

RENDIMENTO DE GERADORES PARA MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

João Roberto Cogo (Prof^o Adjunto) *

Antônio Tadeu Lyrio de Almeida (Prof^o Assistente) *

Délvio Franco Bernardes (Prof^o . Auxiliar) *

* Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Av. BPS, 1303 - Caixa Postal: 50

Telex: (031) 3485

37500 - Itajubá - MG

Artigo publicado na Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico Vol. XII, nº 3 - 1986 - pág.: 21 a 36

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo expor a necessidade de que, pelo menos em termos atuais, o rendimento de geradores para microcentrais hidrelétricas seja determinado, e efetivamente fornecido, para todas as unidades fabricadas pela indústria nacional.

ABSTRACT

This work aims to state the need that, at least in current terms, the generator output for small power plants be evaluated, and effectively supplied, for all units manufactured by the national industry.

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo básico do Programa Nacional para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PNPCH) é viabilizar a utilização de pequenos aproveitamentos hidroenergéticos para o atendimento de sistemas isolados ou interligados.

Para suprir algumas das necessidades do PNPCH foram construídos os Laboratórios Eletromecânico e Hidromecânico para pequenas Centrais Hidrelétricas (LEPCH e LHPCH, respectivamente) com recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) em convênio com a Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI).

O LEPCH, em particular, visa desenvolver pesquisas e realizar testes específicos e de rotina, destrutivos ou não, em equipamentos eletromecânicos que compõem uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Desta forma, é possível colaborar com pequenas e médias empresas brasileiras, que fabricam e/ou prestam serviços ao setor de PCH, de modo a se obter equipamentos e componentes de alta qualidade e baixo custo.

As PCHs são classificadas pela ELETROBRÁS [1] como mostrado na TABELA 1.

TABELA 1: Classificação das Pequenas Centrais Hidroelétricas, conforme ELETROBRÁS [1].

Classificação	Potência Instalada [kW]	Queda de Projeto [m]		
		Baixa	Média	Alta
Microcentrais Hidroelétricas	Até 100	Menos de 15	15 a 50	Mais de 50
Minicentrais Hidroelétricas	100 a 1000	Menos de 20	20 a 100	Mais de 100
Pequenas Centrais Hidrelétricas	1000 a 10000	Menos de 25	25 a 130	Mais de 130

Em relação as Microcentrais, tem-se que estas apresentam aspectos especiais, tais como:

- a - As cargas a alimentar concentram-se no meio rural;
- b - O usuário não é especializado e uma assistência técnica pode ser de difícil obtenção;
- c - São centrais de baixa potência e, facilmente susceptíveis a variações bruscas de tensão.

Desta forma, torna-se claro que, para este tipo de PCH, a obtenção de diversos dados são imprescindíveis na análise do funcionamento de seu (s) gerador (es), tais como: rendimento, reatâncias, temperatura dos enrolamentos, tensão nos terminais do gerador quando este alimenta uma carga monofásica e atuação do regulador de tensão na entrada e saída de carga.

Este trabalho se fixa apenas na análise da necessidade de obter-se o rendimento dos citados geradores.

2 - DOCUMENTO DE REFERÊNCIA

- 2.1 - Pesquisa e desenvolvimento tecnológico - Vol. XII, Nº3, ano 1986 pág. 21 a 36. Editora EFEI.

3 - GERADORES SÍNCRONOS PARA MICROCENTRAIS

Os geradores para microcentrais, normalmente, são os síncronos sem escovas (Brushless) os síncronos auto-regulados e os assíncronos. Entretanto, este trabalho se fixa nos dois primeiros citados.

O esquema de ligações simplificado de um gerador sem escovas é dado na FIGURA 1.

A máquina principal, geralmente, possui pólos salientes excitatriz com estator de pólos salientes, retificadores girantes e um regulador de tensão. Naturalmente, este último tem por finalidade manter a tensão constante e, portanto, independente da carga que o gerador esteja alimentando.

