



**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS LIMITES DE EXEQUIBILIDADE DE HIDROGERADORES

Thomas Hildinger*
Voith Siemens Hydro

Marcelo Guida Tavares
Voith Siemens Hydro

João Fernando Namoras
Voith Siemens Hydro

RESUMO

Ao longo do Século XX ou, mais precisamente, do início do Século XX até os anos 80, pode-se observar um crescimento assombroso na potência unitária dos hidrogeradores: em menos de 80 anos, passamos de máquinas com potência ao redor de alguns poucos MVA para os grandes hidrogeradores com potências acima de 800 MVA, dentro os quais se destacam Itaipu, Guri, Grand Coulee e Three Gorges/Sanxia. O propósito da primeira parte deste trabalho é revisitar e discutir as principais forças que permitiram esse dramático incremento na potência unitária. Assim, vale a pena analisar e entender a contribuição das novas tecnologias de projeto (tais como o Método dos Elementos Finitos, Sistemas de CAD/CAE etc.), tecnologias de materiais metálicos e isolantes e tecnologias de fabricação (incluindo os sistemas de impregnação vácuo).

Por outro lado, a crescente demanda por energia elétrica renova a questão de quais são os limites tecnológicos atuais impostos a exequibilidade dos hidrogeradores, principalmente no que se refere a combinação entre potência unitária e rotações (nominal e no disparo) bem como a questão da eficiência. Sob este enfoque, na segunda parte deste trabalho, pretende-se abordar as restrições impostas pelas diferentes naturezas das solicitações ao crescimento (passado, presente e futuro) da potência unitária dos geradores hidrelétricos e da sua densidade energética.

PALAVRAS-CHAVE: hidrogeradores – exequibilidade – limites.

1.0. INTRODUÇÃO

Ao longo do Século XX ou, mais precisamente, do início do Século XX até os anos 80, pode-se observar um crescimento assombroso na potência unitária dos hidrogeradores: em menos de 80 anos, passamos de máquinas com potência ao redor de alguns poucos MVA para os grandes hidrogeradores com potências acima de 800 MVA, dentro os quais se destacam Itaipu, Guri, Grand Coulee e Three Gorges/Sanxia. A figura 1 ilustra esse desenvolvimento.

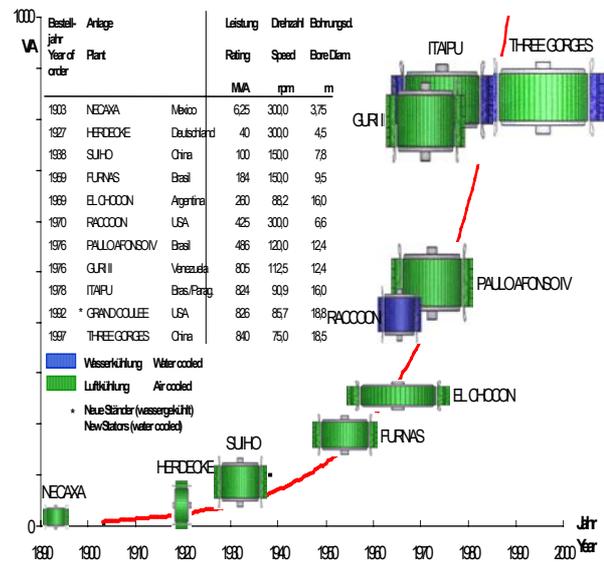


Figura 1

Por outro lado, a crescente demanda por energia elétrica renova a questão de quais são os limites tecnológicos atuais impostos a exequibilidade dos hidrogeradores, principalmente no que se refere a combinação entre potência unitária e rotações (nominal e no disparo) bem como a questão da eficiência.

O objetivo de um questionamento desse tipo é, naturalmente, disponibilizar energia elétrica de origem hidráulica, com o melhor aproveitamento econômico possível, tanto no que se refere aos investimentos iniciais quanto no que tange a operação.

2.0. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Repetidas investigações sobre qual seria a potência máxima que se pode extrair de uma máquina elétrica permitiram aumentar, de forma excepcional, as potências unitárias dos hidrogeradores ao longo do século XX. Esse aumento pode ser considerado como uma consequência natural da evolução tecnológica em função de :

- Melhorias no design das máquinas
- Aperfeiçoamento dos sistemas de refrigeração e de dissipação de calor
- Desenvolvimento de novos materiais e aperfeiçoamento das propriedades dos materiais empregados na fabricação
- Aumento na utilização dos materiais, possibilitado por novos métodos de cálculo.

