior ao corte (c).

Deve-se agora isolar uma parte do corpo (Figura 8).

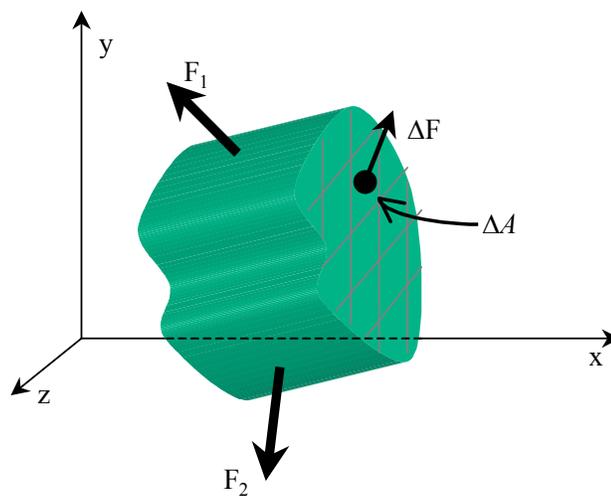


Figura 8: Corpo seccionado

A força interna ΔF equilibra o corpo onde atuam as forças externas F_1 e F_2 . Divide-se a face seccionada em diversos elementos de área ΔA . Pode-se observar que a força ΔF age diretamente sobre o elemento de área ΔA . Decompõem-se ΔF em suas componentes normais e tangenciais (Figura 9).

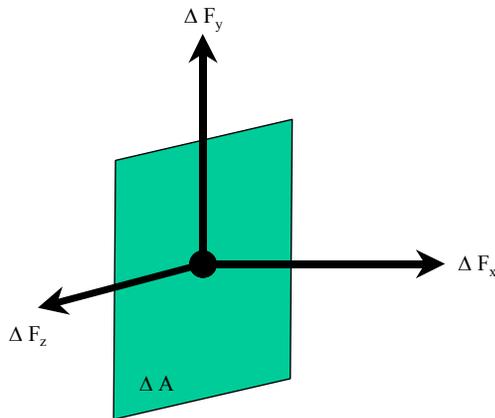


Figura 9: Vista ampliada da área ΔA com os componentes de ΔF

Define-se tensão mecânica como sendo a razão entre a intensidade da força aplicada e a área na qual esta força está aplicada. Como as componentes da força atuam somente sobre um ponto da área ΔA ,

$$\tau_{xx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (26)$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (27)$$

$$\tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (28)$$

onde:

τ_{xx} - tensão mecânica aplicada no plano perpendicular ao eixo x na direção do eixo x [Pa];

τ_{xy} - tensão mecânica aplicada no plano perpendicular ao eixo x na direção do eixo y [Pa];

τ_{xz} - tensão mecânica aplicada no plano perpendicular ao eixo x na direção do eixo z [Pa];

ΔF_x - componente da força na direção x [N];

ΔF_y - componente da força na direção y [N];

ΔF_z - componente da força na direção z [N];

ΔA - área de aplicação da força [m^2].

Existem basicamente dois tipos de tensões mecânicas. As denominadas tensões normais cuja intensidade da força se encontra normal ao plano de aplicação. As tensões normais, designadas daqui por diante de σ dividem-se em dois grupos:

- Tensão de tração, na qual o sentido da força age de modo a “esticar” o corpo.
- Tensão de compressão, na qual o sentido da força age de modo a comprimir o corpo.

Por convenção a tensão de tração é a tensão normal positiva enquanto que a tensão de compressão terá sinal negativo.

A outra tensão mecânica, denominada tensão cisalhante ou de cisalhamento, designada daqui por diante de τ , é a tensão na qual a intensidade da força age paralelamente ao plano de aplicação. O sinal positivo ou negativo indica o sentido de aplicação da força. Faz-se necessário entender como as tensões mecânicas interagem com o material. Para isso é necessário definir as seguintes condições (NORTON, 2004):

- O material do eixo é isotrópico, as suas propriedades não variam conforme a direção solicitada.
- O material do eixo é homogêneo, não existem falhas, inclusões ou vazios internos no material.

Submete-se então um corpo de prova ao seguinte ensaio:

Afixa-se o corpo entre duas garras e aplicando uma rampa de força de tração; mede-se a deformação em função da carga aplicada até o corpo em ensaio romper-se (Figura 10). Este ensaio é conhecido como ensaio de tração e a resposta do material ao mesmo pode ser vista na Figura 11.

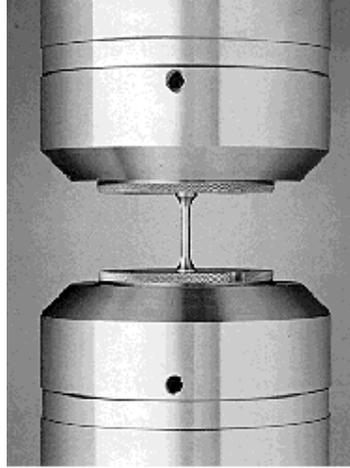


Figura 10: Imagem de um ensaio de tração realizado no Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN)- Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (retirado do endereço <http://ipen.br/cctm/labs/cm.html>)

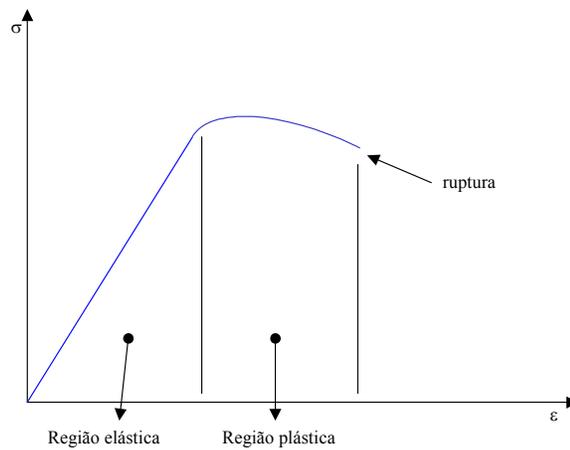


Figura 11: Curva tensão x deformação típica.

Nota-se na Figura 11 que os eixos do gráfico não são força versus deslocamento e sim tensão de tração (σ) versus deformação (ϵ). Para esta curva a tensão de tração é definida por:

$$\sigma = \frac{F_{aplicada}}{A_0} , \quad (29)$$

onde:

σ - tensão de tração na secção normal ao eixo de aplicação da carga [Pa];

$F_{aplicada}$ - força aplicada ao corpo em ensaio [N];

A_0 - área inicial da secção normal ao eixo de aplicação da carga [m^2].

E a deformação (ε), ou mais corretamente deformação específica é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} , \quad (30)$$

onde:

ε - deformação específica [adimensional];

ΔL - variação do comprimento do corpo de prova [m];

L - comprimento inicial do corpo de prova [m].

No gráfico tensão-deformação (Figura 11) existem duas regiões, a região elástica e a região plástica. Na região elástica a deformação é uma função linear da tensão aplicada e nesta região não ocorre deformação permanente no corpo ensaiado. Na outra região, conhecida como região plástica, a deformação não é uma função linear da tensão e toda a deformação ocorrida nesta região é permanente. No âmbito deste texto interessa somente a região elástica.

Analisando a região elástica notamos que a taxa de variação da tensão em função da deformação é diretamente proporcional a razão entre a tensão (σ) e a deformação (ε), e depende somente destas duas grandezas. Matematicamente temos:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon} , \quad (31)$$

onde:

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - taxa de variação da tensão em função da deformação [Pa];

σ - tensão de tração na secção normal ao eixo de aplicação da carga. [Pa];

ε - deformação específica [*adimensional*].

Define-se então:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E , \quad (32)$$

onde:

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - taxa de variação da tensão em função da deformação. [*Pa*];

E - módulo de elasticidade ou módulo de Young. [*Pa*].

Pode-se agora correlacionar a tensão (σ) aplicada a um corpo e a deformação (ε) decorrente da aplicação da mesma (em uma situação uniaxial). Tem-se então:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon , \quad (33)$$

onde:

σ - tensão de tração na secção normal ao eixo de aplicação da carga. [*Pa*];

E - módulo de elasticidade ou módulo de Young. [*Pa*];

ε - deformação específica. [*adimensional*].

A equação (33) é conhecida como Lei de Hooke que em 1676 declarou (POPOV,1978):

"A tensão resultante da aplicação de uma força em um material é diretamente proporcional à sua deformação".

Sabe-se da experiência prática de cada um que quando tracionamos (esticamos) algum objeto ele se alonga no sentido de aplicação da carga e reduz (encolhe) no sentido normal a aplicação da carga. Em 1828, Siméon Denis Poisson (Popov pág 94) definiu que:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}, \quad (34)$$

onde:

ν - coeficiente de Poisson [*adimensional*];

ε_x - deformação específica na direção x (neste caso na direção de aplicação da força) [*adimensional*];

ε_y - deformação específica na direção y [*adimensional*];

ε_z - deformação específica na direção z [*adimensional*].

A equação (34) diz que as deformações laterais ε_y e ε_z para um corpo carregado uniaxialmente (tanto em tração quanto em compressão) são dadas por:

$$\varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x \quad (35)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \cdot \varepsilon_x . \quad (36)$$

Pode-se expandir a Lei de Hooke para o estado triaxial de tensões para materiais isotrópicos (com deformações iguais nas três direções). Chega-se então a (POPOV,1978) (esta transformação não será demonstrada aqui por não fazer parte do escopo deste trabalho):

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (37)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (38)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (39)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (40)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (41)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} , \quad (42)$$

onde:

ε_x - deformação específica na direção x [*adimensional*];

ε_y - deformação específica na direção y [*adimensional*];

ε_z - deformação específica na direção z [*adimensional*];

σ_x - tensão de tração na secção normal ao eixo x. [*Pa*];

σ_y - tensão de tração na secção normal ao eixo y. [*Pa*];

σ_z - tensão de tração na secção normal ao eixo z. [*Pa*];

τ_{xy} - tensão de cisalhamento na direção xy. [*Pa*];

τ_{yz} - tensão de cisalhamento na direção yz. [*Pa*];

τ_{zx} - tensão de cisalhamento na direção zx. [*Pa*];

γ_{xy} - deformação específica de cisalhamento na direção xy [*adimensional*];

γ_{yz} - deformação específica de cisalhamento na direção yz [*adimensional*];

γ_{zx} - deformação específica de cisalhamento na direção zx [*adimensional*];

G - módulo de elasticidade transversal ou módulo de rigidez. [*Pa*].

O módulo de elasticidade transversal (G) é correlacionado ao módulo de elasticidade (E) por (POPOV,1978):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} . \quad (43)$$

Tendo correlacionado as tensões atuantes em um corpo com as deformações sofridas pelo mesmo, se pode voltar ao problema específico de tensão no eixo do gerador. Deve-se analisar agora quais são as tensões reinantes em um corpo de secção circular (no caso, um eixo) sujeito a um torque. Porém é preciso antes estabelecer algumas premissas (POPOV,1978):

- qualquer secção plana perpendicular ao eixo de aplicação do torque continua plana após a aplicação do mesmo. Isto implica que a distância de separação entre os planos permanece constante.
- em um membro circular sob a ação de um torque as deformações angulares variam linearmente a partir do seu eixo central.

Considere-se um eixo qualquer (Figura 12 (a)) sem nenhuma sollicitação sobre o mesmo. Considera-se então duas fibras superficiais do material (retas) sendo a primeira fibra a reta AB e a segunda a reta CD, ambas paralelas à linha de centro do eixo (geratrizes do cilindro). Aplica-se então um torque T qualquer (Figura 12 (b)) (a deformação do elemento foi exagerada por questão de visualização). As fibras se deslocam para as posições AB' e CD'.

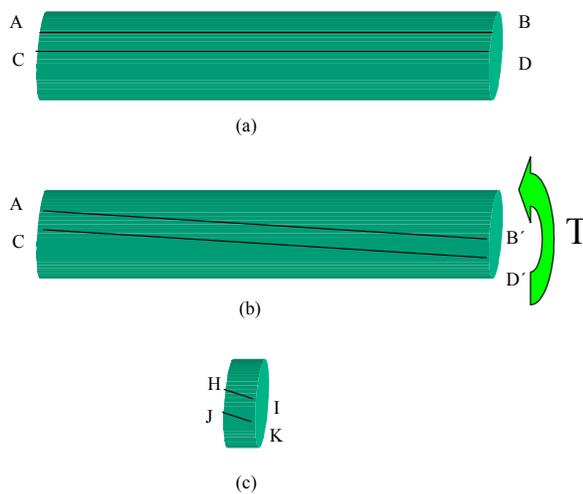


Figura 12: Desenho de um eixo circular em torção. (a) eixo sem a aplicação da carga. (b) eixo após a aplicação de um torque. (c) fatia infinitesimal do eixo

De acordo com a primeira premissa o eixo permanece com o mesmo comprimento. Se analisada uma “fatia” do eixo (Figura 12 (c)) nota-se intuitivamente que devido a reação interna ao torque surgem tensões internas de cisalhamento (Figura 13 (a)). Nota-se porém que se o elemento estiver submetido somente à ação destas tensões “instintivas”, ele não está em equilíbrio. Nesta configuração ele rotacionaria em torno do centro da figura. Então de acordo com a primeira lei de Newton:

$$\sum F = 0 \quad (44)$$

$$\sum T = 0 , \quad (45)$$

onde:

F - forças atuantes sobre o sistema [N];

T - torques atuando sobre o sistema [Nm].

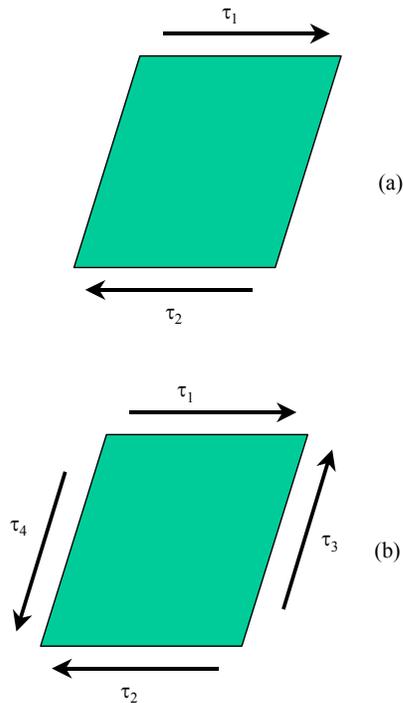


Figura 13: Elemento superficial do eixo sob torção (a deformação do elemento foi exagerada por questão de visualização). (a) elemento somente com as tensões instantâneas. (b) elemento com as tensões totais.

Aplicando as equações (44) e (45), encontram-se todas as tensões no elemento de superfície do eixo e para que exista o equilíbrio, todas elas têm o mesmo módulo.

$$|\tau_1| = |\tau_2| = |\tau_3| = |\tau_4|, \quad (46)$$

onde:

τ_1 - tensão de cisalhamento na superfície do eixo $[Pa]$;

τ_2 - tensão de cisalhamento na superfície do eixo $[Pa]$;

τ_3 - tensão de cisalhamento na superfície do eixo $[Pa]$;

τ_4 - tensão de cisalhamento na superfície do eixo $[Pa]$.

Note-se que na torção pura somente atuam tensões cisalhantes.

Tensões mecânicas não são vetores e por isso não podem simplesmente ser somadas como vetores, no entanto podem ser multiplicadas por suas áreas e transformadas efetivamente em vetores de força. No eixo temos a configuração de tensões mostrada na Figura 14.

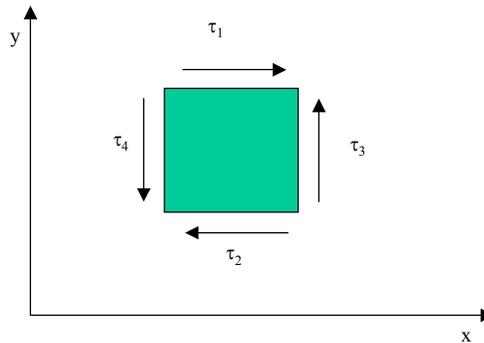


Figura 14: Estado de tensões na superfície do eixo

Multiplicando-se agora todas as tensões por suas áreas de atuação segundo a Figura 15(a) tem-se as forças equivalentes atuando em cada face. Passando-se um plano pela diagonal do elemento, para que ele se mantenha em equilíbrio deverá surgir uma componente normal à superfície, σ_{dB} (Figura 15 (b)).