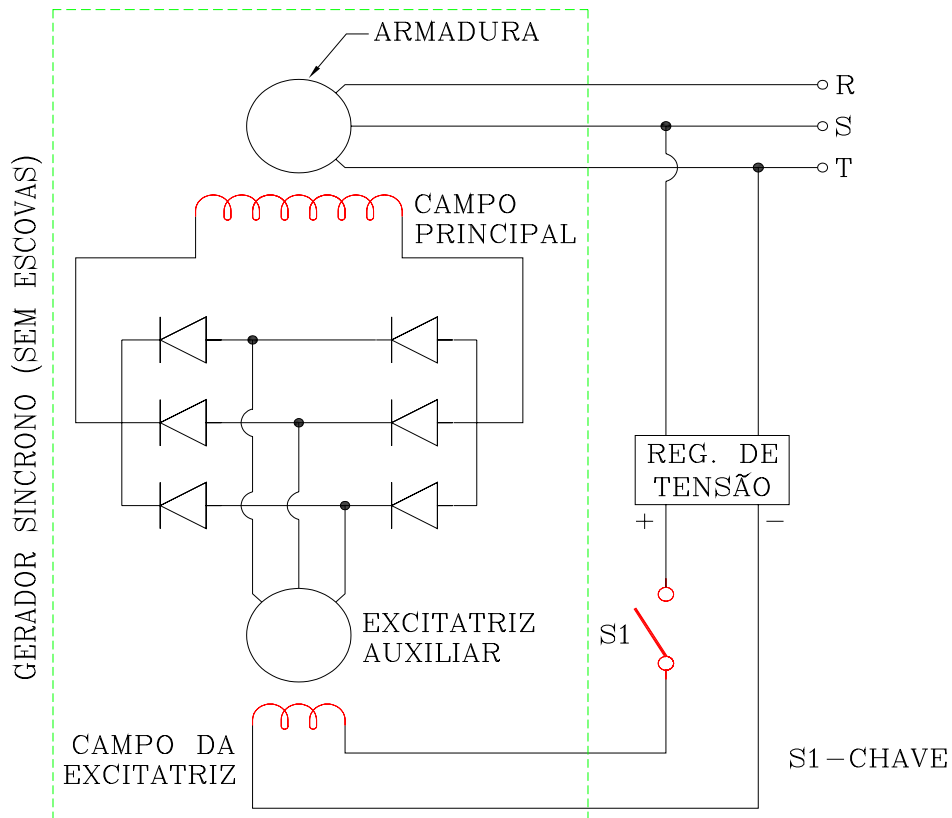


FIGURA 1 - ESQUEMA DE LIGAÇÕES SIMPLIFICADO DE UM GERADOR SEM ESCOVAS (BRUSHLESS).

Os geradores síncronos auto-regulados estão representados na FIGURA 2.

