



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

CB/GGH/32

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 1

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CARGA, DA TEMPERATURA, DO NÍVEL DE TENSÃO E DO FATOR DE POTÊNCIA NO RENDIMENTO DO GERADOR

**Costa, L.L.H. (*)
Andritz Hydro Brasil**

RESUMO

De acordo com a definição da norma IEC60034-2-1, Edition 1.0 2007-09 (3), o rendimento corresponde à razão entre a potência de entrada e a potência de saída. Assim, é possível dizer que a eficiência da máquina corresponderá à razão entre a potência ativa de saída e a potência ativa somada às perdas.

A menos das perdas mecânicas, as perdas eletromagnéticas do gerador síncrono estão sujeitas a variações. Tais variações se dão em função, basicamente, da temperatura, da carga, do nível de tensão terminal e/ou do fator de potência. Assim, o rendimento do gerador variará ao longo dos pontos em que operará.

As características particulares intrínsecas a cada uma das perdas eletromagnéticas se refletem no projeto do gerador. Isso porque, cada máquina apresenta uma distribuição de perdas diferente, de modo que cada gerador apresentará uma sensibilidade diferente para a variação de cada um dos fatores de influência no seu rendimento.

Este trabalho apresentará um estudo de maneira a demonstrar, através de exemplos, da influência da temperatura, da carga, do nível de tensão e do fator de potência no rendimento real do gerador. Além disso, será apresentada uma comparação entre o rendimento real do gerador síncrono e o rendimento nominal declarado nos dados de placa da máquina.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogerador, Rendimento, Perdas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como principal objetivo chamar a atenção para o parâmetro do rendimento do gerador e a suas singularidades, principalmente quanto a sensibilidade a variações em função de fatores de influência. Fatores esses os quais são provenientes das condições nas quais as máquinas síncronas poderão operar ao longo de sua vida útil. Esses fatores de influência tem impacto nas perdas do gerador, as quais são utilizadas para calcular o rendimento da máquina.

O estudo desenvolvido e apresentado neste informe técnico apresenta o comportamento do rendimento da máquina síncrona em função da variação de quatro fatores de influência, os quais foram definidos neste trabalho como aqueles que mais impactam nas perdas e conseqüentemente no rendimento do gerador.

Para a elaboração dos estudos aqui descritos, tomou-se o projeto eletromagnético de uma máquina, de modo que esse projeto foi utilizado como exemplo a fim de ilustrar a variação do rendimento (devido á variação das perdas) em função dos fatores de influência determinados.

2.0 - MOTIVAÇÃO

Durante o desenvolvimento de estudos para a implementação de novas usinas hidrelétricas, deparou-se com nota técnica onde está detalhada a proposta da EPE para o cálculo do rendimento médio do conjunto turbina-gerador (1)

e perda hidráulica média no circuito de geração, de forma que esses parâmetros são posteriormente utilizados em modelos energéticos. Neste documento, utiliza-se o parâmetro Rendimento Médio do Gerador, definido como:

“O rendimento do gerador elétrico pode ser adotado constante para qualquer condição de operação [3]. Admite-se que as perdas mecânicas nos mancais estejam incorporadas no rendimento do gerador.”

A referência citada nesta definição, a qual está itemizada com o número [3], corresponde à um informe técnico apresentado no XVII SNPTTE de 2003 (2) O informe técnico em questão determina o rendimento médio ponderado de turbinas de usinas hidrelétricas, onde é adotado um rendimento constante para o gerador. No entanto, não há uma justificativa ou um aprofundamento a respeito do parâmetro Rendimento do Gerador.

Em vista disso tudo, decidiu-se por desenvolver um estudo de maneira a demonstrar a influência de determinados fatores no rendimento do gerador, de forma a chamar a atenção quanto a importância desse parâmetro e sua complexidade.

3.0 - RENDIMENTO DO GERADOR

De acordo com a definição da norma IEC60034-2-1, Edition 1.0 2007-09, o rendimento corresponde à razão entre a potência de entrada e a potência de saída, expressas nas mesmas unidades de medida, e apresentadas normalmente como um percentual (*“ratio of output power to input power expressed in the same units and usually given as a percentage”*). Valendo-se da definição dada pela norma IEC, é possível dizer que a eficiência do gerador síncrono corresponderá à razão entre a potência ativa de saída e a potência ativa somada às perdas.

É possível dizer que as perdas que determinam o rendimento dos grandes geradores síncronos podem ser separadas, basicamente, nas seguintes perdas:

- Perdas no cobre do estator.
- Perdas no cobre do rotor.
- Perdas suplementares (*short circuit losses*).
- Perdas no ferro (*open circuit losses*).
- Perdas no sistema de excitação.
- Perdas mecânicas.