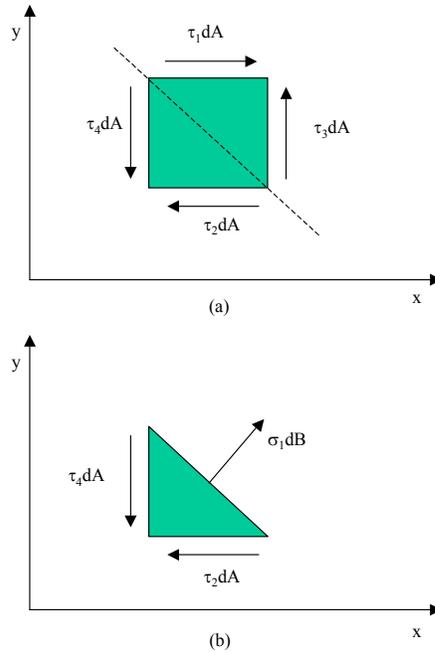


Figura 15: Transformação de tensões. (a) forças aplicadas nas faces. (b) força normal equivalente às forças cisalhantes

Somando as forças e igualando a zero temos:

$$\sum F = 0 \quad (47)$$

$$(\sigma_1 dB)^2 = (\tau_2 dA)^2 + (\tau_4 dA)^2. \quad (48)$$

Mas segundo a equação (46)

$$|\tau_2| = |\tau_4| \quad (49)$$

$$(\sigma_1 dB)^2 = (\tau_2 dA)^2 + (\tau_2 dA)^2 \quad (50)$$

$$\sigma_1 dB = \sqrt{2} \tau_2 dA, \quad (51)$$

porém em um triângulo retângulo com os catetos iguais sabe-se que $dB = \sqrt{2}dA$ então

$$|\sigma_1| = |\tau_2| = |\tau_3| = |\tau_4| = |\tau_1| . \quad (52)$$

Se for repetido o exemplo para todas as possibilidades de planos que passem pelas diagonais do elementos observa-se que em um plano que está rotacionado 45° em relação ao eixo x tem-se somente tensões normais e não mais cisalhantes (Figura 16).

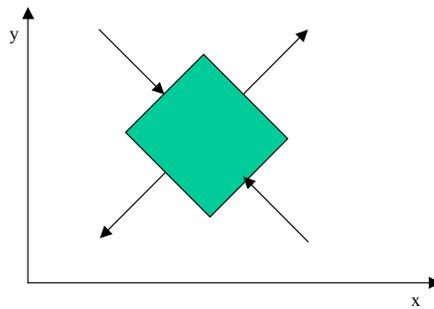


Figura 16: Transformação das tensões cisalhantes em tensões normais pela mudança do plano de referência

Foi demonstrada a Lei de Hooke uniaxial. No entanto como acaba de ser visto, na torção do eixo não se tem um estado uniaxial, mas sim biaxial. Este estado é chamado de estado plano de tensões pois efetivamente atua em duas direções, definindo assim um plano.

A lei de Hooke para o estado plano de tensões é dada por (POPOV,1978)

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad (53)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) , \quad (54)$$

onde:

σ_1 - primeira tensão principal [Pa];

σ_2 - segunda tensão principal [Pa];

E - módulo de elasticidade ou módulo de Young. [Pa];

ν - coeficiente de Poisson [adimensional];

ε_1 - primeira deformação principal [adimensional];

ε_2 - segunda deformação principal [adimensional].

Estas equações (53) e (54) são válidas somente quando existem puramente tensões normais aplicadas no elemento. Em outro caso, deve-se achar as tensões principais via círculo de Mohr (O círculo de Mohr calcula as tensões principais a partir de qualquer estado de tensões em um corpo. Por não ser este o escopo deste texto não é aqui demonstrado).

Estão deduzidas até aqui as tensões no eixo quando da aplicação de um torque e a relação entre estas tensões e o material do qual o eixo é constituído. É necessário deduzir a relação entre o torque aplicado e as tensões produzidas no eixo.

Seja um eixo com raio “c” e tensão de cisalhamento superficial τ_{\max} . Levando em consideração a segunda premissa (página 40) adotada para o estudo da torção, sabe-se que a tensão de cisalhamento no eixo varia linearmente de zero no centro do eixo até τ_{\max} na periferia. Logo uma tensão cisalhante interna localizada no raio ρ é gerada por um torque de:

Tensão cisalhante no raio r devido à aplicação do torque (variação linear do centro até a superfície)

$$\text{tensão cisalhante} = \frac{r}{c} \cdot \tau_{\max}. \quad (55)$$

Força de reação no raio ρ devido à aplicação do torque (tensão de cisalhamento multiplicada pela área de aplicação)

$$\text{força de reação} = \int_A \frac{r}{c} \cdot \tau_{\max} dA. \quad (56)$$

Torque de reação no raio ρ devido à aplicação do torque (força multiplicada pelo braço de alavanca)

$$\text{torque de reação} = \int_A \frac{\rho}{c} \cdot \tau_{\max} dA \cdot \rho. \quad (57)$$

Então, como o torque de reação tem o mesmo módulo do torque aplicado

$$\text{torque aplicado} = \int_A \frac{r}{c} \cdot \tau_{\max} dA \cdot \rho = T \quad (58)$$

na seção τ_{\max} e c são constantes logo

$$\text{torque aplicado} = \frac{\tau_{\max}}{c} \int_A r^2 dA = T, \quad (59)$$

a integral

$$\int_A r^2 dA \quad (60)$$

é notada como J e denominada momento polar de inércia de área de uma seção transversal, e representa as particularidades geométricas do perfil. No caso de um perfil circular $dA=2\pi\rho d\rho$,

$$J = \frac{\pi c^4}{2}, \quad (61)$$

onde:

J - momento polar de inércia de área de uma seção transversal circular [m^4];

c - raio do perfil circular [m].

Simplificando a equação do torque (59) tem-se

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{J}. \quad (62)$$

Esta é a equação deduzida por volta de 1775 por Coulomb (POPOV,1978).

Tem-se então equacionado todo o problema. Sabe-se que, pela equação (62), o torque que é transmitido pelo eixo gera uma deformação diretamente proporcional ao momento (torque) que passa pelo eixo, à distância do centro do eixo e inversamente proporcional ao momento polar de inércia do área J , que representa suas particularidades geométricas. Então se for possível a medição das tensões no eixo do gerador, pode-se calcular o torque que passa pelo mesmo.

Devido a sua dimensão e à impossibilidade de alteração ou inclusão de qualquer novo elemento construtivo no gerador (como por exemplo, uma célula de carga de torção entre a turbina e o gerador) a opção é a de instrumentar o eixo e assim retirar os valores de tensão reinantes em sua superfície.

3.1.2 Medição das Tensões

Para a medição das tensões na superfície do eixo utilizam-se extensômetros. Extensômetros são elementos resistivos colados à peça na qual deseja-se medir tensões. Quando o elemento é deformado, tensiona juntamente o extensômetro, fazendo com que ele aumente ou diminua a sua resistência elétrica.

3.1.2.1 Princípio de Funcionamento

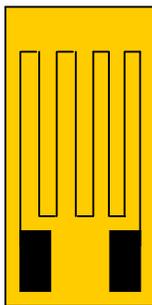


Figura 17: Desenho esquemático do extensômetro

Basicamente o extensômetro é composto por um filamento com área transversal reduzida conforme Figura 17. Colado na peça ele deforma juntamente com a superfície. Quando a superfície sofre compressão, isto é reduz o seu tamanho, os filamentos do extensômetro são comprimidos, e devido ao coeficiente de Poisson (ν) aumenta a área de passagem da corrente elétrica, com isso fazendo a sua resistência cair. Se a superfície sofre tração o filamento tem a seção transversal diminuída e conseqüentemente existe um aumento na sua resistência interna.

O extensômetro é confeccionado de modo que tenha sensibilidade em apenas uma direção. Devido ao seu princípio de funcionamento o extensômetro só é capaz de detectar tensões normais.

Como a variação de resistência é baixa geralmente se necessita de uma montagem elétrica específica e amplificadores.

É preciso correlacionar a variação de resistência do filamento à deformação na superfície do eixo.

Sabe-se que a resistência elétrica do filamento é dada por (BECKWITH, MARANGONI, LIENHARD, 1993):

$$R = \frac{\psi \cdot l}{S}, \quad (63)$$

onde:

R - resistência do condutor. [Ω];

ψ - resistividade do material do condutor [Ωm];

l - comprimento do condutor [m];

S - área transversal do condutor [m^2].

A área da seção transversal é considerada como CD^2 (BECKWITH, MARANGONI, LIENHARD, 1993) onde D é a dimensão principal da seção e C uma constante de proporcionalidade (por exemplo se a seção for quadrada, $C=1$, se for circular, $C=0,25\pi$). A equação (63) fica:

$$R = \frac{\psi \cdot l}{CD^2}. \quad (64)$$

Em um condutor tensionado a variação de resistência então é dada por:

$$dR = \frac{CD^2 (ld\psi + \psi dl) - 2C\psi l D dD}{(CD^2)^2} \quad (65)$$

$$dR = \frac{1}{CD^2} \left((ld\psi + \psi dl) - 2\psi l \frac{dD}{D} \right). \quad (66)$$

Dividindo então dR pela equação da resistência (64)

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dD}{D} + \frac{d\psi}{\psi}, \quad (67)$$

vem

$$\frac{dR/R}{dl/l} = 1 - 2 \frac{dD/D}{dl/l} + \frac{d\psi/\psi}{dl/l} . \quad (68)$$

Mas de acordo com o visto na equação (30)

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon_a \quad (69)$$

$$\frac{dD}{D} = \varepsilon_l , \quad (70)$$

onde:

ε_a - deformação específica na direção axial [*adimensional*];

ε_l - deformação específica na direção lateral [*adimensional*],

e a relação entre elas é denominada coeficiente de Poisson

$$\nu = - \frac{dD/D}{dl/l} , \quad (71)$$

então

$$k = \frac{dR/R}{dl/l} = \frac{dR/R}{\varepsilon_a} = 1 + 2\nu + \frac{d\psi/\psi}{dl/l} , \quad (72)$$

onde:

k - “*gage factor*” é a principal característica do extensômetro; indica a variação da resistência elétrica específica pela variação da deformação específica. [*adimensional*].

Calcula-se então a variação da resistência elétrica devido a variação unitária da deformação específica (ε). Mesmo sendo adimensional, a deformação específica é denominada como “*microstrain*” ($\mu\varepsilon$).

De acordo com a equação (72)

$$\varepsilon_a = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R}. \quad (73)$$

Valores típicos de k e R são respectivamente 2 e 120Ω (BECKWITH, MARANGONI, LIENHARD, 1993). Estes valores nos levam a uma variação de resistência (para uma deformação de $1\mu\varepsilon$)

$$\Delta R = kR\varepsilon_a = 2 \times 120 \times 0,000001 = 0,00024\Omega.$$

Este valor corresponde a uma variação específica da resistência elétrica de 0,0002%. A solução para a leitura deste valor pequeno de resistência é a ponte de Wheatstone (Figura 19).

3.1.2.2 O Extensômetro Semicondutor

Segundo de Silva (DE SILVA, 2007), em algumas aplicações onde se tenha pequena deformação como a medição de torque no eixo, a sensibilidade do extensômetro convencional é muito baixa, não sendo capaz de medir confiavelmente o valor da torção.

Nestas situações utilizam-se extensômetros semicondutores.

Os primeiros extensômetros semicondutores eram construídos a partir de germânio (HOFFMAN,1989) sendo posteriormente substituído por silício.

Estes transdutores são construídos de apenas um cristal de silício, dopado com alguma impureza (por exemplo o boro). O coeficiente deste extensômetro (k) está tipicamente entre 40 a 200, um valor muitas vezes maior que o do extensômetro metálico com um valor de k próximo de 2 unidades.

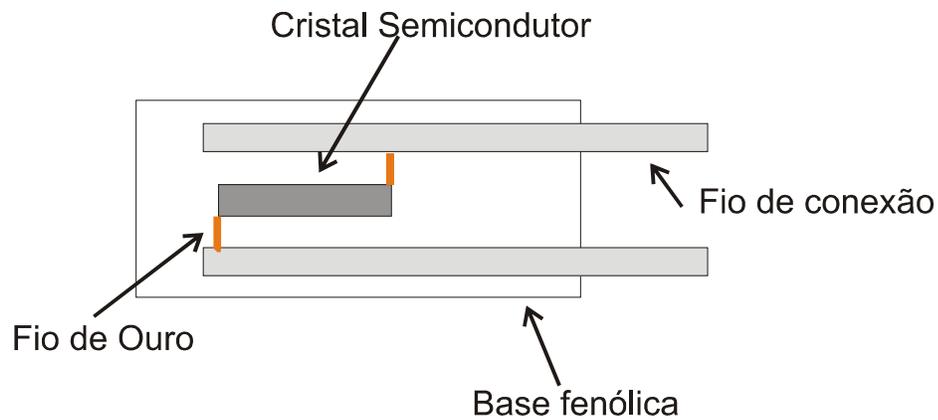


Figura 18: Esquema construtivo de um extensômetro semicondutor

No entanto estes extensômetros têm sérias desvantagens (DE SILVA, 2007):

- A relação resistência-deformação tem maior erro de não linearidade;
- São frágeis e muitas vezes de difícil instalação;
- São muito caros;
- São muito sensíveis ao aumento da temperatura.

Existem dois tipos de extensômetros semicondutores, o do tipo P e o do tipo N (conforme o material de dopagem) ambos não lineares. A diferença entre eles é que a constante do extensômetro semicondutor do tipo N é negativa. Desta forma quanto maior a deformação do sensor, menor a resistência. Este comportamento é o oposto do extensômetro metálico e semicondutor tipo P. Segundo a literatura o extensômetro do tipo P é mais sensível (k maior) e menos não-linear.

3.1.2.3 A Ponte de Wheatstone

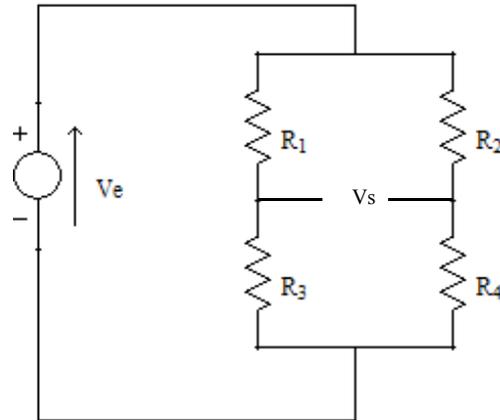


Figura 19: Ponte de Wheatstone

A função de transferência da ponte é

$$\frac{V_s}{V_e} = \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) - \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \quad (74)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{R_4 R_1 - R_3 R_2}{(R_2 + R_4)(R_1 + R_3)}. \quad (75)$$

Considerando que todas as resistências variem

$$dV_s = \frac{\partial V_s}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial V_s}{\partial R_2} dR_2 + \frac{\partial V_s}{\partial R_3} dR_3 + \frac{\partial V_s}{\partial R_4} dR_4. \quad (76)$$

Utilizando então a equação (75) temos

$$\frac{dV_s}{V_e} = \frac{R_3 dR_1}{(R_1 + R_3)^2} - \frac{R_4 dR_2}{(R_2 + R_4)^2} - \frac{R_1 dR_3}{(R_1 + R_3)^2} + \frac{R_2 dR_4}{(R_2 + R_4)^2}, \quad (77)$$

onde dR_1 , dR_2 , dR_3 e dR_4 são as variações nas resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . No entanto em uma montagem de ponte de Wheatstone utilizam-se extensômetros do mesmo lote e com a mesma resistência inicial, logo

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R. \quad (78)$$

Como utilizam-se quatro extensômetros e deseja-se conhecer a participação da variação de resistência de cada elemento no total, continua-se com as indicações de dR_1 , dR_2 , dR_3 e dR_4 . Substituindo

$$\frac{dV_s}{V_e} = \frac{dR_1 - dR_2 - dR_3 + dR_4}{4R}. \quad (79)$$

Porém segundo a equação (73)

$$\frac{dV_s}{V_e} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4), \quad (80)$$

Onde:

V_s - tensão elétrica de saída da ponte [V];

V_e - tensão elétrica de alimentação da ponte [V];

ε_1 - deformação medida no extensômetro 1 [m/m];

ε_2 - deformação medida no extensômetro 2 [m/m];

ε_3 - deformação medida no extensômetro 3 [m/m];

ε_4 - deformação medida no extensômetro 4 [m/m].