Entre os vários fatores citados, o desenvolvimento de novos materiais e processos de isolamento, a introdução da refrigeração direta dos enrolamentos com água e os novos métodos de cálculo (incluindo o Método dos Elementos Finitos) merecem um destaque especial pela sua contribuição no aumento da potência unitária máxima que se observou nas últimas décadas.

Um exemplo pode ilustrar bem essa afirmativa:

Na definição de uma máquina síncrona de pólos salientes (execução clássica de quase todos hidrogeradores de médio e grande porte), a execução dos pólos e do enrolamento indutor influenciam, fortemente, todo o design.

Através de técnicas apuradas de cálculo mecânico, principalmente usando o Método dos Elementos Finitos é possível levar a utilização mecânica (tensões admissíveis) até os valores máximos fixados pelas boas práticas de engenharia. Dessa forma, é possível obter sapatas polares de altura bastante reduzida, o que, por sua vez, possibilita reduzir significativamente o fluxo (magnético) de dispersão destes pólos. Como consequência, é possível reduzir a massa de ferro dos pólos e também a dispersão polar, o que, por sua vez, possibilita reduzir também a massa de cobre do enrolamento indutor.

Consequentemente, a força inércia ("força centrífuga) atuante sobre a coroa do rotor também diminui significativamente, possibilitando um aumento do diâmetro (na verdade, dos vários diâmetros) da máquina e, portanto, um aumento na sua potência.

Nos capítulos seguintes, nos quais serão abordados os diversos fatores limitantes da potência dos hidrogeradores, será assumido que a potência limite da máquina elétrica não está limitada pela máquina hidráulica acionadora e tampouco pelas estruturas da casa de força.

A figura 2 apresenta as curvas limite para a execução de hidrogeradores com refrigeração indireta a ar e refrigeração direta a água, tanto para coroas laminadas quanto para coroas maciças. Nestas curvas estão subjacentes as seguintes premissas:

- Rotação de Disparo / Rotação Nominal: 1.8
- Comprimento Máximo. Do Núcleo: 4.0 m
- Relação de Curto-Circuito (Vazio): 0.80 pu
- Reatância Transitória (não saturada): 0.40 pu
- Fator de Potência (sobre-excitado): 0.95

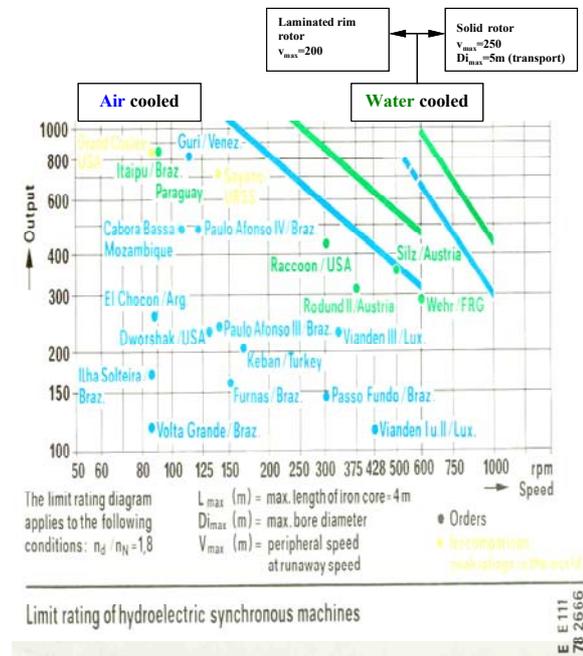


Figura 2

3.0. SOLICITAÇÕES MAGNÉTICAS E DIELÉTRICAS

A solicitação aos circuitos magnéticos da máquina elétrica está limitada por dois fatores:

- rápido aumento das perdas no ferro devido às induções mais elevadas;
- saturação crescente dos materiais magnéticos em induções mais elevadas.

A primeira limitação (aumento das perdas no ferro) pode ser contornada, até certo ponto, com o uso de materiais ferromagnéticos de baixa perda (aço-silício), obtidos por ligas especiais e redução da espessura das chapas utilizadas no núcleo do estator. Atualmente é possível encontrar, comercialmente, chapas de 0.50 mm de espessura, com perdas inferiores a 2.5 W/kg em 1.5 T e 50 Hz.