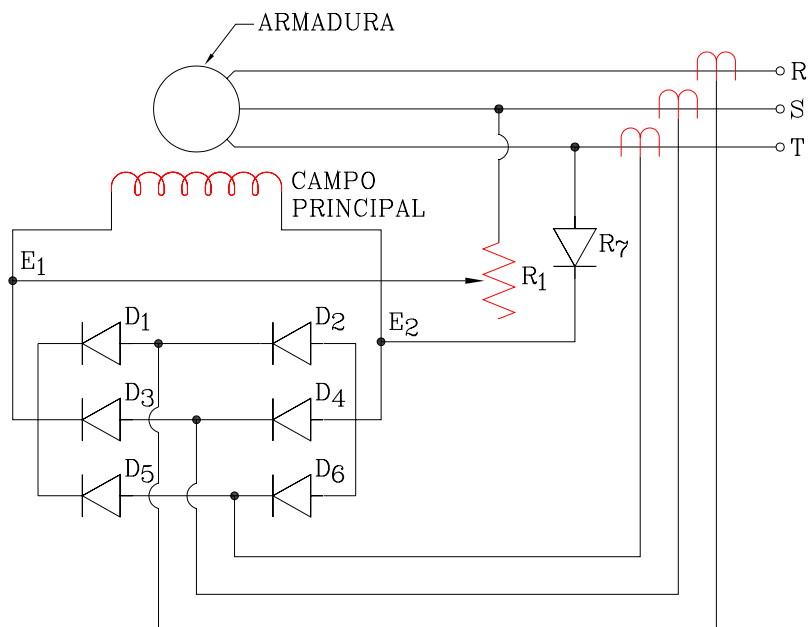


FIGURA 2 - GERADOR AUTO-REGULADO TRIFÁSICO.

A função do conjunto R1-D7 é a de efetuar a auto-excitação e manter a tensão de saída no valor nominal para funcionamento em vazio. O conjunto TC's e ponte trifásica (D1 a D6) permite compensar os efeitos provocados pela carga, como a queda de tensão. Os pontos E_1 e E_2 representam as escovas para alimentação do campo.

4 - RENDIMENTO DO APROVEITAMENTO HIDRÁULICO

Como em toda transformação de energia, surgem perdas inevitáveis quando da operação dos geradores.

A FIGURA 3 fornece um esquema simplificado para a geração hidráulica.

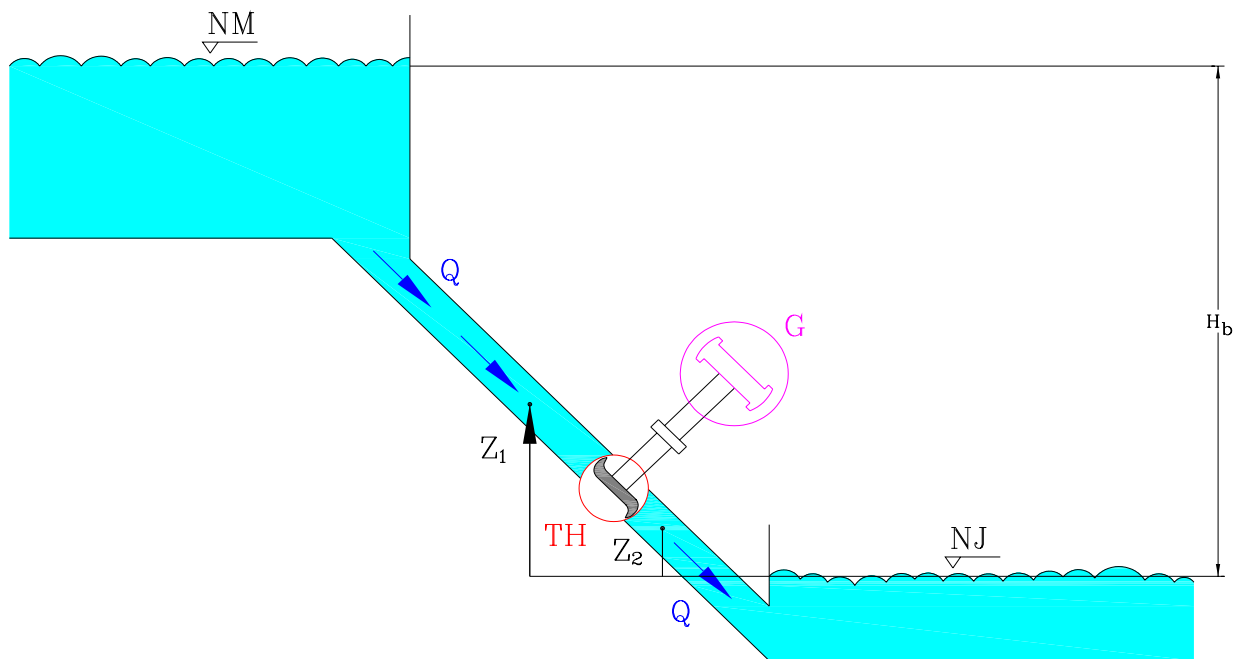


FIGURA 3 - ESQUEMA SIMPLIFICADO PARA GERAÇÃO HIDRÁULICA.