A equação (80) descreve a tensão de saída (sinal) para a montagem em ponte de Wheatstone completa (com os quatro elementos resistivos medindo). As equações para outras montagens são derivadas desta.

3.1.3 Medição no Eixo do Gerador

Para medir as tensões na superfície do eixo do gerador as seguintes considerações serão tomadas:

- O extensômetro só mede tensões normais (tração e compressão).
- Tensões normais são encontradas em um plano rotacionado de 45° em um eixo em torção. As tensões apresentadas neste plano são de tração e compressão conforme Figura 16.

Conforme estas considerações a montagem da ponte de extensômetros deve ser da forma mostrada na Figura 20.

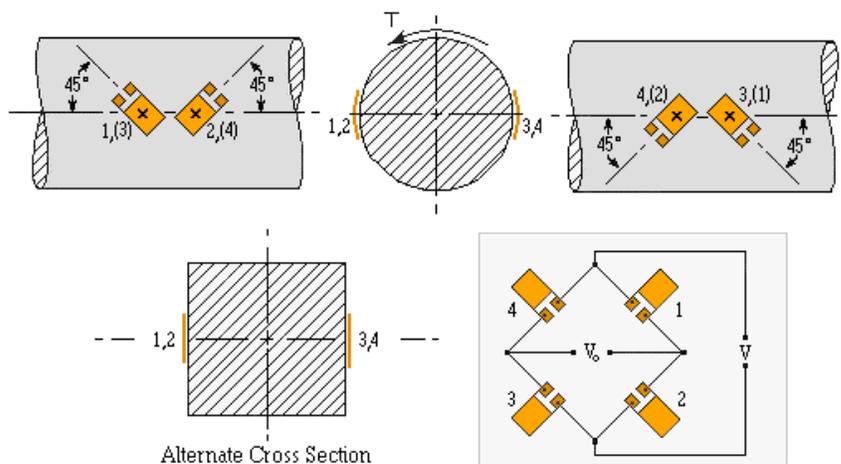


Figura 20: Figura demonstrando o posicionamento dos extensômetros no eixo (imagem retirada do site www.vishay.com)

Com esta montagem tem-se os extensômetros 1 e 3 comprimindo e os extensômetros 2 e 4 tracionando, ou vice-versa, de acordo com o sentido do torque. Sabe-se que a deformação em 1 e 3 será de ϵ e em 2 e 4 de $-\epsilon$. Conforme as equações (52), (53), (54) e (62),

$$T = \frac{\varepsilon EJ}{(1 + \nu)c} , \quad (81)$$

onde:

T - torque efetivo que passa pelo eixo [Nm];

ε - deformação específica medida pelo extensômetro [*adimensional*];

J - momento polar de inércia de área de uma seção transversal do eixo [m^4];

ν - coeficiente de Poisson [*adimensional*];

c - raio do eixo [m].

3.1.4 Medição do Rendimento

Para medir-se a potência que passa pelo eixo, utiliza-se

$$P = T \cdot \omega , \quad (82)$$

onde:

P - potência que passa no eixo [W];;

T - torque efetivo que passa pelo eixo [Nm];

ω - velocidade angular do eixo [rad/s],

Considera-se que a velocidade angular do eixo é fixa devido a frequência da rede ser fixa. O rendimento do gerador então é dado conforme fórmula (83). Utilizando-se a medição de potência elétrica gerada, disponível em tempo real na usina. Caso não se tenha este dado pode-se medi-lo utilizando um wattímetro com transformadores de corrente e tensão no barramento elétrico de saída do gerador.

$$\eta_{gerador} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{elétrica}}{P_{mecânica}} \quad (83)$$

Nota-se a extrema simplicidade da medição de rendimento deste método. Medindo diretamente a deformação no eixo, calcula-se, utilizando três equações ((81), (82) e (83)), o rendimento do gerador em tempo real para qualquer carga.

3.2 CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO DO EIXO (MÉTODO EXTENSOMÉTRICO)

Para o cálculo da deformação para a utilização do método extensométrico são necessárias as fórmulas (61), (80), (81), (82)

$$J = \frac{\pi c^4}{2}$$

$$\frac{dV_s}{V_e} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

$$T = \frac{\varepsilon EJ}{(1 + \nu)c}$$

$$P = T \cdot \omega.$$

Deve-se então levantar a equação de tensão de saída da ponte de Wheatstone em função da potência no gerador. Como é utilizada uma ponte completa (com os quatro extensômetros medindo) temos que:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = \varepsilon \text{ e } \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon$$

Logo a equação (80) reduz-se a:

$$\frac{dV_s}{V_e} = k \cdot \varepsilon. \quad (84)$$

Substituindo (84) e (82) em (81) vem:

$$\frac{dV_s}{V_e} = k \cdot \frac{P}{\omega} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot c}{E \cdot J} \quad (85)$$

Onde J pelo fato de ser um eixo oco se torna:

$$J = \frac{\pi c_e^4}{2} - \frac{\pi c_i^4}{2}, \quad (86)$$

onde:

c_e - raio externo do eixo [m];

c_i - raio interno do eixo [m].

Adotando então os valores de 207,5 GPa e 0,29 para o módulo de elasticidade do aço e para o coeficiente de Poisson respectivamente (Estes são valores médios para o aço) e 2 para a constante do extensômetro (k).

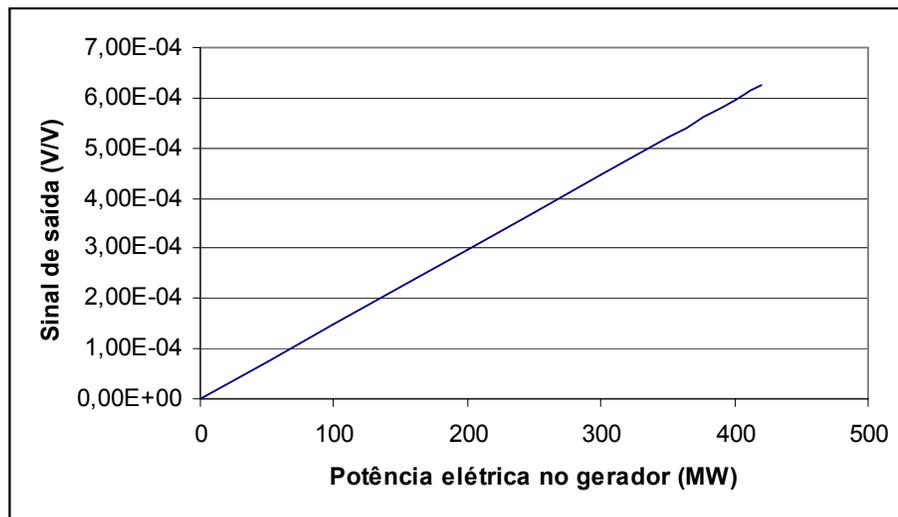


Figura 21: Sinal de saída em função da potência elétrica no gerador, para o método extensométrico (para k=2)

Nota-se a pequena amplitude do sinal de saída (Figura 21) mesmo para potências elevadas (aproximadamente 0,0006 para 400MW). Isto se deve ao uso de extensômetros convencionais com “k” próximo a dois. Para refinar o sistema deverão ser utilizado extensômetros semicondutores com “k” da ordem de 140 (Figura 22).

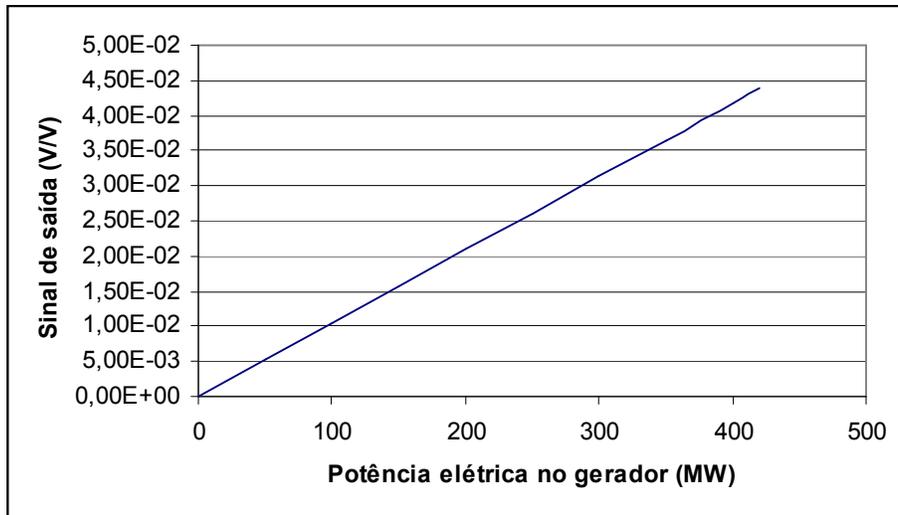


Figura 22: Sinal de saída em função da potência elétrica no gerador, para o método extensométrico (para $k=140$)

É possível notar uma melhora significativa no sinal (0,0425 para 400MW), viabilizando assim a medição.

CAPÍTULO 4

UMA SEGUNDA ALTERNATIVA AO MÉTODO CALORIMÉTRICO

4.1 O MÉTODO FASE PERÍODO

O método extensométrico apresenta algumas desvantagens, como por exemplo a necessidade de utilização de instrumentação acoplada ao eixo. Esta instrumentação necessita de um canal de alimentação e um canal de dados. Com o advento da telemetria o problema com o canal de dados é facilmente solucionado através do envio das medições através de ondas de rádio. No entanto o canal de energia (alimentação) ainda é um dos grandes problemas. É possível a utilização de energia induzida ou gerada através de painéis fotovoltaicos, ou mesmo baterias (que com o passar de algumas horas devem ser substituídas). Estas soluções geram sistemas mais complexos e quanto mais complexo menos confiável.

Como uma resposta a este problema, é demonstrada na seqüência uma nova metodologia. Com ela são possíveis a medição de torque e potência com uma instrumentação simples e com um circuito facilmente protegido contra ruídos (aos quais está susceptível o circuito extensométrico) e com todo o aparato de medição “fora do eixo”, isto é, não existe dispositivo de medição girando com o eixo e conseqüentemente eliminando a necessidade da entrada de energia e retirada de dados do mesmo.

4.1.1 Considerações físicas sobre o eixo

Seja um eixo de comprimento L e raio c sujeito a um torque T (Figura 23) .

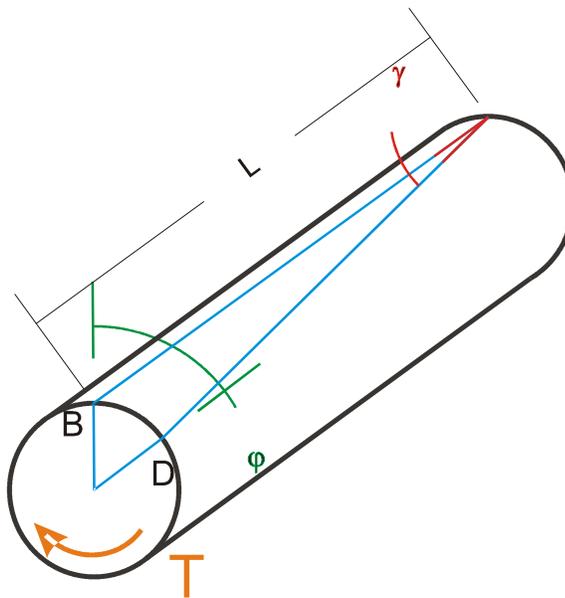


Figura 23: Corpo deformado devido ao torque T .

Sabe-se que torcendo um eixo (aplicando um torque) ocorre uma deformação elástica (Figura 23 arco BD). Pode-se então escrever (POPOV,1978):

$$BD = L \cdot \gamma \quad (87)$$

$$BD = c \cdot \varphi \quad (88)$$

$$L \cdot \gamma = c \cdot \varphi ; \quad (89)$$

onde:

L - comprimento do eixo [m];

c - raio do eixo [m];

γ - ângulo de deformação na superfície do eixo [*rad*];

φ - ângulo de deformação na seção do eixo [*rad*].

Conforme visto na equação (40) o ângulo γ é proporcional ao cisalhamento na superfície (τ) e é dado por:

$$\gamma = \frac{\tau}{G}.$$

Sabe-se também que a tensão de cisalhamento na superfície é dada pela equação (62)

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{J}.$$

Desta forma a deformação angular na superfície do eixo (γ) é dada por:

$$\gamma = \frac{T \cdot c}{J \cdot G}. \quad (90)$$

Substituído (90) em (89) resulta:

$$\varphi = \frac{T \cdot L}{J \cdot G}. \quad (91)$$

Tem-se então a relação entre o torque aplicado e a deformação sofrida por um eixo a uma distância L da origem. E multiplicando o torque medido pela velocidade angular do eixo tem-se a potência de entrada no gerador.

4.1.2 A metodologia

Existem alguns métodos capazes de medir o ângulo de deformação elástica.(WEBSTER, 1999)(DOEBELIN, 1990)

O método mais simples para se fazer isto é colocar um *encoder* em cada ponta do eixo e medir o seu defasamento.

É necessário, no entanto, atentar a alguns detalhes importantes:

- O eixo do qual se deve medir o ângulo de deformação pertence a um conjunto hidrogerador e não pode ser seccionado para a instalação de um *encoder* ou qualquer outro sistema. Existem sistemas óticos usados para a medição de deslocamento em máquinas ferramenta que poderiam ser usados neste sistema, no entanto a velocidade superficial do eixo supera em muito a velocidade de leitura destes sistemas.
- A deformação presente no sistema é muito pequena e é necessário levar em conta os erros geométricos e de medida para que a medição não retorne sinais expúrios (baixa relação sinal ruído). Existem diversos métodos nos quais se aplica uma “cinta” denteada em torno de duas seções do eixo e mede-se a defasagem entre elas (NORTHROP, 2005). No entanto como a deformação no eixo é muito pequena não tem-se como garantir que a tolerância de fabricação destas cintas por si só não mascare a medida.

O método ideal deve, então, ter alta resolução para se medir pequenas deformações, ser robusto de forma que tolerâncias geométricas não interfiram na medida, e de instalação simples para que não precise alterar a arquitetura construtiva do hidrogerador.

Em seu livro “*Introduction to Instrumentation and Measurements*” pág 436, Northrop mostra o método idealizado por Du, baseado em um circuito projetado por Nemat.

Dota-se duas seções do eixo (a uma distância conhecida entre elas) de marcas (ou dentes) em fase e sensores óticos, caso as marcas sejam “pintadas”, ou sensores de proximidade caso as marcas sejam “dentes” (Figura 24).

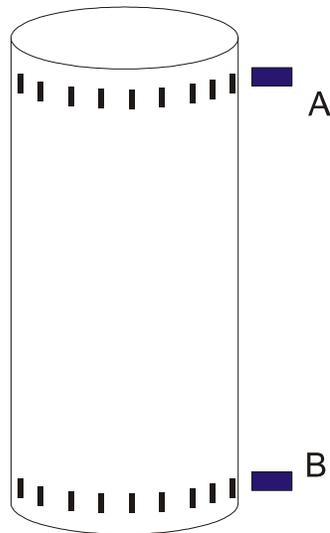


Figura 24: Disposição das marcações e dos sensores segundo método de Du

Os sensores A e B (Figura 24), com o eixo girando, geram ondas de pulsos quadrados. Aplicando-se torque no eixo, ocorre uma deformação do mesmo (Figura 23).

Esta deformação gera um defasamento entre a onda de pulsos quadrados do sensor A e a onda de pulsos quadrados do sensor B. Du, resolveu o problema de medição de fase da seguinte forma:

- Mede-se a frequência de um dos canais (correspondente a A ou B).
- Com esta frequência, alimenta-se um oscilador em malha fechada que tenha uma frequência de 360.000 vezes a frequência medida.
- Com esta frequência 360.000 vezes maior, conta-se o número de pulsos entre a borda de subida de um sinal em relação à borda de subida do outro.