Dessas perdas, a única parcela que se mantém praticamente constante são aquelas relativas às perdas mecânicas. Essa afirmação é válida desde que as perdas mecânicas correspondam à somatória das perdas de ventilação e perdas nos mancais do gerador. Isso considerando que as perdas nos mancais do gerador, caso estejam contabilizadas as perdas no mancal de escora, levem em conta somente a parcela relativa ao gerador. Isto é, a parcela relativa as perdas no mancal de escora devido à carga da turbina (massa das partes girantes da turbina e empuxo hidráulico) não estão contabilizadas, uma vez que o empuxo hidráulico varia em função da carga. Assim, considerando uma condição estabilizada do regime de operação da unidade geradora, é possível admitir que as perdas mecânicas serão constantes, independente da carga, da temperatura, do nível de tensão terminal e do fator de potência.

Se por um lado as perdas mecânicas são praticamente invariáveis durante a operação do gerador síncrono, por outro lado, as demais perdas estão sujeitas a variações. As outras perdas do gerador são de cunho eletromagnético, e apresentam variações na magnitude em função de alguns fatores os quais são provenientes da condição na qual a máquina opera.

Isto significa que as demais perdas podem variar em função de alguns fatores de influência, tais como a temperatura do cobre dos enrolamentos, a carga ou potência de saída, o nível de tensão terminal e o fator de potência. Naturalmente, o rendimento da máquina síncrona também variará em função das condições em que irá operar.

3.1 Rendimento Nominal do Gerador

O parâmetro do rendimento nominal do gerador representa uma condição bastante específica de operação da máquina. Além disso, o rendimento nominal depende diretamente das perdas consideradas (exemplo: inclusão ou não inclusão das perdas dos mancais) assim como depende da definição da temperatura de referência do cobre dos enrolamentos para as quais as perdas ôhmicas são calculadas.

A condição específica de operação, na qual se calcula o rendimento nominal, não significa, necessariamente, que seja um ponto de operação tangível pela máquina. A especificidade da condição para a qual o rendimento nominal é calculado implica que este parâmetro deve ser tomado como uma referência, cujas condições estão bem estabelecidas.

As perdas para o cálculo do rendimento nominal podem ser obtidas, nas condições estabelecidas, a partir dos dados do ensaio de rendimento, sejam elas diretamente obtidas nas medições, sejam elas obtidas por meio de extrapolação e/ou transposição das grandezas medidas.

4.0 - RENDIMENTO DO GERADOR EM FUNÇÃO DOS FATORES DE INFLUÊNCIA

Nesta seção deste trabalho, será apresentado o comportamento do rendimento do gerador e a sua variação em função de alguns fatores de influência. Assim, foram elencados aqueles fatores mais preponderantes em termos de influência no rendimento do gerador, os quais estão listados a seguir:

- Carga ou potência de saída.
- Temperatura dos enrolamentos (temperatura do cobre).
- Nível de tensão terminal (tensão de armadura).
- Fator de potência.

Uma vez que cada gerador apresentará um grau de sensibilidade quanto ao comportamento do rendimento frente aos fatores de influência destacados, neste trabalho foi decidido por tomar-se um o cálculo eletromagnético de um gerador qualquer a fim de ser o a ser utilizado ao longo de todo o estudo.

O cálculo eletromagnético escolhido considerou uma máquina cujos níveis de induções, saturação e distribuição de perdas estão dentro do range de experiência da Andritz. As características da máquina utilizada neste exemplo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do gerador

Potência [MVA]	Fator de potência [-]	Tensão [V]	Número de polos [-]	Frequência [Hz]
220	0.90	13800	76	60

É importante destacar que as variações apresentadas neste trabalho serão tratadas de maneira desacoplada para cada um dos fatores de influência. Isto é, quando um determinado fator de influência estiver sendo estudado, todos os demais serão mantidos constantes, exceto quando indicado.

Vale ressaltar que o resultado da magnitude das variações obtidas e apresentadas neste trabalho não podem ser generalizados para outras máquinas, uma vez que o comportamento do rendimento é algo específico e intrínseco a cada projeto.

As perdas consideradas nos estudos desenvolvidos neste trabalho são as seguintes:

- Perdas no cobre do estator [**I2RST**].
- Perdas no cobre do rotor [**I2RFLD**].
- Perdas suplementares (*short circuit losses*) [**SCCL**].
- Perdas no ferro (*open circuit losses*) [**OCCL**].
- Perdas no sistema de excitação [**EXC**].
- Perdas de ventilação [**VENTIL**].