- Q - Vazio
- TH - Turbina hidráulica
- G - Gerador
- NM - Nível de montante
- NJ - Nível de jusante
- H_b - Queda bruta
- Z_1, Z_2 - Cotas

Conforme [2], tem-se que o trabalho específico disponível executado pela turbina é dado por:

$$Y = \frac{P_1}{\rho} + \frac{C_1^2}{2} + g \cdot z_1 \quad (1)$$

onde: Y - Trabalho específico disponível [J/Kg]

P_1 - Pressão no ponto 1

ρ - Massa específica da água, tomada como 1000 [Kg / m³]

C_1 - Velocidade [m/s]

Z_1 - Cota [m]

A potência disponível do aproveitamento hidráulico, ou a potência hidráulica, é dada por:

$$P_h = \frac{\rho \cdot Q \cdot Y}{1000} = 9.81 Q H \quad (2)$$

onde: P_h - Potência hidráulica disponível [kW]

Q - Vazão [m³ / s]

H - Diferença entre o salto bruto e a perda em carga da tubulação [m]

Por outro lado, a potência bruta do sistema é dada por

$$P_b = 9,81 Q H_b \quad (3)$$

A relação entre as potências disponíveis e a bruta fornece o rendimento do sistema de adução ou da tubulação forçada, ou seja:

$$\eta_{sa} = \frac{P_h}{P_b} = \frac{H}{H_b} \quad (4)$$

O rendimento total da turbina é:

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_b} \quad (5)$$

onde: P_e - Potência disponível no eixo da turbina [KW]

Para microcentrais, ainda é possível a utilização de bombas centrífugas funcionando como turbinas [3]. Nestes casos a vazão e altura do projeto devem ser modificadas para que se obtenha o máximo rendimento.

O gerador também apresenta perdas, conforme será analisado no item 4; desta forma, tem-se:

$$\eta_g = \eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_e} \quad (6)$$

onde: $\eta_g = \eta_{el}$ - Rendimento do gerador
 P_{el} - Potência fornecida pelo gerador [KW]

Pelo exposto, o rendimento total do aproveitamento hidráulico, até os terminais do gerador, é dado por:

$$\eta_{ag} = \frac{P_{el}}{P_b} = \eta_{sa} \cdot \eta_t \cdot \eta_{el} \quad (7)$$

Os valores típicos para os rendimentos citados são:

- Sistema de adução
 $0,99 \geq \eta_{sa} \geq 0,96$ (8)

- Para turbinas até 20 [CV], no estágio de fabricantes brasileiros, tem-se:
 $\eta_t = 0,70$

- Para turbinas até 100 [KW], tem-se:
 $\eta_t = 0,75$

O rendimento dos geradores será analisado nos próximos tópicos.

5 - PERDAS E RENDIMENTO EM GERADORES

As perdas nos geradores são, basicamente, divididas em três grupos, ou seja:

- Perdas em Vazio

a - Perdas no ferro devido ao fluxo principal;

b - Perdas por atrito e ventilação

- Perdas em carga

a - Perdas por efeito Joule nos enrolamentos de campo e do induzido.

- Perdas adicionais

a - Perdas na superfície dos pólos e enrolamentos amortecedores devido à abertura das ranhuras;

b - Perdas nos enrolamentos do induzido devido ao efeito pelicular;

c - Perdas na superfície dos pólos devido a fluxos harmônicos;

d - Perdas em partes da estrutura devido ao fluxo de dispersão;

e - Outras específicas de cada tipo de projeto do gerador.

O rendimento de geradores é dado pela expressão (6).

Observe-se que para geradores modernos de grande porte, o rendimento varia entre 0,92 a 0,98 com fator de potência nominal.