Com este sistema consegue-se uma resolução de $0,001^\circ$ (NORTHROP,2005).

Este sistema tem duas desvantagens para a utilização em hidrogeradores:

- Como gravar um eixo instalado.
- Caso a marcação seja possível, como garantir que cada pulso tenha a mesma largura e que os pulsos tenham fase constante entre a seção superior e a inferior.

Estão disponíveis no mercado, sistemas de marcação de alta precisão que poderiam ser utilizados para a marcação (por exemplo corrosão foto química e no caso extremo usinagem

por feixe de elétrons). No entanto estes sistemas têm o seu uso impossibilitado em campo (devido as dimensões tanto da peça a ser gravada quanto do maquinário), custo elevado, ou são incapazes de trabalhar com peças de grandes dimensões.

A metodologia desenvolvida neste trabalho vem solucionar estes problemas.

4.1.3 Metodologia proposta

O princípio do método, denominado fase período é simples: Fundamenta-se na medição do ângulo de deformação no eixo e com o auxílio da equação (91) obtem-se o torque que atravessa o eixo.

Porém, como visto, o método de Du e outros sistemas fazem exatamente a mesma medida e no entanto tem restrições para o uso em hidrogeradores. Para se ter a chave para as questões apresentadas pelo sistema de Du e pelos outros sistemas por pulso, é preciso responder primeiro: Quais são as grandezas que podem ser medidas com mais resolução pelo homem?

Uma destas grandezas é o tempo. Desde épocas imemoriais o homem sente a necessidade de medir o tempo. Em 1967 foi definido que um segundo é o tempo de duração de 9.192.631.770 períodos de ciclo de luz emitida pelo isótopo 133 do Césio (OLIVEIRA FILHO, SARAIVA, 2007).

Com o desenvolvimento atual da eletrônica e das telecomunicações a contagem de tempo (“*clock*” preciso) se tornou fundamental e acessível.

E é dessa forma que parte do problema é solucionada. Podemos então medir pequenas deformações a partir de uma medição precisa do tempo, e não diretamente a fase como é proposto nas demais metodologias.

O método proposto é similar ao apresentado por Du. Em duas seções do eixo (à uma distância conhecida) coloca-se uma marcação (Figura 25). Estas marcações não necessitam estar propriamente alinhadas e nem necessitam ter as mesmas dimensões (largura).

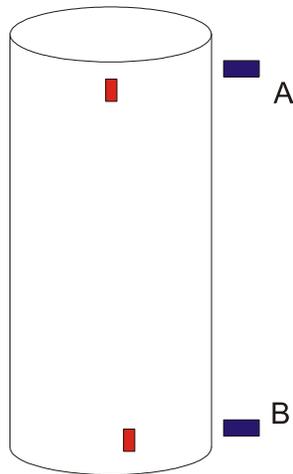


Figura 25: Esquema de montagem proposta por Horbatiuk

Devido ao ambiente de usina, utilizam-se sensores de proximidade (o histórico de instrumentação em usinas hidroelétricas desaconselha o uso de sensores óticos devido ao acúmulo de sujeira com o decorrer do tempo). Estas marcações podem ser pequenos corpos metálicos (como por exemplo, um pedaço de barra chata) ou mesmo um pequeno cordão de solda.

Com o eixo girando tem-se então os sinais característicos (Figura 26)

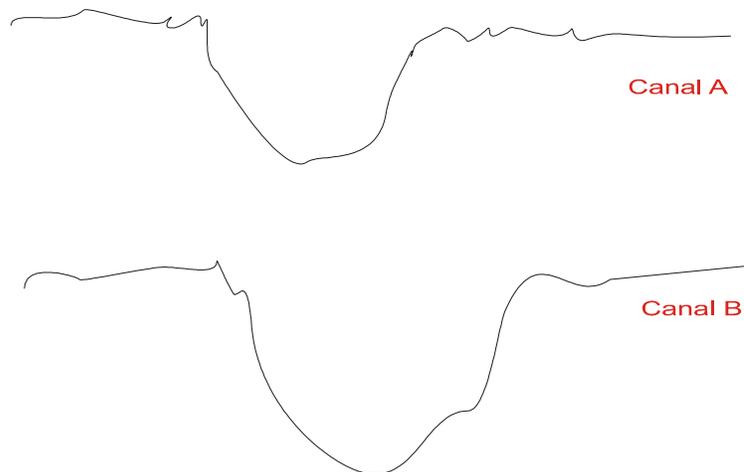


Figura 26: Sinais característicos (com ruído) dos medidores de proximidade

Pode-se notar (Figura 26) que os sinais são bem desuniformes, seguindo a rugosidade da superfície do eixo e também a sua oscilação (por se tratarem de máquinas de grandes dimensões os hidrogeradores tem mancais lubrificadas por filme de óleo, podendo portanto oscilar).

Para tratar os sinais de forma que possa ser feita a medição, os mesmos passam por amplificadores operacionais específicos para comparação, adquirindo cada um a forma de um pulso retangular como mostrado na Figura 27.

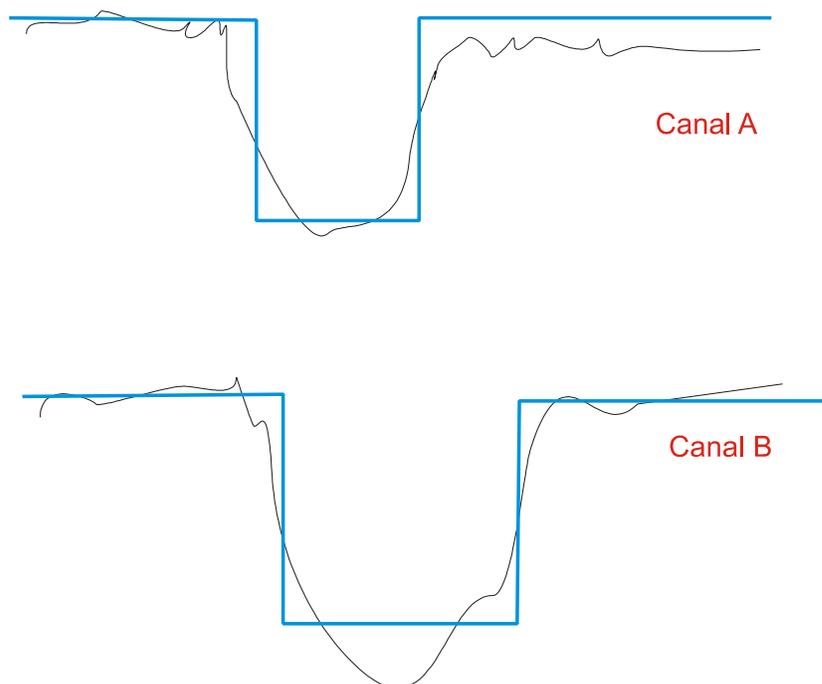


Figura 27: Sinal após passagem por comparadores

Sensores de proximidade geralmente são alimentados por tensão negativa (resultando então os sinais mostrados na Figura 26 e Figura 27). Após os comparadores os sinais passam por portas inversoras, ficando prontos para a etapa de medição (Figura 28).

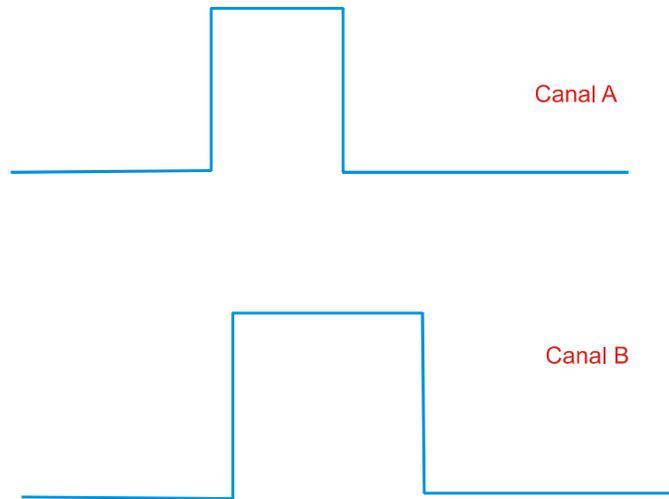


Figura 28: Sinais após passagem por portas inversoras.

Passando então os sinais por um circuito *flip-flop* obtém-se uma nova onda (Figura 29). Esta é a onda de medição.

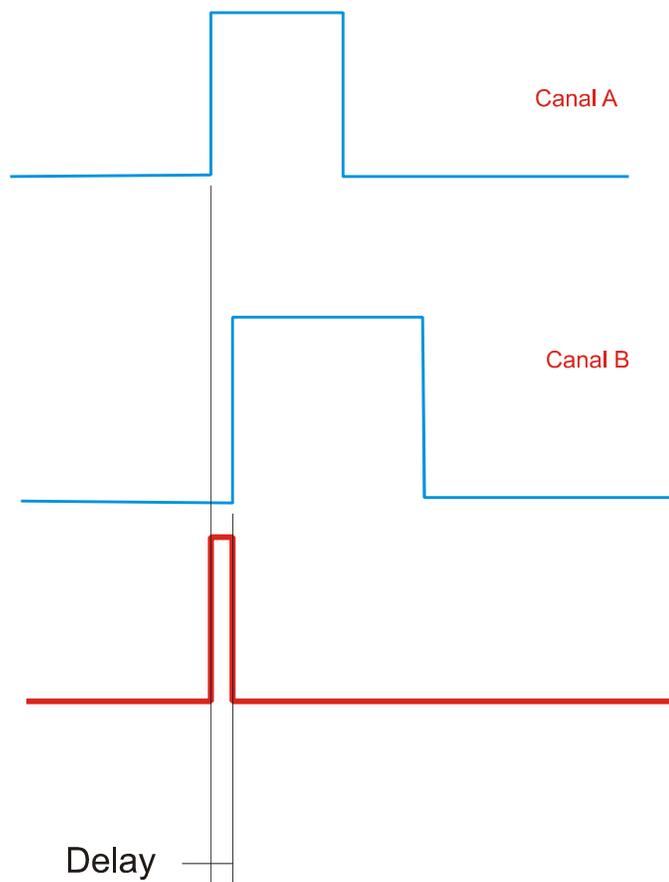


Figura 29: Geração da onda de medição

Nos passos anteriores foi descrito o tratamento do sinal para uma volta do eixo do hidrogerador. Então para medição contínua tem-se um trem de pulsos retangular onde a defasagem e conseqüentemente o torque que passa pelo eixo é diretamente proporcional duração do pulso de medição.

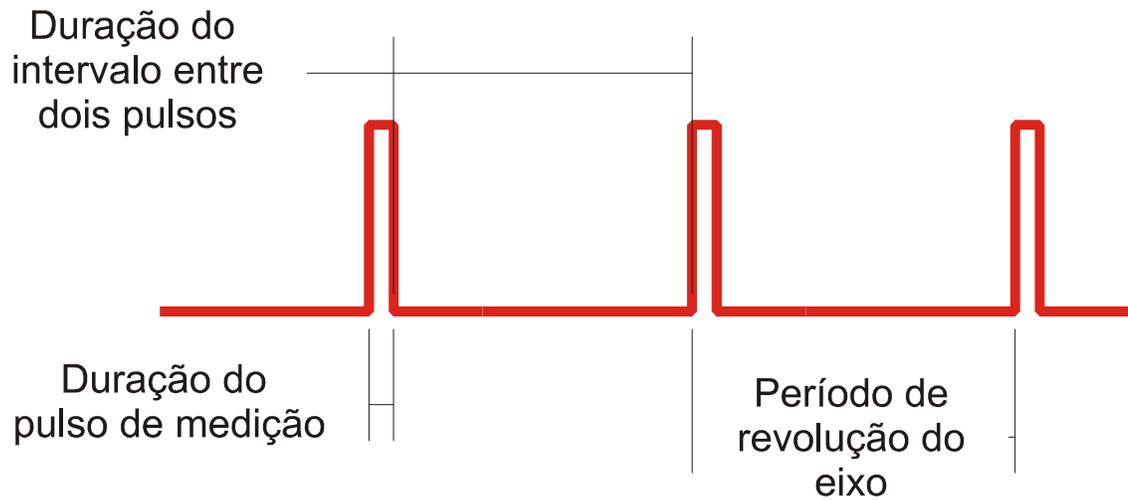


Figura 30: Sinal tratado pronto para a medição.

Como só existe um pulso por volta, a soma da duração do pulso com a duração do intervalo entre dois pulsos é igual ao período de revolução do eixo e cujo recíproco é a rotação do mesmo (Figura 30), logo:

$$\text{Período de rotação} = \frac{n_1 + n_2}{f_{clock}} \quad (92)$$

$$V_{eixo} = \frac{f_{clock}}{n_1 + n_2} \cdot 60 \quad (93)$$

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (94)$$

onde:

n_1 – número de pulsos de *clock* do pulso de medição [*adimensional*];

n_2 – número de pulsos de *clock* do intervalo [*adimensional*];

f_{clock} – frequência do gerador de pulsos [*Hz*];

V_{eixo} – velocidade de rotação do eixo [RPM];

φ - ângulo de deformação na seção do eixo [rad].

Utilizando então a equação (91)

$$\varphi = \frac{T \cdot L}{J \cdot G},$$

e substituindo φ por (94)

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \frac{J \cdot G}{L} \cdot \frac{n_1}{n_1 + n_2}. \quad (95)$$

A potência será dada por

$$P_{eixo} = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot \frac{V_{eixo}}{60}, \quad (96)$$

onde:

P_{eixo} – Potência mecânica transmitida pelo eixo [W].

Deve-se notar que o equacionamento apresentado nas equações (92) a (96) só está correto caso as marcações no eixo (Figura 25) estejam exatamente em fase. Caso isto não ocorra há na medição um erro sistemático. Esta falha pode representar um erro grosseiro no resultado da medição de rendimento do gerador. Deve-se então medi-lo.

Em campo é praticamente impossível a instalação de um dispositivo no eixo (conforme Figura 25) com um alinhamento perfeito, ou mesmo com um desalinhamento “controlado”.

Mesmo um erro pequeno de alinhamento (por exemplo 0,05 mm) pode ser maior que a deformação do eixo. Para solucionar este problema foi desenvolvido um procedimento para medir o desalinhamento inicial das marcações.

Procedimento para a medição do desalinhamento inicial das marcações:

- Primeiramente coloca-se o hidrogenador para girar em velocidade nominal, porém sem carga.

- Depois da velocidade estabilizada mede-se o desalinhamento.

Este desalinhamento medido é devido em grande parte somente ao erro de montagem do sistema. Porém um olhar mais aprofundado nota-se um detalhe importantíssimo. Se o hidrogerador está girando (e por mais que se tente não existem mancais com rendimento de 100%) parte dessa defasagem é proveniente do torque necessário para vencer os atritos internos dos mancais. Então se descontarmos este desalinhamento inicial teremos exatamente a energia diretamente cedida para se gerar energia elétrica sem a parcela de energia necessária para fazer o gerador “girar”. Em relação à potência total do gerador, esta parcela mecânica é muito pequena, no entanto, é importantíssima para se medir o rendimento de uma máquina elétrica (cujo valor oscila em torno de 98%).

Faz-se necessário então um novo procedimento capaz de quantificar exatamente o desalinhamento inicial.

Põe-se então a pergunta: Sob que condições somente o desalinhamento devido à instalação pode ser medido?

A resposta é simples. Somente quando a máquina está parada não existe nenhuma outra parcela atuando no valor total do desalinhamento, pois nessa condição não há deformação do eixo.

Faz-se então um segundo ensaio.

Coloca-se a máquina em rotação nominal sem carga e mede-se a rotação V_{eixo} , e a deformação angular na seção do eixo φ .

Fecha-se o distribuidor do hidrogerador, fazendo com que o mesmo comece a parar de girar.

Até a parada da máquina, tomam-se diversos pontos com as rotações decrescentes e as deformações correspondentes (Figura 31).