Não foram consideradas perdas nos mancais, contabilizando-se apenas as perdas de ventilação como perdas mecânicas.

4.1 Rendimento do Gerador em Função da Carga

A curva de rendimento do gerador em função potência de saída, em VA (ou PU), é bastante difundida e relativamente comum. Nessa curva é possível observar a variação do rendimento do gerador em função da carga ou potência de saída. A Figura 1 apresenta a curva do rendimento do gerador em função da potência de saída.

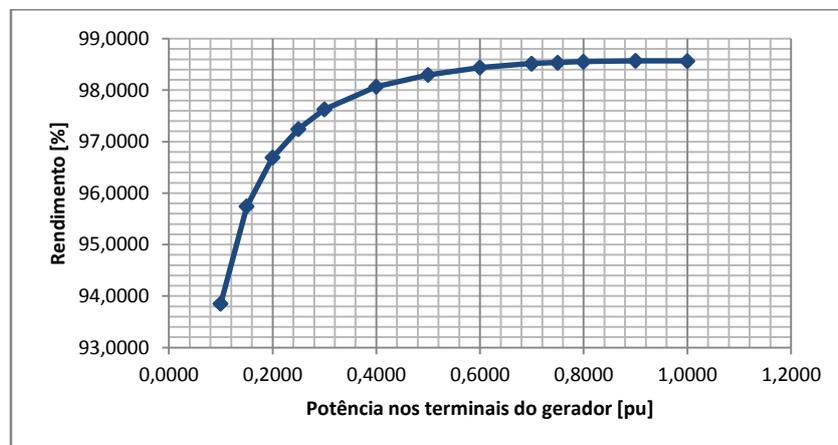


Figura 1 – Rendimento versus potência de saída

A curva de rendimento apresentada na Figura 1 foi calculada considerando que as perdas ôhmicas no enrolamento do estator e rotor estão na temperatura de referência de 75°C. Enquanto que a tensão e o fator de potência foram mantidos em seus valores nominais de 13800 V e 0.90, respectivamente.

É possível notar que a variação da carga possui uma influência forte no comportamento da curva de rendimento do gerador, principalmente nas condições inferiores à 0.70 pu.

Esse comportamento se deve pois, algumas das perdas mantêm-se constantes ao longo dos diversos pontos de carga, enquanto outras perdas acompanham a variação da potência de saída. O gráfico da Figura 2 mostra o comportamento das perdas em função da potência de saída.

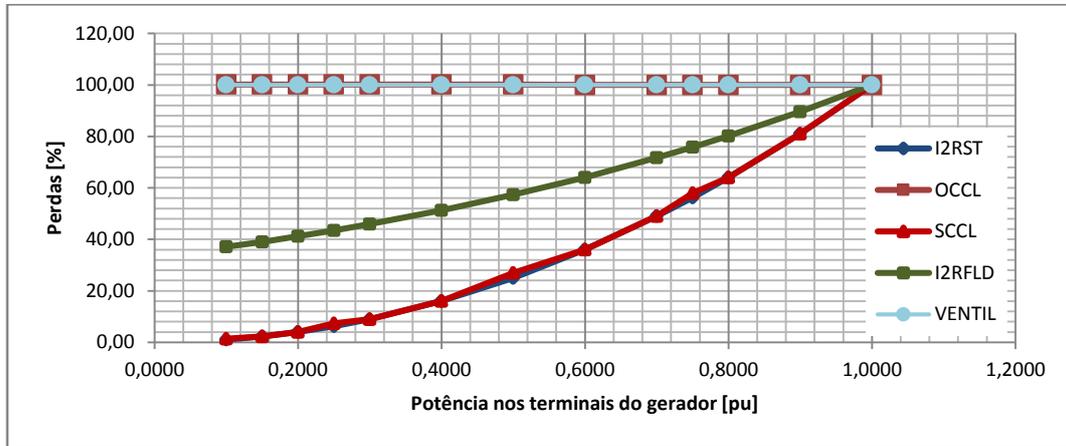


Figura 2 – Perdas versus potência de saída

No gráfico da Figura 2 é possível observar que as perdas de circuito aberto (OCCL) e as perdas de ventilação (VENTIL) se mantêm constantes para todos os pontos de carga enquanto as demais perdas variam em função da potência de saída, muito embora isso ocorra de maneira distinta.