Infelizmente, exceto pela utilização do potencial da supercondutividade, não se vislumbra uma forma eficaz de contornar a limitação imposta pela saturação dos materiais magnéticos. Extrapolar estes limites teria como consequência inevitável um aumento desproporcional da potência de excitação requerida pela máquina elétrica bem como das perdas no enrolamento indutor, prejudicando, dessa forma o rendimento da máquina e, também, afetando o aquecimento do deste enrolamento. Temos aqui, portanto, um claro limite para o aumento da potência dos hidrogeradores.

A relação de dependência entre a solitação magnética e as demais grandezas características da máquina pode ser explicitada como segue:

Definindo-se:

Fator de Utilização:	C	[kVA.min/m ³]
Potência Nominal:	P _{sn}	[kVA]
Diâmetro Interno:	D _i	[m]
Comprimento do Núcleo	L _{fe}	[m]
Rotação Nominal	N _s	[rpm]
Densidade Periférica	A ₁	[A/m]
Indução Fundamental	B ₁	[T]
Fator de Encurtamento	f _s	[-]

Pode-se escrever:

$$C = \frac{P_{sn}}{D_i^2 \cdot L_{fe} \cdot N_s} \approx \frac{A_1}{100} \cdot \frac{B_1}{100} \cdot \frac{f_s}{0.9} \quad \{1\}$$

Nesta fórmula é fácil reconhecer que, para um dado conjunto de D_i, L_{fe}, N_s, A₁ e, conforme discutido anteriormente uma indução máxima da fundamental do campo magnético - B₁ - não é possível aumentar a potência da máquina (Nota: o fator de encurtamento somente pode ser variado em uma faixa bastante limitada, por exemplo, 0.90 a 1.00).

O valor máximo da fundamental do campo magnético, como parâmetro para a solitação magnética, pode ser ligeiramente aumentado se for possível atenuar um dos principais gargalos do circuito magnético, ou seja, a indução nos dentes do estator. Mantendo-se as demais solitações inalteradas, isto é possível através de uma redução no espaço destinado a isolação do enrolamento induzido. O pressuposto básico é que, através de novas materiais e processos de manufatura é possível aumentar a solitação dielétrica a que a isolação principal do enrolamento induzido é submetido. Naturalmente, as características principais da isolação, tais como expectativa de vida útil, não podem ser prejudicadas neste processo. Atualmente, valores de solitação dielétrica, sob tensão nominal nos terminais, entre 2.4 kV/mm e 3.2 kV/mm são usuais nos hidrogeradores de médio e grande porte.

Com base neste nível de solitação e também considerando as limitações impostas pelos sistemas de supressão de corona, tensões nominais de até 27 kV poderiam ser consideradas factíveis.

A figura 3 ilustra a evolução da solitação dielétrica, sob tensão nominal, nos últimos 30 anos.

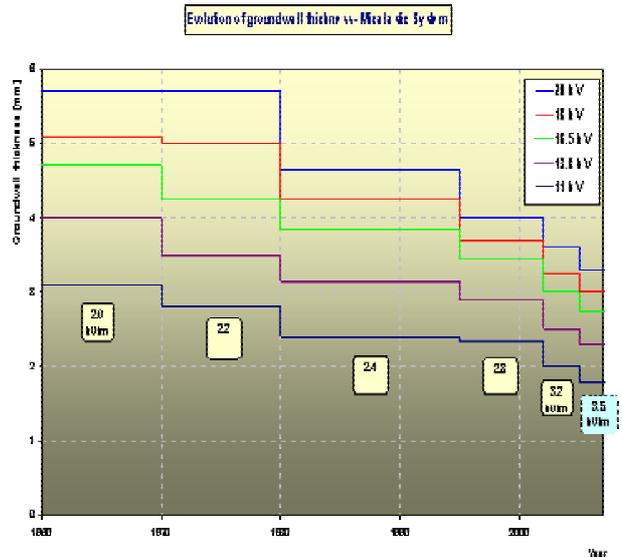


Figura 3

Finalmente, vale ressaltar que um ligeiro aumento nas induções, sem elevar, excessivamente, a potência de excitação pode ser conseguida através de otimizações sucessivas do circuito magnético, similares ao exemplo apresentado em 2.0.