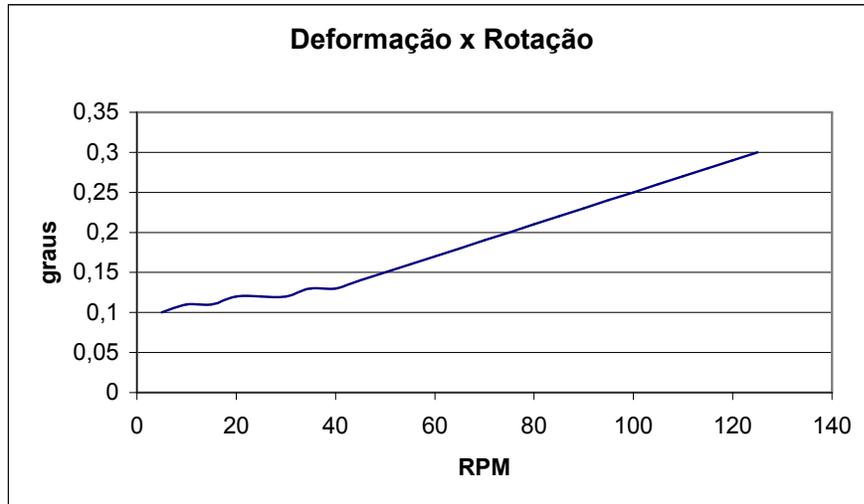


Figura 31: Exemplo de dados deformação x rotação

Se então interpolarmos os dados por mínimos quadrados e extrapolarmos para a rotação de 0 RPM, teremos o desalinhamento inicial devido a montagem do sistema (Figura 32).

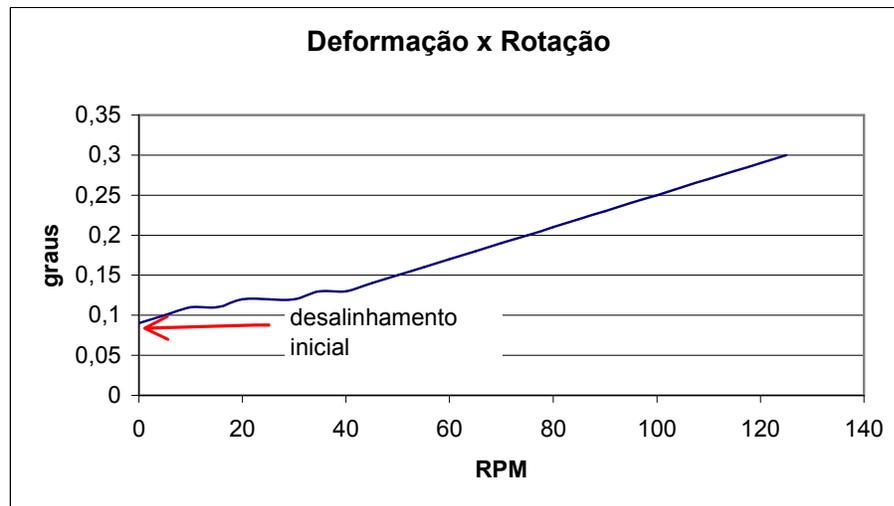


Figura 32: Exemplo dos dados mostrando o desalinhamento inicial do sistema

Pode-se então reescrever as equações levando em conta o desalinhamento inicial.

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1 - n_{inicial}}{n_1 + n_2} \quad (97)$$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \frac{J \cdot G}{L} \cdot \frac{n_1 - n_{inicial}}{n_1 + n_2}, \quad (98)$$

onde:

$n_{inicial}$ – número de pulsos devido ao desalinhamento inicial [*adimensional*].

E então substituí-las na equação de potência (96)

$$P_{eixo} = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot \frac{V_{eixo}}{60}.$$

4.2 CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO DO EIXO (MÉTODO FASE-PERÍODO)

Para o método fase-período utilizam-se as equações (43), (61), (82), (91)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$J = \frac{\pi c^4}{2}$$

$$P = T \cdot \omega$$

$$\varphi = \frac{T \cdot L}{J \cdot G}$$

Para utilizar o método fase-período precisa-se calcular o tempo de passagem do arco BD (Figura 33).

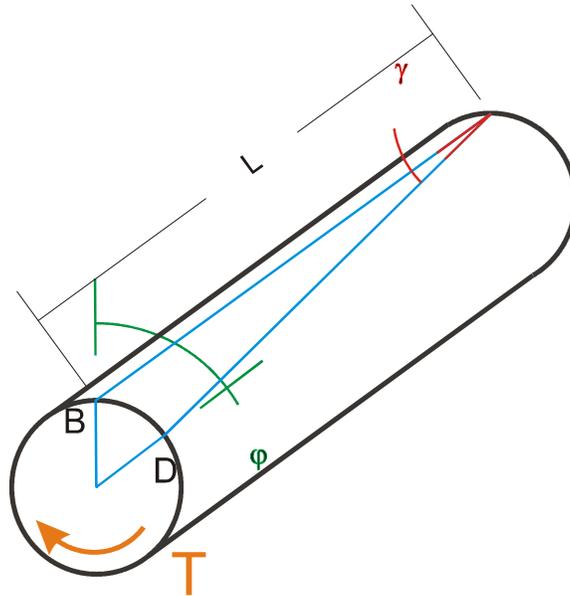


Figura 33: Desenho esquemático da deformação torsional sofrida pelo eixo devido a um torque T

O tempo de passagem é dado dividindo-se o comprimento do arco BD pela velocidade tangencial do eixo, utilizando então as equações dadas, chega-se em

$$tempo_{bd} = \frac{P \cdot L}{J \cdot G \cdot \omega^2} \quad (99)$$

Utilizando então os mesmos dados para o aço utilizados no cálculo anterior e adotando um comprimento de medição (L) de 1,5 m, chega-se ao resultado (Figura 34)

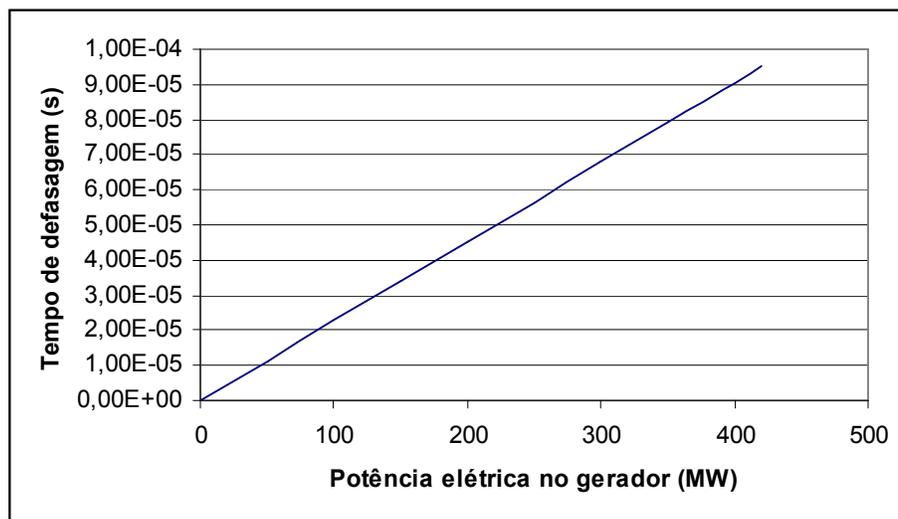


Figura 34: Gráfico mostrando a defasagem em função da potência elétrica no gerador

Para a contagem de tempo utiliza-se uma placa contadora dedicada com frequência de 80 MHz. Colocando-se então a defasagem na forma de número de pulsos da placa, tem-se (Figura 35)

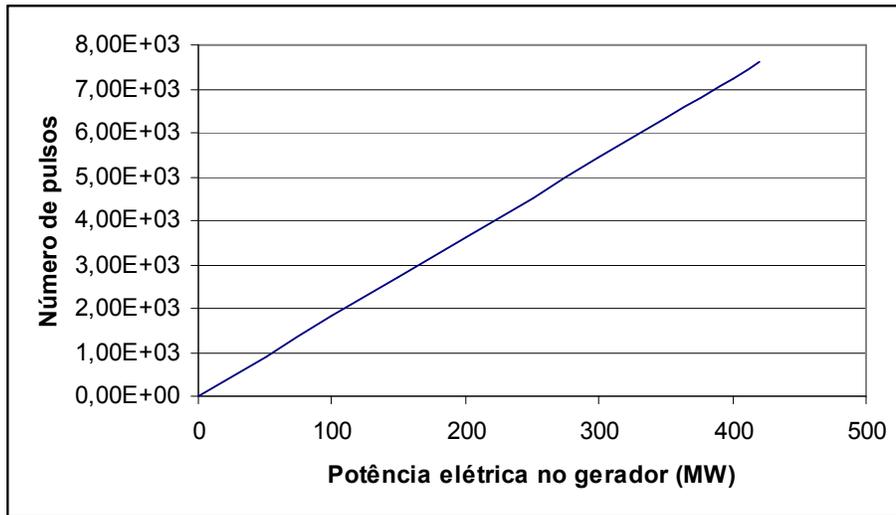


Figura 35: Gráfico do número de pulsos de defasagem em função da potência elétrica

Nota-se que o número de pulsos é de ordem elevada, deixando claro a viabilidade do método.

CAPÍTULO 5

QUALIFICAÇÃO DAS METOLOGIAS

5.1 INCERTEZA DA MEDIÇÃO

Para avaliar se o sistema de medição está medindo corretamente a grandeza física à ser medida, tem-se de conhecer bem a incerteza da medição. Por exemplo, mede-se uma resistência elétrica com um multímetro digital. Admite-se que a incerteza do sistema de medição é de $\pm 1/2$ dígito, para motivo de ilustração, então se for medido uma resistência de 120Ω o display irá indicar 120Ω , no entanto deve se ter em mente que na verdade a indicação de 120 quer dizer a faixa de 119,5 até 120,5 isto é $120 \pm 1/2 \Omega$. Logo para saber se um sistema é eficaz tem-se de calcular a incerteza do mesmo.

Em toda e qualquer medição existem incertezas intrínsecas aos próprios transdutores e instrumentos utilizados. Em um sistema de medição onde existem diversas partes tais como transdutores, amplificadores e filtros, esta incerteza se combina e se propaga (somando-se) desde a medição da grandeza física até a leitura final dos valores. Então para que se avalie se a medição traduz o valor medido com a precisão desejada deve-se ter em mãos a incerteza propagada pelo sistema. A incerteza em um sistema é dada pela equação (100) (BECHWITH, MARANGONI, LIENHARD,1993).

$$u_{total} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\Delta u_j \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial i_j} \right) \right]^2}, \quad (100)$$

onde:

u_{total} - incerteza total da medida;

n - número de variáveis;

Δu_j - incerteza da variável j ;

f - função matemática do sistema;

i_j - j -ésima variável.

5.2 INCERTEZA DO MÉTODO EXTENSOMÉTRICO

A potência transmitida pelo eixo medida pelo método extensométrico é dada pelas equações:

$$\frac{dV_s}{V_e} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

$$T = \frac{\varepsilon EJ}{(1 + \nu)c}$$

$$J = \frac{\pi c^4}{2}$$

$$P = T \cdot \omega.$$

Substituindo as variáveis na equação da potência e sabendo que devido à montagem a deformação nos extensômetros 1 e 3 será de ε e a de 2 e 4 de $-\varepsilon$

$$P_{eixo} = \frac{\omega \cdot \pi}{2 \cdot k} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{E}{c_{ext} \cdot (1 + \nu)} \cdot (c_{ext}^4 - c_{int}^4), \quad (101)$$

onde:

P_{eixo} - potência que passa pelo eixo [W];

ω - velocidade angular do eixo [rad/s];

k - constante do extensômetro [adimensional];

V_s - tensão de saída da ponte de Wheatstone [V];

V_e - tensão de alimentação da ponte de Wheatstone [V];

E - módulo de elasticidade do material do eixo [Pa];

c_{ext} - raio externo do eixo [m];

c_{int} - raio interno do eixo [m];

ν - coeficiente de Poisson [adimensional].

Necessita-se portanto das incertezas de cada grandeza (dados de instrumentos disponíveis)

$\Delta\omega$ - 0,6597 [rad/s];
 Δk - 4,26 [adimensional];
 ΔV_s - 0,2% [V];
 ΔE - 5.000.000.000 [Pa];
 Δc_{ext} - 0,0005 [m];
 Δc_{int} - 0,0005 [m];
 $\Delta\nu$ - 0,025 [adimensional].

E as derivadas parciais ficam

$$\frac{\partial f}{\partial \omega} = \frac{\pi}{2 \cdot k} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{E}{c_{ext} \cdot (1 + \nu)} \cdot (c_{ext}^4 - c_{int}^4) \quad (102)$$

$$\frac{\partial f}{\partial k} = -\frac{\pi \cdot \omega}{2 \cdot k^2} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{E}{c_{ext} \cdot (1 + \nu)} \cdot (c_{ext}^4 - c_{int}^4) \quad (103)$$

$$\frac{\partial f}{\partial V_s} = \frac{\pi \cdot \omega}{2 \cdot k} \cdot \frac{1}{V_e} \cdot \frac{E}{c_{ext} \cdot (1 + \nu)} \cdot (c_{ext}^4 - c_{int}^4) \quad (104)$$

$$\frac{\partial f}{\partial E} = \frac{\pi \cdot \omega}{2 \cdot k} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{1}{c_{ext} \cdot (1 + \nu)} \cdot (c_{ext}^4 - c_{int}^4) \quad (105)$$

$$\frac{\partial f}{\partial c_{ext}} = \frac{\pi \cdot \omega}{k} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \left[2 \cdot c_{ext}^2 - \frac{(c_{ext}^4 - c_{int}^4)}{2 \cdot c_{ext}^2} \right] \quad (106)$$

$$\frac{\partial f}{\partial c_{int}} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \omega}{k} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \frac{c_{int}^3}{c_{ext}} \quad (107)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \nu} = -\frac{\pi \cdot \omega}{2 \cdot k} \cdot \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{E}{c_{ext} \cdot (1 + \nu)^2} \cdot (c_{ext}^4 - c_{int}^4) \quad (108)$$

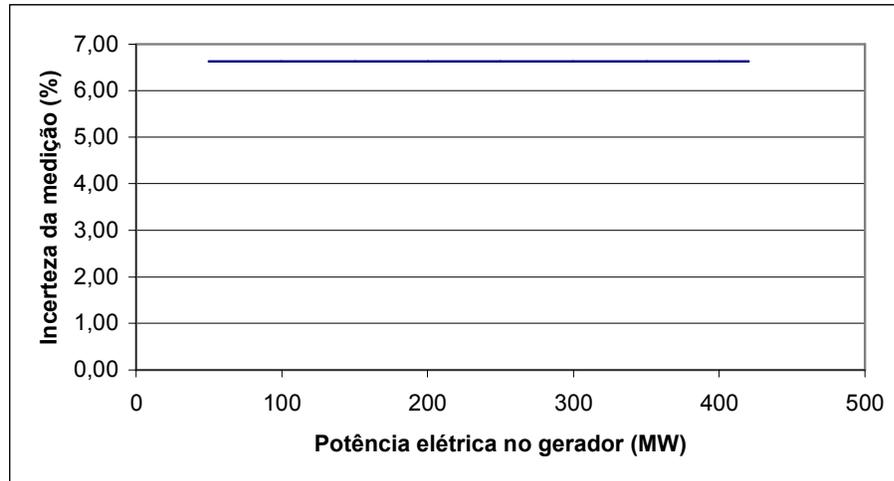


Figura 36: Gráfico mostrando a incerteza da medição em função da potência no gerador

De acordo com a Figura 36 a incerteza independe do valor da potência ficando em torno de 6,62% para valores genéricos do módulo de elasticidade para o aço e coeficiente de Poisson. (com respectiva incerteza de 5GPa e 0,025).

No entanto se é conhecido ao certo o material e para efeitos de comparação se admite uma incerteza de 0,5% para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, tem-se então uma incerteza de 5,86% um valor ainda assim elevado.

Esta incerteza é consequência do uso de extensômetros semi-condutores que ao contrário dos extensômetros convencionais (com incertezas de até 0,1%) tem uma incerteza mínima de 3% contribuindo assim de forma significativa para a incerteza total do sistema.