Os geradores síncronos, utilizados em Pequenas Centrais Hidrelétricas, particularmente aqueles para as microcentrais, não possuem, divulgado em literatura técnica, uma faixa de rendimento definida. O LEPCH está obtendo recursos junto a STI do MIC visando, entre outras finalidades, efetuar o levantamento do rendimento das citadas máquinas.

6 - DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

O LEPCH tem testado geradores síncronos sem escovas e auto-regulados, motores de indução, de corrente contínua e transformadores fornecidos por fabricantes nacionais. Em relação aos geradores para microcentrais, os ensaios e testes executados com mais frequência, entre outros possíveis, são os seguintes: resistência do isolamento e dos enrolamentos, seqüência de fases, sobre velocidade, fator de interferência telefônico, obtenção de forma de onda, tensão no eixo, características em vazio e em curto permanente, baixo escorregamento, curto-circuito trifásico súbito, seqüência negativa, tensão monofásico nas três fases, rendimento, perdas no ferro, atrito e ventilação, temperatura máxima dos enrolamentos, tensões nos terminais com a máquina alimentando cargas monofásicas, atuação do regulador de tensão e entrada de cargas e regulação da tensão nominal em função da corrente e potência de carga em geradores auto-regulados.

O rendimento pode ser levantado por separação das perdas da máquina ou pelo método direto, sendo este o mais interessante de se realizar para geradores de pequeno porte.

O procedimento para a execução da última metodologia citada é fazer a máquina síncrona operar como gerador; a seguir, efetua-se as medidas da potência elétrica fornecida a uma carga e da potência mecânica absorvida junto à máquina primária.

Desta forma, o rendimento é dado pela expressão (6), repetida a seguir por conveniência:

$$\eta_{el\%} = \frac{P_{el}}{P_e} \cdot 100 \quad (9)$$

onde: P_{el} = Potência elétrica fornecida à carga, [W];

P_e = Potência mecânica no eixo da máquina, [W].

Em relação às cargas elétricas, pode-se acoplar o gerador em paralelo com a rede, no caso de máquinas com frequência nominal diferente à da rede e/ou de pequeno porte, simular a carga efetiva com a utilização de um reostato líquido e reatores; com estes procedimentos, facilmente é efetuada a medição da potência elétrica.

A máquina primária (freio eletrodinâmico) do LEPCH possui carcaça livre equipada com um braço e seu eixo pode ser acoplado diretamente ao do gerador sob ensaio; com a utilização conjunta deste último com um dinamômetro composto por uma célula de carga (Strain Gauge) e respectivo indicador digital, determina-se o conjugado, ou torque, desenvolvido no eixo, através de:

$$M = F \cdot b \quad (10)$$

onde: M = Conjunto desenvolvido no eixo [kg.m];

F = Indicador do dinamômetro [kg];

b = Distância do centro do eixo da máquina primária ao ponto de contato do braço com o dinamômetro [m].

A potência mecânica entregue no eixo da máquina motriz ao gerador é:

$$P_e = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot 9,81 \cdot M \cong 1,027 \cdot M \cdot n \quad (11)$$

onde: n - velocidade do grupo [rpm]

A FIGURA 4 mostra o esquema simplificado para a execução do ensaio de rendimento medido diretamente.

Em relação à FIGURA 4, os aparelhos utilizados na execução do ensaio pelo LEPCH são:

- a - Amperímetros, voltímetros e wattímetros com precisão menor ou igual a 0,5%;
- b - Transformador de corrente com precisão 0,15%;
- c - Grupo acionador constituído por uma máquina de corrente contínua com controle eletrônico;
- d - Sistema para medição de força constituída por célula de carga e indicador digital.