Esse comportamento das perdas de circuito aberto (OCCL) se dá pois essas perdas dependem basicamente do nível de tensão de armadura, enquanto que as perdas de ventilação dependem do circuito de ventilação. As perdas de ventilação serão constantes em todos os casos estudados neste trabalho. Já as perdas de circuito aberto variarão em outras situações a serem observadas nas próximas seções deste trabalho.

As perdas ôhmicas dos enrolamentos (I2RST e I2RFLD) variam conforme uma função quadrática, em decorrência de essencialmente serem funções das resistências dos respectivos enrolamentos e da corrente que neles circula. Uma vez que a resistência não varia, a curva acompanha, basicamente, a variação quadrática da corrente elétrica. Para as perdas do enrolamento do estator (I2RST), a curva acompanha a corrente de armadura enquanto que para as perdas do enrolamento do rotor (I2RFLD), a corrente de campo é quem determina a variação das perdas ôhmicas.

4.2 Rendimento do Gerador em Função da Temperatura dos Enrolamentos (Temperatura do Cobre)

A temperatura de referência na qual as perdas nos enrolamentos do gerador são calculadas influencia diretamente no rendimento do gerador. O gráfico da Figura 3 apresenta a variação do rendimento do gerador em função da temperatura de referência na qual as perdas ôhmicas foram calculadas.

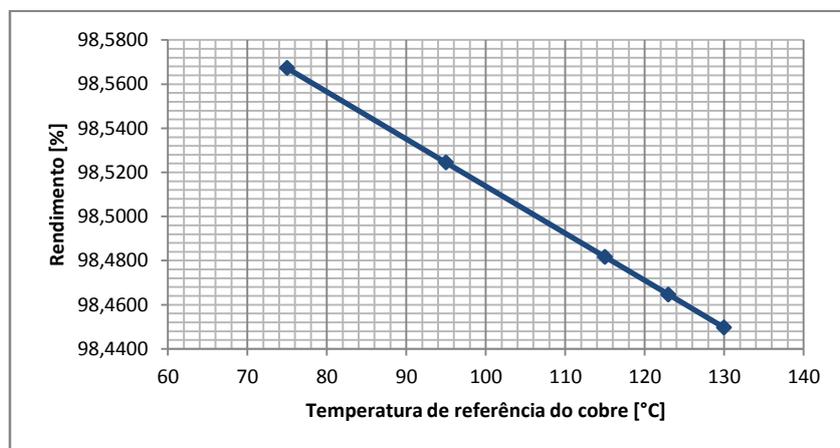


Figura 3 – Rendimento versus temperatura de referência do cobre dos enrolamentos

É possível notar que a mudança na referência de temperatura na qual as perdas ôhmicas são calculadas possuem um impacto no rendimento do gerador. Para máquinas onde as perdas predominantes são essencialmente as perdas ôhmicas, esse impacto pode ser ainda mais relevante.

De acordo com as normas IEEE C50.12 de 2005 (5) e IEC 60034-1 de 2010 (4), recomenda-se que as perdas ôhmicas sejam calculadas de acordo com o limite de elevação de temperatura para qual o enrolamento foi projetado. Usualmente, nos dias atuais, os enrolamentos são manufaturados com isolamentos classe F e projetados para elevações de temperatura classe B. Considerando essa condição atual dos enrolamentos, de acordo com as normas citadas, as perdas ôhmicas deveriam ser calculadas considerando uma referência de temperatura de 95°C. Se por ventura os enrolamentos forem projetados para elevações de temperatura também classe F, então a recomendação é de utilizar a temperatura de referência de 115°C para as perdas ôhmicas.

Ainda assim, mesmo considerando as perdas ôhmicas nas temperaturas de referência calculadas pelas normas, isso não significa que o rendimento nominal calculado para o gerador, considerando as suas condições nominais de operação, será o rendimento real da máquina.

Para calcular o rendimento real da máquina, no ponto de operação de operação nominal, as perdas ôhmicas deveriam considerar as temperaturas de operação para as quais os enrolamentos foram projetados.

Os valores apresentados na Tabela 2 correspondem à temperatura de referência para as perdas ôhmicas do enrolamento do estator, considerando os limites de elevações de temperatura da norma IEC 60034-1 de 2010 (4) para um gerador de tensão nominal 13800V. Já os valores da Tabela 3 correspondem à temperatura de referência para as perdas ôhmicas do enrolamento do rotor, considerando os limites de elevações de temperatura da mesma norma IEC 60034-1 de 2010 (4).