5.3 INCERTEZA DO MÉTODO FASE-PERÍODO

A potência medida transmitida pelo eixo na metodologia fase período é dada pelas equações:

$$\varphi = \frac{T \cdot L}{J \cdot G}$$

$$V_{eixo} = \frac{f_{clock}}{n_1 + n_2} \cdot 60$$

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1 - n_{inicial}}{n_1 + n_2}$$

$$J = \frac{\pi c^4}{2}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$P_{eixo} = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot \frac{V_{eixo}}{60}$$

Substituindo as variáveis na equação da potência temos:

$$P_{eixo} = f_{clock} \cdot \pi^3 \cdot \frac{E(c_{ext}^4 - c_{int}^4)}{L \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{(n_1 - n_{inicial})}{(n_1 + n_2)^2}, \quad (109)$$

onde:

P_{eixo} - potência que passa pelo eixo [W];

f_{clock} - frequência do oscilador usado para a contagem de pulsos [Hz];

E - módulo de elasticidade do material do eixo [Pa];

c_{ext} - raio externo do eixo [m];

c_{int} - raio interno do eixo [m];

L - distancia entre as duas seções utilizadas no método [m];

ν - coeficiente de Poisson [*adimensional*];

n_1 - número de pulsos do semi-ciclo positivo [*adimensional*];

n_2 - número de pulsos do semi-ciclo negativo [*adimensional*];

$n_{inicial}$ - número de pulsos devido ao desalinhamento inicial [*adimensional*];

Necessita-se portanto das incertezas de cada grandeza (dados de bibliografia e de instrumentos disponíveis)

Δf_{clock} - 4000 [Hz];

ΔE - 5.000.000.000 [Pa];

$$\begin{aligned}
\Delta c_{\text{ext}} &- 0,0005 \quad [m]; \\
\Delta c_{\text{int}} &- 0,0005 \quad [m]; \\
\Delta L &- 0,0005 \quad [m]; \\
\Delta v &- 0,025 \quad [\text{adimensional}]; \\
\Delta n_1 &- 0,5 \quad [\text{adimensional}]; \\
\Delta n_2 &- 0,5 \quad [\text{adimensional}]; \\
\Delta n_{\text{inicial}} &- 0,5 \quad [\text{adimensional}].
\end{aligned}$$

E as derivadas parciais ficam

$$\frac{\partial f}{\partial f_{\text{clock}}} = \pi^3 \cdot E \cdot \frac{(c_{\text{ext}}^4 - c_{\text{int}}^4)}{L \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{(n_1 - n_{\text{inicial}})}{(n_1 + n_2)^2} \quad (110)$$

$$\frac{\partial f}{\partial E} = \pi^3 \cdot f_{\text{clock}} \cdot \frac{(c_{\text{ext}}^4 - c_{\text{int}}^4)}{L \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{(n_1 - n_{\text{inicial}})}{(n_1 + n_2)^2} \quad (111)$$

$$\frac{\partial f}{\partial c_{\text{ext}}} = 4 \cdot \pi^3 \cdot E \cdot f_{\text{clock}} \cdot c_{\text{ext}}^3 \cdot \frac{(n_1 - n_{\text{inicial}})}{L \cdot (n_1 + n_2)^2 \cdot (1 + \nu)} \quad (112)$$

$$\frac{\partial f}{\partial c_{\text{int}}} = -4 \cdot \pi^3 \cdot E \cdot f_{\text{clock}} \cdot c_{\text{int}}^3 \cdot \frac{(n_1 - n_{\text{inicial}})}{L \cdot (n_1 + n_2)^2 \cdot (1 + \nu)} \quad (113)$$

$$\frac{\partial f}{\partial L} = -\pi^3 \cdot E \cdot f_{\text{clock}} \cdot \frac{(c_{\text{ext}}^4 - c_{\text{int}}^4)}{L^2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{(n_1 - n_{\text{inicial}})}{(n_1 + n_2)^2} \quad (114)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \nu} = -\pi^3 \cdot E \cdot f_{\text{clock}} \cdot \frac{(c_{\text{ext}}^4 - c_{\text{int}}^4)}{L \cdot (1 + \nu)^2} \cdot \frac{(n_1 - n_{\text{inicial}})}{(n_1 + n_2)^2} \quad (115)$$

$$\frac{\partial f}{\partial n_1} = \pi^3 \cdot E \cdot f_{\text{clock}} \cdot \left[\frac{(c_{\text{ext}}^4 - c_{\text{int}}^4)}{L \cdot (n_1 + n_2)^2 \cdot (1 + \nu)} - \frac{2 \cdot (c_{\text{ext}}^4 - c_{\text{int}}^4) \cdot (n_1 - n_{\text{inicial}})}{L \cdot (n_1 + n_2)^3 \cdot (1 + \nu)} \right] \quad (116)$$

$$\frac{\partial f}{\partial n_2} = -2 \cdot \pi^3 \cdot E \cdot f_{clock} \cdot \frac{(c_{ext}^4 - c_{int}^4) \cdot (n_1 - n_{inicial})}{L \cdot (n_1 + n_2)^3 \cdot (1 + \nu)} \quad (117)$$

$$\frac{\partial f}{\partial n_{inicial}} = -\pi^3 \cdot E \cdot f_{clock} \cdot \frac{(c_{ext}^4 - c_{int}^4)}{L \cdot (n_1 + n_2)^2 \cdot (1 + \nu)} \quad (118)$$

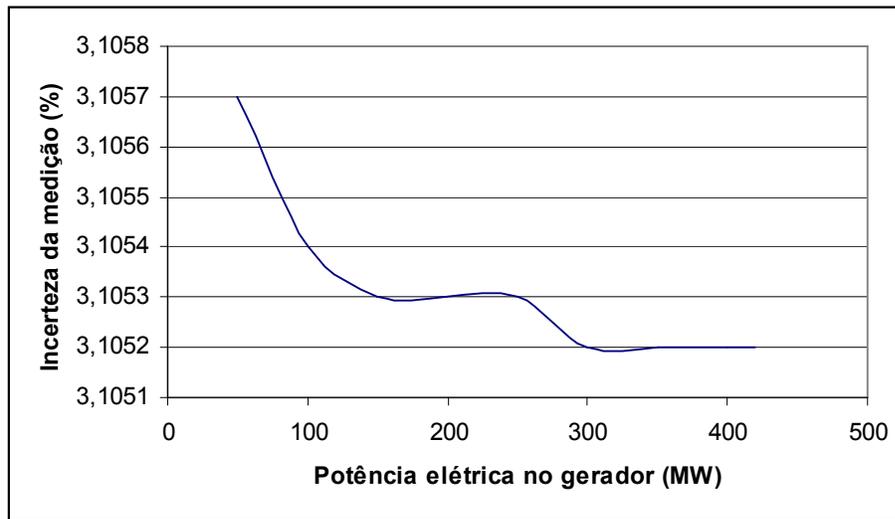


Figura 37: Gráfico mostrando a incerteza da medição em função da potência no gerador

Nesta metodologia todas as variáveis tem incertezas baixas, a não ser o coeficiente de Poisson (incerteza de 27% para valor genérico). Como pode ser visto na Figura 37, tem-se um valor de incerteza de aproximadamente 3,1% (com valores genéricos para o aço). Nota-se também a variação da incerteza com o aumento da potência. Isto é devido a maior deformação do eixo em altas potências e consecutivamente a um maior número de pulsos de *clock* desta forma reduzindo o erro percentual.

Se para efeito de comparação se admite uma incerteza de 0,5% tanto para o módulo de elasticidade quanto para o coeficiente de Poisson (no caso em que as propriedades do material são conhecidas), obtem-se um erro de aproximadamente 0,58%. Esta incerteza é baixa o suficiente para atender à norma da IEC.

CAPÍTULO 6

A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO EXTENSOMÉTRICO EM CAMPO

Devido aos ensaios de comissionamento (ensaios realizados para medir as características da máquina recém instalada e comparar com as especificações enviadas ao fabricante) da usina hidroelétrica de Foz do Chopim, surgiu a oportunidade de se utilizar em campo a metodologia extensométrica.

6.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os principais materiais empregados no ensaio foram:

- Extensômetro de resistência elétrica semicondutor marca Kyowa modelo KSP-2-120-E3;
- Cola marca HBM modelo X-60;
- Sistema de telemetria e tratamento de sinais marca KMT modelo RTSE 600;
- Placa de aquisição de sinais marca National Instruments modelo DaqCard AI-16XE-50.

6.2 PREPARAÇÃO DO ENSAIO

A peça fundamental do ensaio é a precisão de colagem dos extensômetros e a perfeita transmissão dos dados para a respectiva aquisição.

Para o perfeito posicionamento dos extensômetros foi confeccionado por corte a laser um gabarito para a colagem dos sensores no eixo. Este posicionamento é essencial para que se tenha realmente o valor da tensão de cisalhamento aplicada sobre o eixo, pois um deslocamento da direção de medição embute erros no ensaio. Foram seguidos os seguintes passos:

6.2.1 Posicionamento e traçagem



Figura 38: Fotografia mostrando o posicionamento com o gabarito

O gabarito foi posicionado no eixo e a seguir demarcadas as áreas de colagem dos extensômetros (Figura 38). Após a demarcação o gabarito foi retirado e a tinta de proteção do eixo foi removida nas demarcações, deixando assim exposto o material do eixo. Depois de o material estar aparente, o gabarito foi novamente instalado, e com um bedame (ferramenta de metal duro, utilizado em usinagem) foram traçadas as linhas de 45° para posicionamento dos extensômetros.

6.2.2 Colagem



Figura 39: Fotografia mostrando o eixo preparado para a colagem.

Logo após a traçagem foi iniciada a limpeza do material exposto e preparação do mesmo para receber o adesivo de aporte (Figura 39). A limpeza e tratamento da superfície

requerem paciência e calma, pois um erro nesta etapa pode mascarar os resultados devido à má aderência do extensômetro ou à formação de bolhas de ar na camada de adesivo.

Foram então posicionados os extensômetros e colados, utilizando adesivo bi-composto de secagem rápida próprio para as condições de ensaio (Figura 40). Próximos aos sensores de tensão foram também coladas ancoragens para a fixação da fiação usada na alimentação e retirada de sinal dos transdutores, evitando assim esforços mecânicos desnecessários.

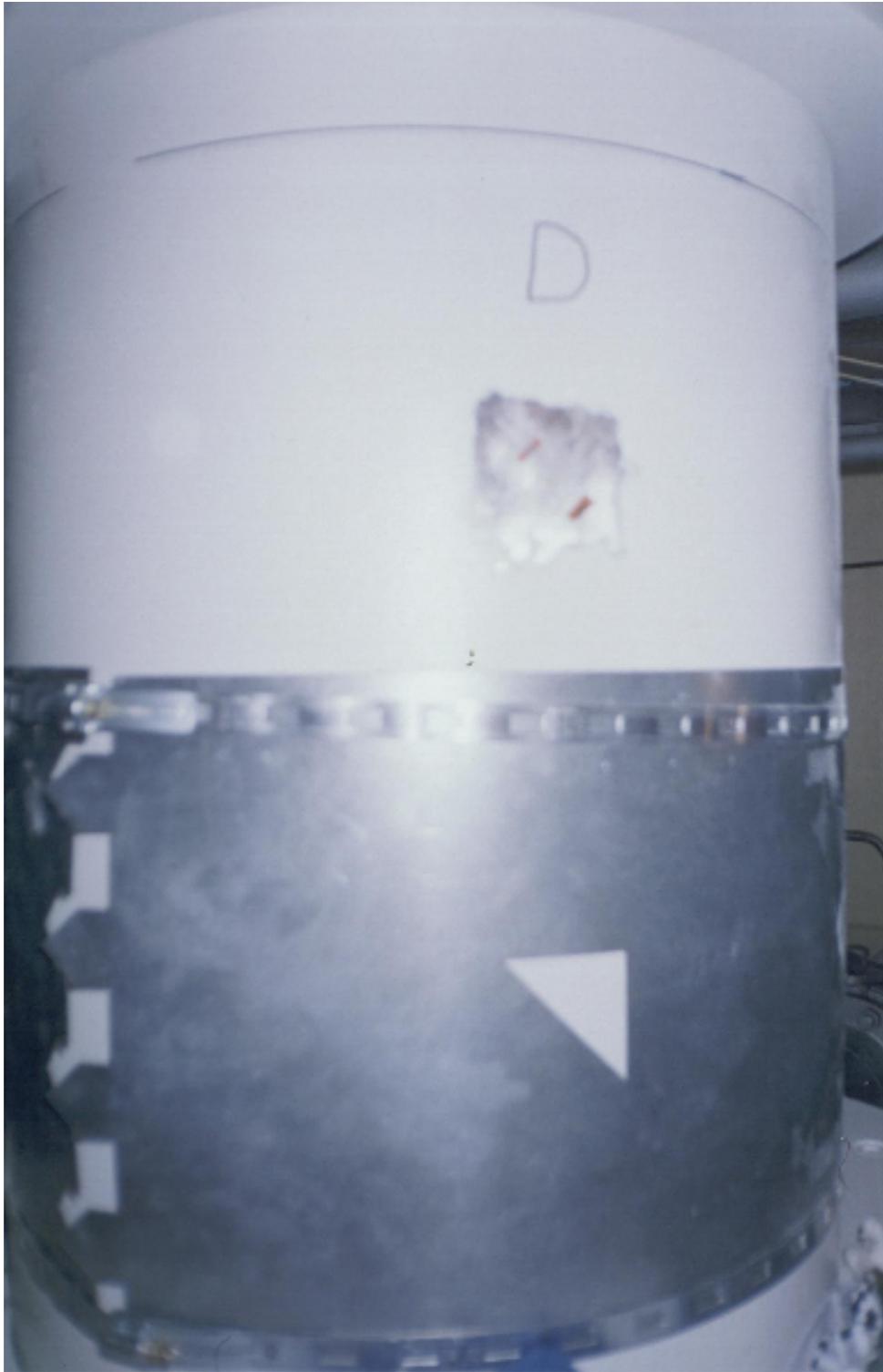


Figura 40: Fotografia mostrando os extensômetros instalados

6.2.3 Montagem do circuito

Após a cura da cola foi montada a ponte de Wheatstone (Figura 41), soldando os terminais aos cabos de alimentação e de sinal de maneira a formar o menor caminho possível, fazendo com que assim se consiga um circuito muito próximo ao teórico. Todos os cabos do circuito foram fixados à peça de ensaio através de abraçadeiras Hellermann evitando assim que o circuito se abra pela influência da força centrífuga gerada.



Figura 41: Fotografia mostrando a soldagem dos extensômetros e a montagem da ponte de Wheatstone.

6.2.4 Proteção dos extensômetros



Figura 42: Fotografia mostrando a proteção da instalação

Todos os extensômetros foram protegidos por uma camada de esmalte com alta constante dielétrica depois de checado o isolamento do mesmo. Acima desta camada foi aplicada outra de cera e acima desta uma fita especial de proteção com propriedade de autofusão para o isolamento do extensômetro com o meio externo (Figura 42).

6.2.5 Ligação do circuito ao sistema de telemetria

O circuito foi então soldado ao sistema de telemetria garantindo assim que não haveria erro por mau contato entre os terminais.

Após estes passos o sistema móvel estava pronto para iniciar o ensaio. A programação do ensaio foi a seguinte: com a turbina hidráulica parada e o gerador sem carga, foi iniciada a aquisição; após alguns minutos a turbina entrou em funcionamento. Este teste era necessário para que fosse possível se ter uma noção da sensibilidade alcançada, pois seria possível notar a deformação causada no eixo pela própria inércia do mesmo. Depois de alcançado o regime de rotação da turbina, foi aplicada uma carga gradual no gerador fazendo então com que se medisse a potência transmitida pelo eixo.

6.3 RESULTADOS

O resultado bruto do ensaio é apresentado na figura 43. Estes resultados são referentes a uma rotação na turbina de 189,4 rpm. Efetuou-se, então, uma filtragem do sinal com filtro Butterworth (devido a sua faixa de ganho constante na banda de passagem) na de sexta ordem sendo o sinal filtrado apresentado na Figura 44.