c - Naturalmente, é primordial otimizar o custo de [kWh] gerado e do investimento realizado. Um exemplo simplificado pode esclarecer esta afirmativa, ou seja, adotando $\eta_{sa} = 0,97$, $\eta_T = 0,75$ e $\eta_g = \eta_{el} = 0,8$, tem-se:

$$\eta_{ag} = 0,97 \cdot 0,75 \cdot 0,80 = 0,582$$

ou seja:

$$P_{b1} = \frac{P_{el}}{0,582} = 1,718 \cdot P_{e1} = 82,464[kW]$$

Desta forma, o produto QH_b será:

$$Q_1H_{b1} = \frac{82,464}{9,81} = 8,404[m^4 / s]$$

No entanto, se o mesmo gerador possuir um rendimento igual a 0.90, por exemplo, tem-se:

$$\eta_{ag} = 0,655; P_{b2} = 73,310[kW]; Q_2H_{b2} = 7,473[m^4 / s]$$

A relação entre os dois casos é:

$$Q_2H_{b2} = 0,889Q_1H_{b1}$$

ou seja, o aumento do rendimento do gerador em 11,1% resulta em redução do mesmo valor percentual da potência bruta necessária para que o gerador forneça a mesma potência elétrica à carga.

Nota-se que, em termos de projeto, poderá haver a redução da vazão, já que a altura bruta está comprometida com as condições topográficas e geológicas, isto implica em um decréscimo proporcional do diâmetro da tubulação, resultando em uma brutal diminuição de custos, para uma mesma potência disponível.

d - Outro aspecto, bastante freqüente, é o caso de uma microcentral operando em paralelo com um grupo gerador a diesel.

Naturalmente, o aumento de rendimento implica em um menor consumo de óleo, para uma mesma carga.

8 - CONCLUSÕES

Este trabalho mostra diversos aspectos em relação ao rendimento de geradores para microcentrais. Pelo exposto, conclui-se que há a necessidade de que, pelo menos em termos atuais, a determinação do rendimento seja considerado como um ensaio de rotina.

Observe-se que, para outras máquinas elétricas (transformadores, por exemplo), as respectivas normas exigem a determinação das perdas como ensaio de rotina [8].

A realização do citado ensaio permitirá um acompanhamento do desenvolvimento tecnológico de fabricantes nacionais e uma redução de custo de instalação, sendo ambos objetivos prioritários do PNPCH.

Acrescenta-se, ainda, que a melhoria dos rendimentos das turbinas é igualmente importante pelos mesmos motivos.

Cabe lembrar que o gerador síncrono representa cerca de 15% do custo total de uma microcentral. Desta forma, o retorno do capital investido se dará mais rapidamente quando se utilizam máquinas com rendimentos mais elevados.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRÁS) - “Manual das Pequenas Centrais Hidroelétricas” - Rio de Janeiro - ELETROBRÁS 1985;
- [2] - Souza, Z., Fuch, R.D.; Santos, A.H.M.: “Centrais Hidro e Termolétricas” - São Paulo - Ed. Edgard Blücher/EFEI - 1983;
- [3] - Viana, A.N.C.; Tiago Filho, G.L.; Leite, F.: “Viabilidade das Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas, para Microcentrais Hidrelétricas”. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico - Vol XI - nº 3 - 1985 - pp.53;
- [4] - Kostenko, M.; Piotrovsky, L. “Electrical Machines”. Moskow, Mir - 1977;
- [5] - Liwschitz-Garik, M.; Whipple, C.C.: “Alternating-Current Machines”.New York - D. Van Nostrand Co.-1964;
- [6] - Associação Brasileira de Normas Técnicas - “NBR 5052 - Máquinas Síncronas - Método de Ensaio” - Rio de Janeiro - ABNT - 1984;
- [7] - Associação Brasileira de Normas Técnicas - “NBR5117 - Máquinas Síncronas - Especificação”. Rio de Janeiro - ABNT-1984;
- [8] - Associação Brasileira de Normas Técnicas - “NRB 5380 - Transformadores - Especificação” - Rio de Janeiro - ABNT - 1984.