Tabela 2 – Temperaturas de referência para perdas ôhmicas reais do enrolamento do estator

Temperatura do ar frio [°C]	Limite de elevação de temperatura do estator [°C]	Temperatura do enrolamento do estator [°C]
40.0	83.0	123.0

Tabela 3 – Temperaturas de referência para perdas ôhmicas reais do enrolamento do rotor

Temperatura do ar frio [°C]	Limite de elevação de temperatura do rotor [°C]	Temperatura do enrolamento do rotor [°C]
40.0	90.0	130.0

No entanto, essas temperaturas de referência são válidas para as condições de projeto do gerador, isto é, temperatura do ar frio à 40°C e temperatura de água de resfriamento à 30°C (condições usuais de projeto). No entanto, sabe-se que essas temperaturas variam ao longo do ano além de outras condições de operação que podem vir a alterar as elevações de temperatura dos enrolamentos, além do fato de que essa condição de temperatura dos enrolamentos só é válida na condição nominal de operação do gerador.

Assim, para fins de dimensionamento do gerador, o ideal é seguir as recomendações das normas.

4.3 Rendimento do Gerador em Função do Nível de Tensão (Tensão de Armadura)

O gráfico apresentado na Figura 4 apresenta o comportamento do rendimento gerador em função do nível de tensão de armadura, no qual, normalmente, o gerador pode operar (-10% / +5% da tensão nominal).

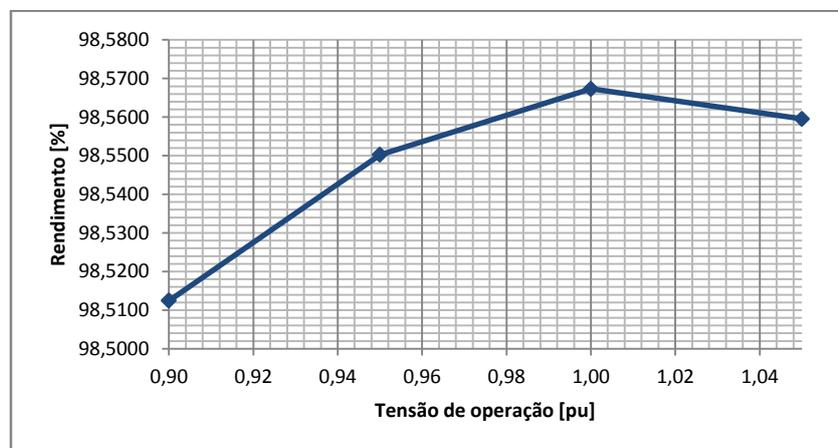


Figura 4 – Rendimento versus tensão de armadura

O nível de tensão do gerador possui um impacto bastante relevante no rendimento do gerador. Isso porque, com exceção das perdas mecânicas, o nível de tensão do enrolamento de armadura (estator) em que a máquina síncrona opera influencia todas as demais perdas eletromagnéticas do gerador.

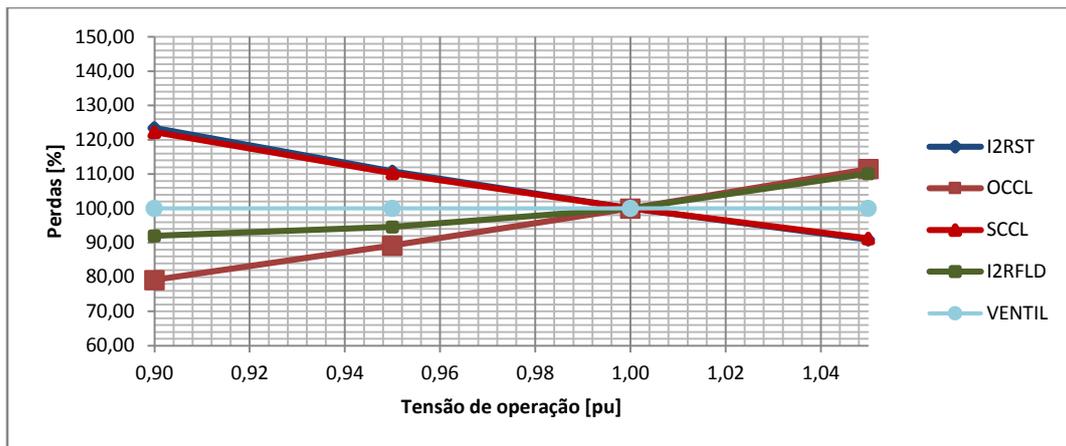


Figura 5 – Perdas versus tensão de armadura

No gráfico da Figura 5 é possível observar o comportamento das perdas do gerador em função da tensão de operação do enrolamento do estator. Neste gráfico observa-se que somente as perdas de ventilação são constantes para qualquer nível de tensão.