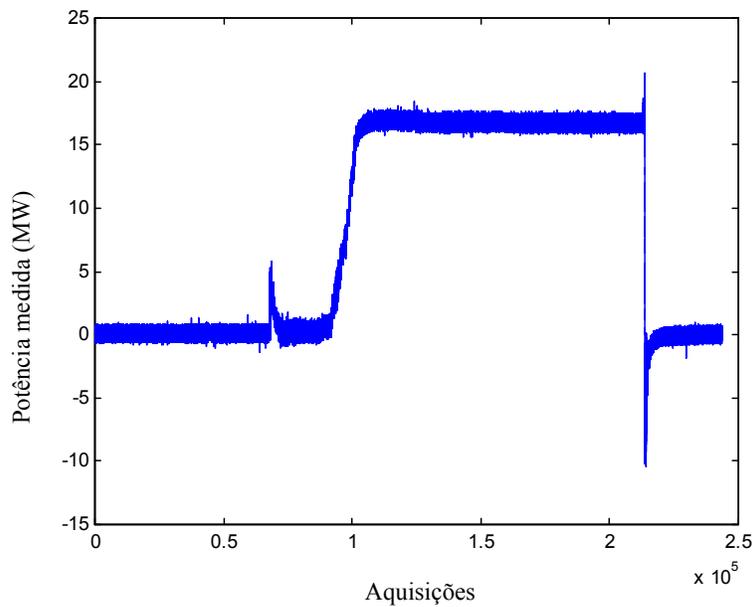


Figura 43: Dados brutos do ensaio

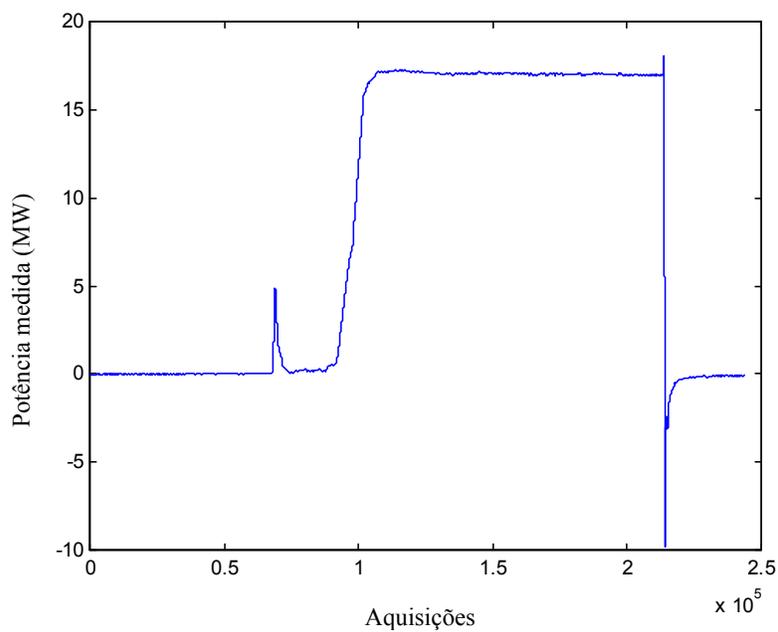


Figura 44: Dados do ensaio após filtragem

A potência média alcançada pela turbina hidráulica é de aproximadamente 17 MW, enquanto que o gerador fornecia uma potência elétrica de aproximadamente 14 MW. As potências medidas dão como resultado um rendimento do gerador de 82%.

Devido ao histórico já conhecido sobre geradores elétricos, é sabido que este rendimento se encontra abaixo do esperado para uma máquina daquele porte, e que portanto deve haver erros na medição e outras influências, como, por exemplo, do campo eletromagnético devido ao gerador.

No entanto, podem-se notar os estágios de carga que aconteceram durante o ensaio, na figura 45:

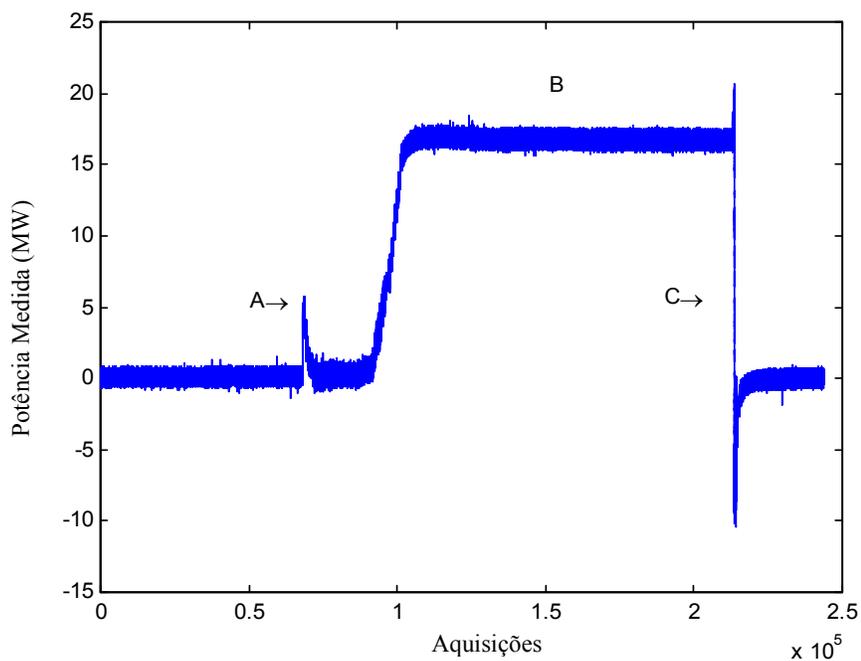


Figura 45: Regiões de carga

Pode-se visualizar na Figura 45 os três estágios principais:

- No estágio A pode-se identificar o surgimento de esforços provenientes da inércia do rotor ao entrar em movimento. Neste ponto nota-se a sensibilidade dos extensômetros instalados ao eixo, pois devido às proporções dimensionais da peça têm-se pequenas deformações periféricas, especialmente na partida da turbina, quando não existe carga no gerador.

- No estágio B nota-se o patamar de carga de onde se retirou a potência fornecida ao gerador pela turbina hidráulica; este patamar representa 100% de carga no gerador.
- Em C nota-se a rejeição de carga e vêem-se claramente os esforços de pico de tração e posteriormente compressão aos quais o eixo foi submetido

CAPÍTULO 7

ENSAIO FASE-PERÍODO

Devido a impossibilidade da realização do ensaio fase-período em um grupo hidrogerador (pois não havia nenhum disponível), o teste foi realizado no banco de motores de número 5 no laboratório de emissões veiculares (LEME) do Lactec.

O LEME disponibilizou um motor turbo diesel da marca Peugeot de 1,9 litros e 4 cilindros com torque máximo (ensaiado) de aproximadamente 200 N.m à rotação de 1900 rpm (Figura 46, Figura 47, Figura 48).



Figura 46 : Motor Peugeot utilizado no ensaio fase-período.

O banco de testes é formado pelo motor, dinamômetro por correntes de Foucault (rastreado Inmetro), eixo cardã (Figura 49) e controle de malha fechada de rotação e débito de combustível.

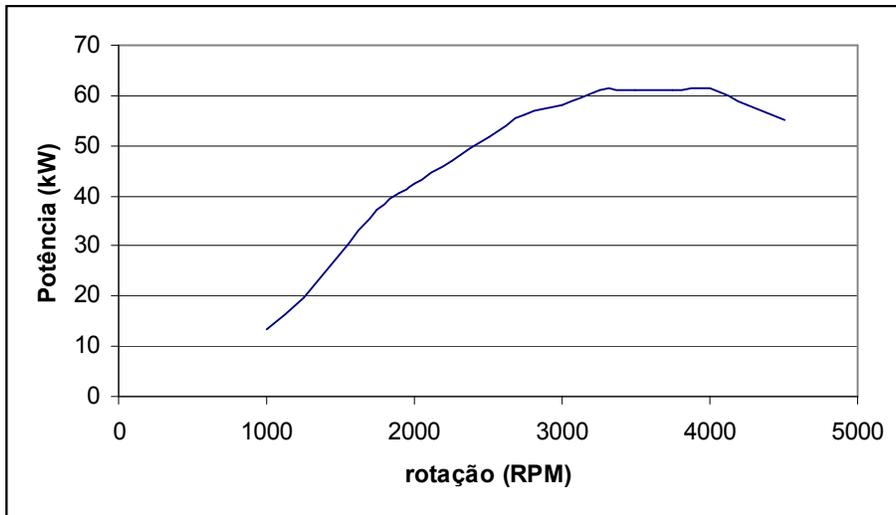


Figura 47: Gráfico de potência do motor Peugeot.

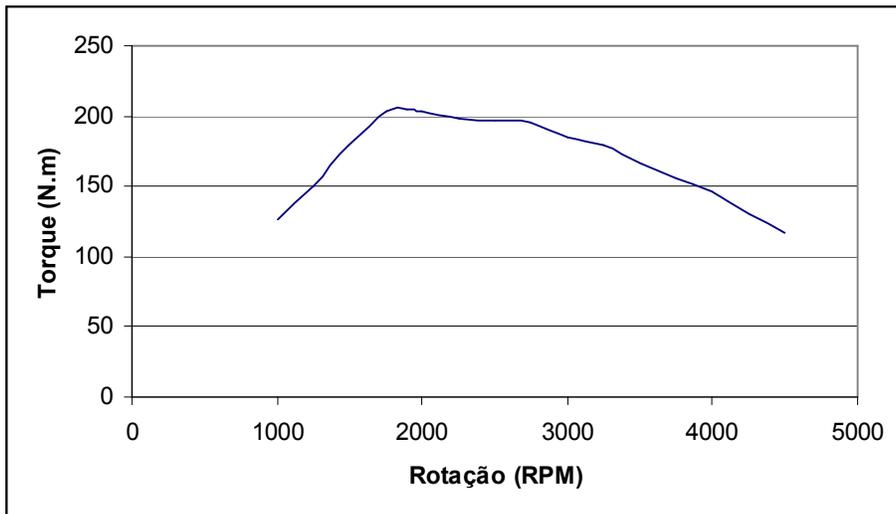


Figura 48: Gráfico de torque do motor Peugeot.



Figura 49: Banco de motores, onde pode ser visto o motor, o eixo cardã (instrumentado) e à direita o dinamômetro.

7.1 A INSTRUMENTAÇÃO

Para a realização do ensaio é necessário o conhecimento das características físicas do eixo cardã.

O eixo presente na bancada foi dimensionado e construído pela fábrica da Renault, não se possuindo assim os dados de fabricação. Para se conseguir os dados necessários utilizou-se a medição de espessura por ultra-som. Com a medição por ultra-som conseguiu-se determinar um comprimento de medição (onde a geometria é praticamente uniforme) de aproximadamente 250 mm e uma espessura de parede de aproximadamente 3 mm.

O diâmetro externo do eixo foi facilmente determinado através de paquímetro, sendo esta dimensão de aproximadamente 52 mm.

Tendo-se então as características geométricas da peça, adotou-se que ela é construída em aço com módulo de elasticidade médio de 207,5 GPa.

Foram instalados então no eixo os sensores responsáveis pela medição da defasagem (Figura 50).

Eles são constituídos de 2 chaves eletro-ópticas da Omron (foram utilizados estes transdutores pela facilidade de instalação e por não ser uma instalação definitiva) modelo EE-SY310. Os transdutores foram colocados a uma distância de 210 mm um do outro.

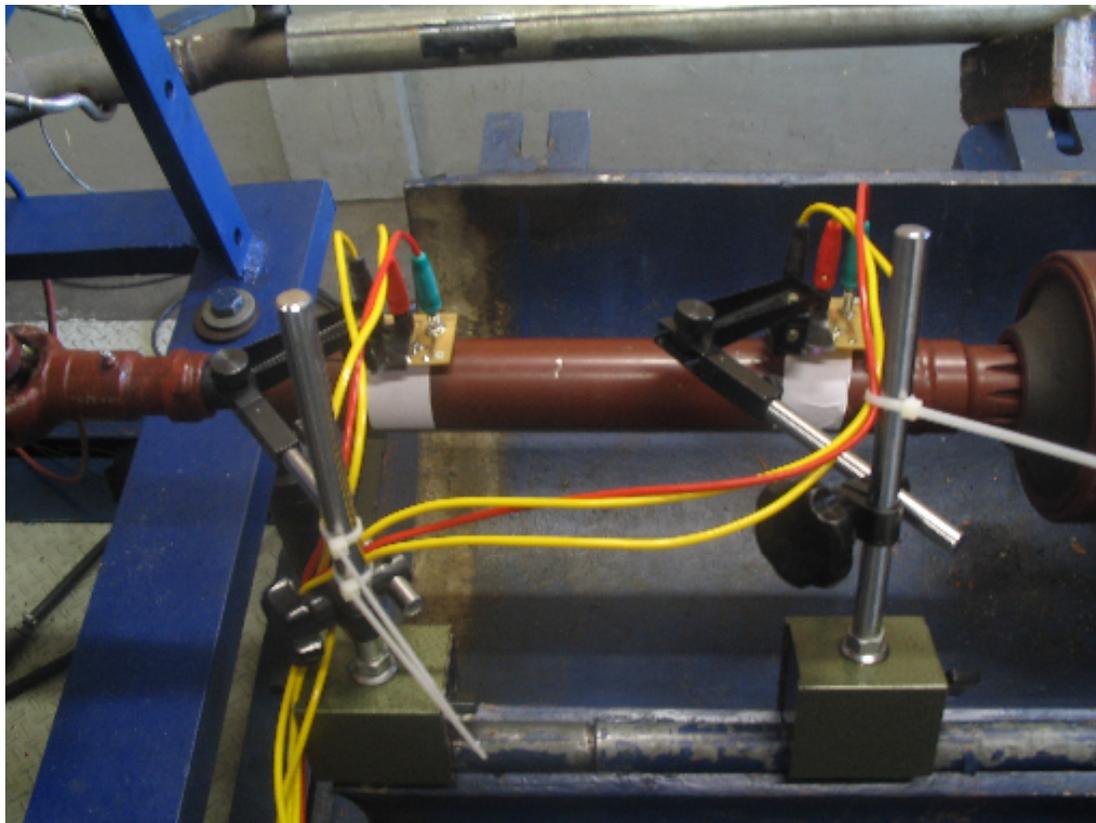


Figura 50 : Eixo instrumentado.

7.2 O ENSAIO

Os sinais provenientes dos sensores foram tratados, gerando a onda de medição e esta serviu de *gate* de medição para uma placa contadora National Instruments modelo NI-6602 com clock interno de 80 MHz. A partir disto foi possível a medição do pulso referente à defasagem entre os sensores e o intervalo ente eles. Este equipamento era a ‘base’ de medição (Figura 51).

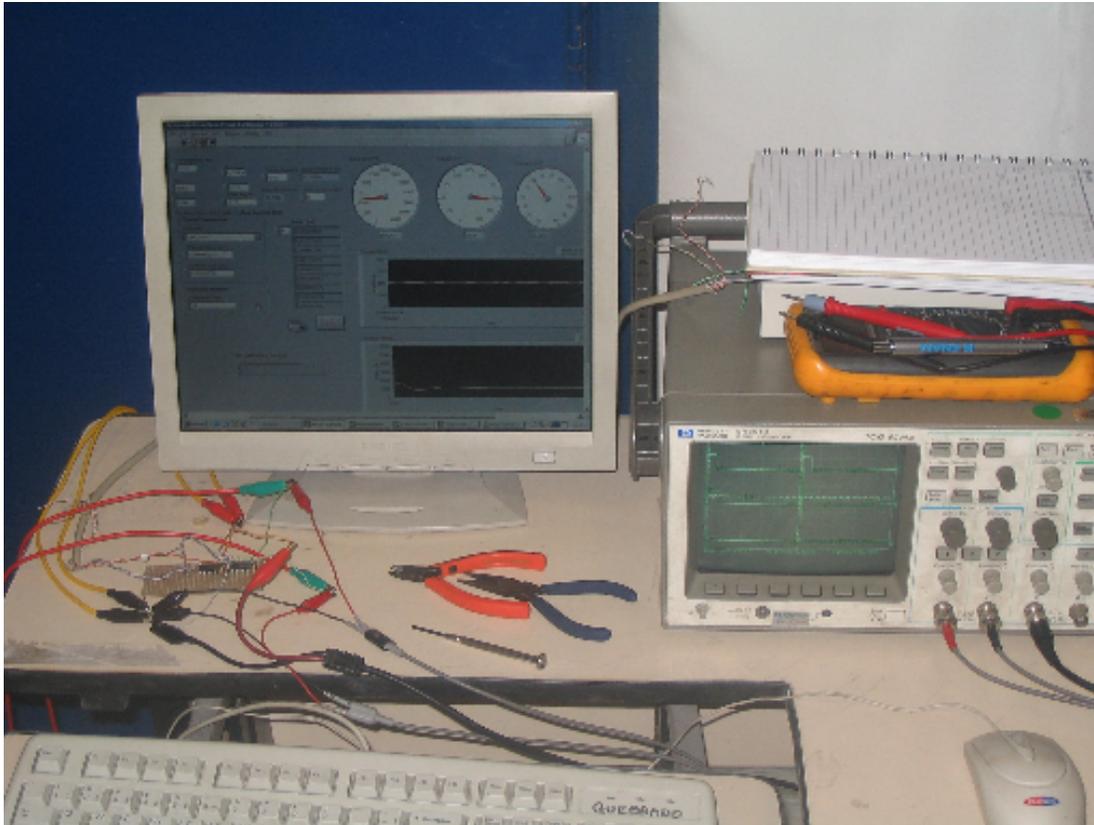


Figura 51 : Base de medição do sistema fase período.

Foi então determinado que o ensaio consistiria de degraus de débito; isto equivale dizer que seria dado curso do acelerador de 20 em 20% mas com a malha fechada na rotação de 1900 rpm (para ter o maior torque fornecido pelo motor). Os degraus iniciariam com o valor de 20% (valor mínimo para manter a rotação de 1900 rpm).

7.3 RESULTADOS

Os valores medidos do ângulo de defasagem podem ser vistos na Figura 53 e o valor real de torque de saída do motor pode ser visto na Figura 52.

O ângulo medido pelo sistema não corresponde ao medido na bancada, o coeficiente entre ângulo de torção e torque no motor não se mostrou constante. Isto pode ser devido à dinâmica do motor e a interferência da vibração torcional desta máquina térmica. Outro fator importante é a variação de torque imposta pela junta universal. Este tipo de junta não mantém constante a velocidade de transmissão e conseqüentemente a força aplicada no eixo. Esta variação pode ser observada na figura 54. No entanto pode ser notado que qualitativamente o sistema acompanha a curva de carga do motor, mesmo não sendo projetado para o uso neste sistema.

Em um gerador hidrelétrico não existem estes agravantes, sendo o torque muito melhor distribuído durante o percurso de rotação do eixo. Todos os acoplamentos em um hidrogerador são rígidos, não possibilitando assim esta variação de velocidade e conseqüentemente do ângulo medido.

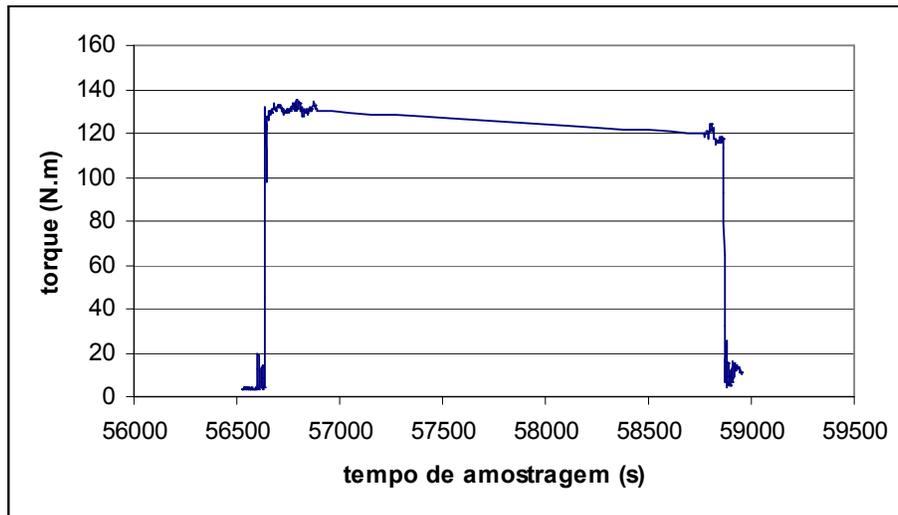


Figura 52 : Torque medido no dinamômetro (bancada).

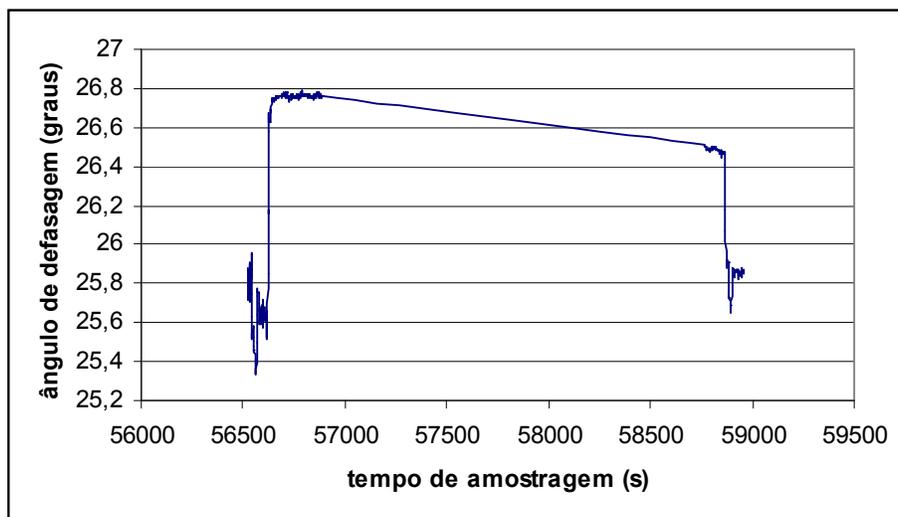


Figura 53: Ângulo de defasagem medido no eixo do motor (sistema fase-período).

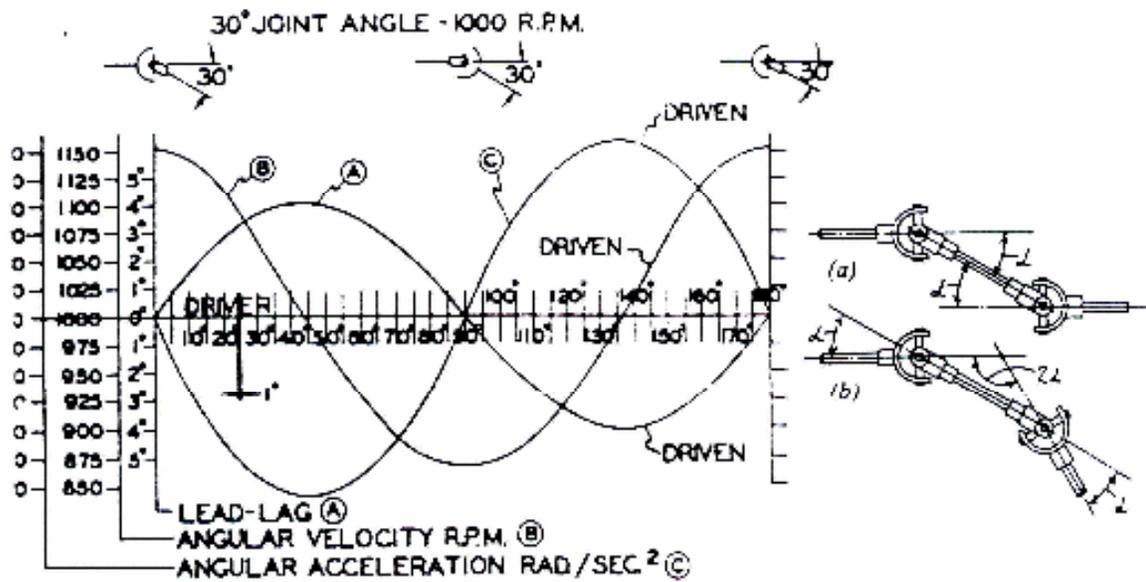


Figura 54: Gráfico mostrando as variações de velocidade e aceleração angular, para $\frac{1}{2}$ volta do eixo de acionamento (180°). Neste caso a junta apresenta um ângulo de 30° entre os eixos de entrada e de saída (Filippin, 2002).

CONCLUSÃO

Ambos os métodos apresentados neste trabalho apresentam vantagens em relação ao método calorimétrico. Na Tabela 2 comparam-se as três metodologias.

Tabela 2: Comparação entre as metodologias de medição de rendimento

Metodologia	Calorimétrico	Extensométrico	Fase-Período
Tempo de instalação	Elevado	Curto	Curto
Medição da usura	Não	Sim	Sim
Medição contínua	Não	Sim	Sim
Normatização	Sim	Não	Não
Complexidade do equipamento	Elevada	Baixa	Baixa
Medição em toda a faixa de carga	Não	Sim	Sim

O método calorimétrico é conhecido pela alta complexidade quanto à instrumentação e realização (grande número de canais de temperatura, medidas de vazão, estabilização da temperatura). Quem já teve a oportunidade de acompanhar uma medição se impressionou com a quantidade de cabos espalhados pela planta de geração, assim como o longo tempo necessário para a instalação dos mesmos (muitas vezes três dias), e os cuidados para a correta medição de temperatura (isolando apenas a temperatura desejada, evitando radiação e convecção de outras fontes).

Com o método extensométrico o número de equipamentos e materiais utilizados é reduzido significativamente. A instalação é realizada em aproximadamente um dia. Suas etapas: posicionamento, traçagem, limpeza, colagem e soldagem, são realizadas por apenas duas pessoas, necessitando apenas que a máquina esteja parada. O equipamento necessário é simplesmente um sistema de telemetria, uma placa de aquisição de sinais e um computador.

As suas vantagens em relação à metodologia calorimétrica presente na norma IEC 34-2A para geradores resfriados à água são as seguintes:

- O tempo de instalação do equipamento é relativamente reduzido;
- O tempo de máquina parada é muito inferior. O tempo de máquina parada médio para o ensaio calorimétrico chega a uma semana;
- A medição de rendimento não é feita para carga máxima e depois convertida para outras frações de carga. Mede-se efetivamente o rendimento em tempo real de todas as cargas;
- A metodologia pode ser empregada para uso contínuo (durante operação da máquina) e assim permite estudar os efeitos de outros fatores sobre o rendimento da máquina;
- Devido a medição contínua, pode-se mensurar o efeito do tempo (usura) sobre o rendimento do gerador (especialmente mancais).

Por outro lado, o sistema tem as seguintes desvantagens:

- Não é normatizado, isto quer dizer que muitos fabricantes podem não aceitá-lo;
- Existe uma eletrônica embarcada para que se possa retirar o sinal de deformação do eixo girante, necessitando-se, então, de uma fonte de energia girando junto com o eixo;
- Devido ao uso de extensômetros semi-condutores a incerteza do método é elevada (em torno de 5 a 6%);
- Devem-se conhecer as características do material do eixo (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson);
- Devido a ter peças girando existe o risco de acidentes.

No método fase-período, tenta-se resolver os inconvenientes do sistema extensométrico. Sua instalação é ainda mais rápida, necessitando apenas de alguns minutos de máquina parada para a marcação do eixo. Todo o equipamento restante pode ser montado com a máquina girando, pois toda a eletrônica necessária se encontra fora do eixo. Este método contém todas as vantagens do método extensométrico e mais as seguintes:

- O tempo de máquina parada é ainda menor que o do método extensométrico;
- O tempo de montagem e máquina parada também são menores;
- A incerteza no método (para valores genéricos do aço) fica em torno de 3%, baixando para apenas 0,58% quando se conhecem as características do material do eixo.

- Não existe eletrônica embarcada, logo, a máquina não precisa parar para troca de baterias ou manutenção do equipamento. Também pode ser desmontado sem a necessidade da parada da máquina.
- O sistema mede conjuntamente com a deformação, a rotação da máquina, fazendo desta forma uma medição mais precisa da potência de entrada da máquina.
- O sistema apresenta também um preço (em equipamento) menor que os outros métodos anteriores.
- Se torna mais preciso a medida que aumenta a potência da máquina.

Sua desvantagem

- Para a utilização desta metodologia necessita-se do conhecimento exato das características do eixo (estas características estão presentes no memorial de cálculo do eixo da turbina).
- Necessita-se de um comprimento livre de eixo com perfil homogêneo entre o gerador e a turbina.
- Interferência da vibração torcional do eixo.

Os dois métodos apresentados, o extensométrico e o fase-período, sendo este inédito e de criação do autor, apresentam grandes vantagens ao método calorimétrico, tanto na instalação, quanto no uso. No entanto, nenhum deles é normatizado e podem ser preteridos por isso. Porém, não devem ser vistos apenas como métodos de ensaio de comissionamento de geradores, mas também como ferramentas para a medição *online* do rendimento do gerador.

Com o aumento do consumo de energia elétrica e a diminuição das reservas hídricas capazes de gerar energia elétrica, deve-se garantir que cada metro cúbico de água que passa por um hidrogerador gere o máximo possível de energia elétrica.

Isto pode ser feito com os métodos citados, principalmente o fase-período. No entanto se a empresa geradora de energia não tiver os dados da máquina pode-se utilizar o método calorimétrico para o levantamento da curva de rendimento (por ser um método normatizado e plenamente aceito), utilizando o método fase-período não como absoluto, mas sim relativo em função dos rendimentos colhidos pela metodologia calorimétrica descrita na norma IEC 34 2-A.

Desta forma este trabalho possibilita ao País uma opção de medição da eficiência da geração de energia elétrica, fazendo assim com que nossas reservas sejam aproveitadas da

melhor maneira possível utilizando-as de forma racional, evitando desperdícios e a utilização de geração de energia de fontes não renováveis ou poluidoras.

8.1 TRABALHOS FUTUROS

A utilização do *looping* de Anderson para a medição extensométrica; esta nova montagem desenvolvida recentemente tem um ganho maior que a ponte de wheatstone, assim como uma imunidade melhor ao ruído.

O uso do sistema fase-período em eixos de seção variável, muitos hidrogeradores tem eixo de seção variável e deste modo esta metodologia deve ser alterada para este caso.

A utilização do sistema fase-período em um hidro-gerador; devido ao cronograma de parada de máquinas da Copel , não foi possível utilizar esta metodologia em um hidrogerador.

A utilização do sistema fase-período em máquinas com pequeno comprimento de eixo livre; a nova técnica pode ser refinada de forma a medir deformações menores e conseqüentemente ser usada em máquinas com pequeno espaço livre de eixo.

Integração da medição contínua do rendimento do grupo hidrogerador na composição do indicador de operação do grupo visando a maximização de desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECKWITH, T.G., MARANGONI, R.D., LIENHARD, J. H. , *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley, 1993.

DE SILVA, C. W., *Vibration Fundamentals and Praticce*, CRC, 2007

DIN EN 60034-2 - VDE 0530-1 *Drehende elektrische Maschinen Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von drehenden elektrischen Maschinen aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen-und Straß enfahrzeuge)*,1996.

DOEBELIN, E. O., *Measurement Systems: Aplication and Design*, McGraw-Hill,1990

FILIPPIN, C. G., Apostila de Transmissões Automotivas, 2002

HOFFMAN, K., *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HORBATIUK, B. W. D., FILIPPIN, C. G., DE PAULA, A. C., MACHADO, C. G., *Medição de Rendimento em Grupos Hidrogeradores*, XVII SNPTEE, 2003.

HORBATIUK, B. W. D., FILIPPIN, C. G., DE PAULA, A. C., MACHADO, C. G., KIMURA, N, *Novas Tecnologias para Medição de Rendimento em Gerador Hidráulico de Energia Elétrica*,II CITINEL , 2003

IEC 34-2, *Rotating electrical machines, Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests. (Measurement of losses by the colorimetric method)*. 1972.

INCROPERA, F. P., WITT, D. P. de , *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, Livros Técnicos e Científicos, 1992

KOSOW, I. L., Máquinas Elétricas e Transformadores, Globo, 2000

NORTHROP, R. B., *Introduction to Instrumentation and Measurements*, CRC, 2005

NORTON, R. L., Projeto de Máquinas, uma abordagem integrada, Bookman, 2004

OLIVEIRA FILHO, K de S, SARAIVA, F. O., Medidas de Tempo, 2007. Disponível em: <http://astro.if.ufg.br/tempo/tempo.htm>. Acessado em 27/03/2007.

POPOV, E. P., Introdução à Mecânica dos Sólidos, Edgard Blücher, 1978

WEBSTER, J. G.(Ed.), *The measurement, instrumentation, and sensors: handbook* , CRC, 1999

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)