O fato das demais perdas variarem se deve ao comportamento do circuito eletromagnético da máquina.

As perdas ôhmicas do enrolamento do estator (I2RST) variam em função da corrente de armadura. A corrente de armadura por sua vez, para uma dada potência de máquina, é mais alta quando a tensão terminal é mais baixa e mais baixa quando a tensão de armadura é mais alta. Isso já era esperado, uma vez que a potência elétrica é dada pelo produto da tensão e corrente de armadura.

Conforme visto na seção 4.1, onde observou-se o comportamento do gerador em função da carga, aqui as perdas suplementares seguem um comportamento similar as perdas ôhmicas do enrolamento do estator, evidenciando um comportamento aproximadamente quadrático em função da corrente de armadura da máquina.

As perdas de circuito aberto (OCCL) variam de acordo com o nível de tensão pois essa tensão no enrolamento de armadura é proporcionada pelo fluxo magnético que circula no circuito magnético do gerador. Um modelo simplificado pode ser visto na Figura 6.

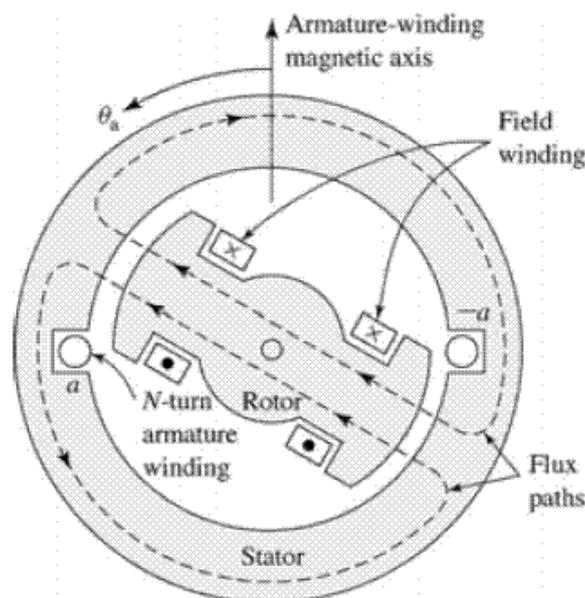


Figura 6 – Circuito magnético simplificado do gerador síncrono

Pode-se dizer que a tensão terminal, na condição de circuito aberto, será igual à força eletromotriz do gerador. A força eletromotriz pode ser descrita simplificada de acordo com a equação a seguir.

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi \cdot f \cdot N \cdot K$$

Onde:

E : Força eletromotriz do gerador.

Φ : Fluxo magnético.

f : Frequência.

N : Número de espiras série por fase

K : Fator geométrico.

Por meio da equação da força eletromotriz fica mais simples a visualização do comportamento das perdas de circuito aberto em função da tensão. Isso porque, para níveis mais baixos de tensão, haverá a necessidade de um fluxo magnético (Φ) menor uma vez que os demais parâmetros que compõe a equação não sofrerão alterações.

Enquanto que para níveis de tensão maiores, o fluxo magnético (Φ) será maior conseqüentemente. O fluxo magnético é o principal responsável pelas perdas de circuito aberto (OCCL) em função das induções magnéticas geradas, as quais são as principais fontes de perdas magnéticas. Assim, quanto maior o fluxo magnético circulando no circuito magnético do gerador, maiores serão as perdas de circuito aberto.

Por essa mesma razão, as perdas ôhmicas do enrolamento do estator (I²RFLD) aumentam. Isso porque, a fonte de fluxo magnético do gerador é o enrolamento de campo do gerador. Uma vez que há necessidade de um fluxo magnético maior, a corrente de campo será naturalmente maior, proporcionando maiores perdas ôhmicas nesse enrolamento.

4.4 Rendimento do Gerador em Função do Fator de Potência

O gráfico da Figura 7 apresenta quatro curvas de rendimento em função do fator de potência para quatro potências de saída constantes:

- 25% da potência nominal.
- 50% da potência nominal.
- 75% da potência nominal.
- 100% da potência nominal.

É importante destacar que, nos estudos considerados, a variação do fator de potência considerou somente as condições sobreexcitadas de operação do gerador síncrono.

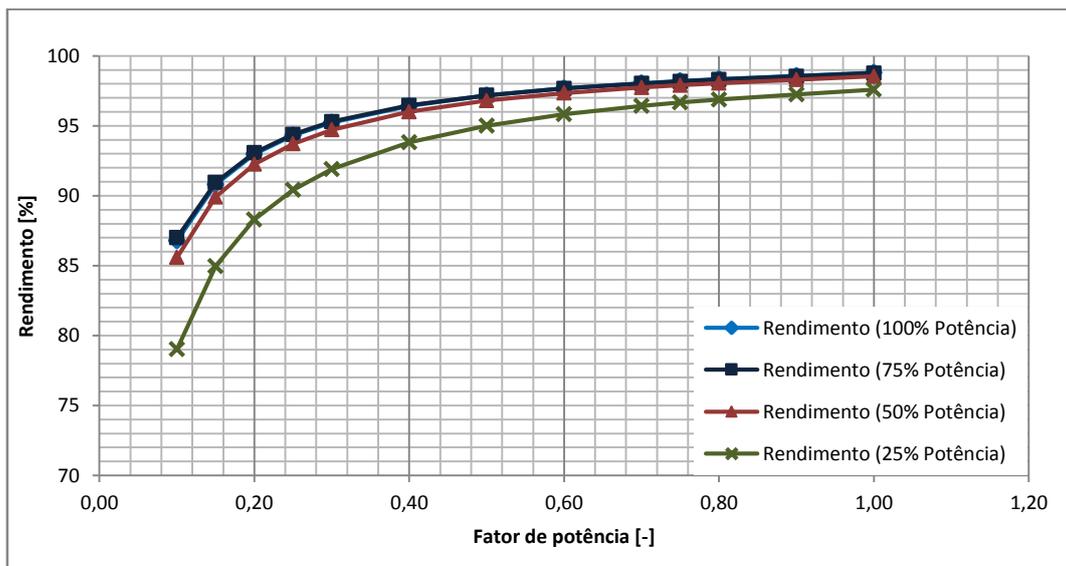


Figura 7 – Rendimento versus fator de potência

A variação do rendimento do gerador em função do fator de potência se deve unicamente devido à variação das perdas ôhmicas do enrolamento do rotor. Essa característica é um reflexo da variação da corrente de campo em função do fator de potência. O comportamento das perdas ôhmicas do enrolamento do rotor em função do fator de potência (sobreexcitado) está apresentado na Figura 8.

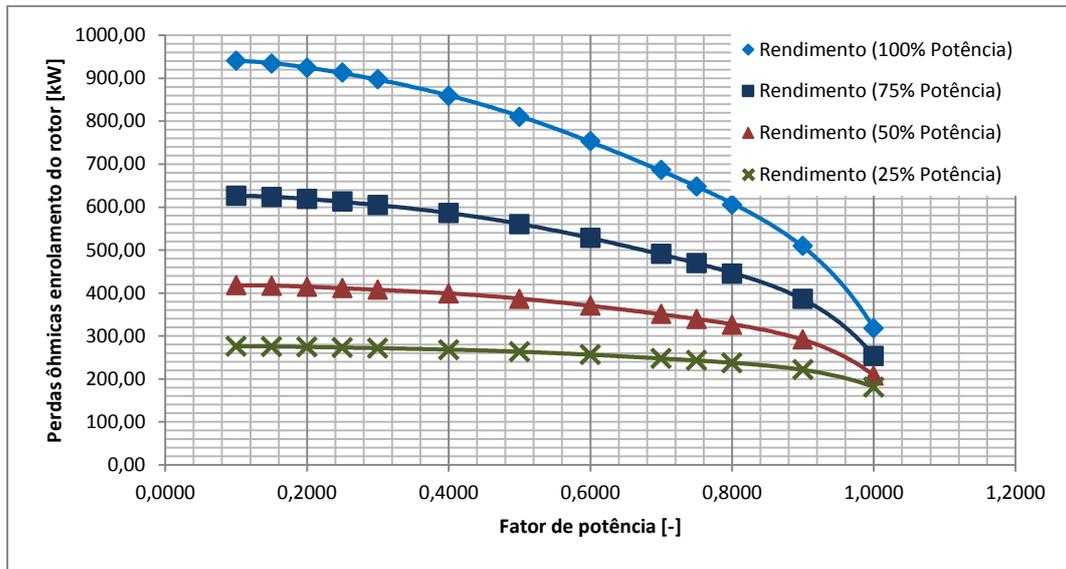


Figura 8 – Perdas ôhmicas do enrolamento do rotor versus fator de potência

Quando o gerador opera na condição sobreexcitado, a reação devido a corrente de armadura possui uma característica desmagnetizante. Essa característica desmagnetizante leva a necessidade de que a força eletromotriz interna ao gerador seja maior de maneira a manter a tensão nos terminais do enrolamento de armadura constante. A característica desmagnetizante da corrente de armadura na condição sobreexcitada pode ser facilmente observada por meio do diagrama de fasores apresentado na .

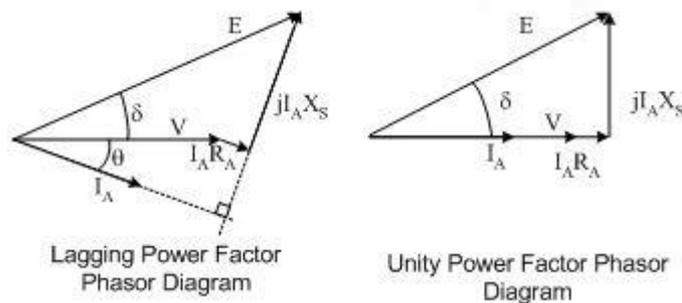


Figura 9 – Diagrama de fasores do gerador síncrono operando sobreexcitado e operando com fator de potência unitário

A característica desmagnetizante da corrente de armadura na condição sobreexcitada proporciona um comportamento tal que, o fluxo magnético deverá ser maior em condições em que o fator de potência é mais baixo. Enquanto que o fluxo magnético será menor quando o fator de potência for mais alto, aproximando-se da condição unitária. Assim, esse comportamento do fluxo magnético se reflete na corrente de campo.

Dessa forma, quanto mais próximo ao fator de potência unitário, menor será a corrente de campo e conseqüentemente menores serão as perdas. Enquanto que a medida que o fator de potência diminui, a corrente de campo aumentará e junto com ela, as perdas no enrolamento de campo. Assim, é possível dizer que o rendimento do gerador será mais alto em condições de operação onde o fator de potência for mais alto.

5.0 - CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar um estudo das influências de alguns fatores relacionados às condições de operação dos geradores síncronos.

Os fatores de influência abordados neste trabalho são aqueles cuja influência é mais evidente e de maior preponderância quando observa-se sob a ótica do rendimento da máquina síncrona em operação como gerador.

Foi possível observar que ao ter suas condições de operação alteradas, as perdas nas máquinas síncronas serão

alteradas também e por consequência o rendimento será naturalmente diferente. Em função desse comportamento, não é possível admitir um rendimento do gerador constante ao longo de toda uma faixa de operação.

Entende-se que há a necessidade de desenvolver uma definição mais realista para ser levada em conta no cálculo do rendimento médio do gerador, em particular para a utilização de acordo com a metodologia proposta em (1).

O intuito do estudo aqui apresentado não foi de entrar nos pormenores dos cálculos de perdas, tampouco do cálculo do rendimento. Mas sim, ilustrar a importância do parâmetro do rendimento do gerador e sua complexidade frente às condições operacionais as quais a máquina estará sujeita ao longo de sua vida útil.

Espera-se desenvolver em trabalhos futuros propostas de metodologias para o cálculo do rendimento do gerador com a finalidade de aplicação em cálculos energéticos e rendimentos das unidades geradoras.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) *EPE-DEE-RE-037/2011-r2 – ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO – Metodologia de Cálculo de Parâmetros Energéticos Médios: Rendimento e Perda Hidráulica*, EPE / MME, Brasil, Abril de 2013.
- (2) NEGRI, J.C., ANG, E.I.B., TEIXEIRA, J.R.F., MAIMONE, P.G.C., BARILLARI, S.N., *GGH-10 – Determinação do Rendimento Ponderado Médio Operacional de Turbinas de Usinas Hidrelétricas*, XVII SNPTEE, Uberlândia, Brasil, Outubro de 2003.
- (3) *IEC 60034-2-1 – Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*, Edition 1.0, IEC, Genebra, Suíça, 2007.
- (4) *IEC 60034-1 – Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*, Edition 12.0, IEC, Genebra, Suíça, 2010.
- (5) *IEEE C50.12 – IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above*, IEEE, Nova York, EUA, 2005.
- (6) KOSTENKO, M., PIOTROVSKY, L., *Máquinas Elétricas*, Volume 2, Editora Lopes da Silva, Porto, Portugal, 1972.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Leandro Luiz Húngaro Costa, nascido em 1987, em Bauru / SP, Brasil. É graduado engenheiro eletricitista (2009) e mestre em engenharia elétrica (2012) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). É engenheiro de propostas técnicas de hidrogeradores na Andritz Hydro Brasil desde janeiro/2012.