4.0. SOLICITAÇÕES TÉRMICAS

Com base na equação {1} e nas ponderações apresentadas em 3.0 fica claro que para um dado volume (dimensões) e sob rotação constante, a possibilidade de se aumentar a potência a ser extraída de um hidrogerador através do aumento da solitação magnética é, relativamente, limitada. Portanto, a alternativa para se obter esse aumento passa pela elevação da densidade periférica de corrente - A₁ - que, além de representar a reação de armadura, pode ser utilizada como parâmetro para as solitações térmicas dos enrolamentos do estator (também chamado de enrolamento induzido ou enrolamento de armadura) e do rotor (muitas vezes designado como enrolamento de campo ou enrolamento indutor). Uma vez que, para um dado volume (dimensões), a elevação de A₁ sem um aumento significativo das perdas elétricas somente é possível sob circunstâncias excepcionais, como por exemplo, técnicas especiais para a concepção e fabricação das barras estatóricas, sobram dois caminhos para aumentar a potência limite de um hidrogerador, a saber:

Aumento na temperatura do enrolamento, o que, por sua, vez pressupõe um aumento da classe térmica da isolação principal ou então o uso de métodos mais eficazes de refrigeração de forma a intensificar a transmissão de calor. O uso da refrigeração direta a água nos enrolamentos permite um significativo aumento na taxa de remoção de calor dos enrolamentos, a ponto de tornar o aquecimento dos

enrolamentos (entre 25 K a 30 K no caso da refrigeração direta a água em comparação com os usais 60 K a 80 K observados nos casos de refrigeração indireta com ar) um problema de importância secundária, reduzindo igualmente a importância da classe térmica da isolação principal e também os efeitos decorrentes da dilatação térmica.

Isto é particularmente valido no caso dos modernos sistemas de isolação, com classe térmica F, baseados no uso de fitas de mica, materiais sintéticos e resinas (poliester ou epoxi) de impregnação, nos quais a expectativa de vida útil tende a ser mais fortemente definida pela solicitação dieletrica do que pela solicitação térmica em si mesma.

No caso da refrigeração direta a água do enrolamento induzido a transmissão de calor não se faz do cobre para o núcleo magnético e deste para o ar de refrigeração, pois, em função do contato direto entre a água de refrigeração e o cobre do enrolamento, a temperatura do enrolamento situa-se abaixo da temperatura do núcleo. Dessa forma, ocorre uma inversão de sentido do fluxo térmico e, agora, uma parte das perdas do núcleo magnético e transferida, por condução de calor, através da isolação principal ao cobre e daí para a água de refrigeração. É interessante ressaltar que enquanto a refrigeração direta a água produz uma notável redução das temperaturas dos enrolamentos, as temperaturas do núcleo magnético sofrem uma redução apenas moderada quando comparadas com os níveis típicos das maquinas refrigeradas com ar.

Em função das limitações de ordem térmica e também considerando os efeitos das forcas de natureza magnética, corrente nominais de ate 30 kA posem ser consideradas como exeqüíveis.

5.0. GRANDEZAS ELÉTRICAS CARACTERÍSTICAS DA MAQUINA

Ate aqui, foram discutidas somente aquelas grandezas que influenciam, diretamente, os limites magnéticos, térmicos e dielétricos. No entanto, também e preciso considerar as exigências relativas a operação econômica e estável da maquina. Trata-se, basicamente, de 3 grandezas características, a saber:

-Relação de curto em vazio (I_{k0}/I_n) em função da estabilidade estática da maquina não regulada e da exigência de absorção de reativos na região subexcitada.

-Reatância transitória de eixo direto em função da estabilidade dinâmica.

-Perdas e Rendimento em função dos custos operacionais.

Este tópico se dedica a discutir as principais correlacoes entre essas grandezas elétricas e a potência da maquina.

Tomando-se como base uma maquina com refrigeração direta a água dos enrolamentos do indutor e do induzido e cuja relação de curto-circuito em vazio seja igual a 1.0, foram elaboradas simulações computacionais para avaliar a influência do aumento

da potência da maquina sobre a potência de excitação e sobre as perdas totais, mantendo-se constante as dimensões da maquina (em principio, isto e possível, pois os enrolamentos são refrigerados, de forma direta, com água) e aumentando a potência de saída da maquina.

No caso em questão, a maquina apresenta uma potência nominal de 425 MVA e uma reatância transitória não saturada de eixo direto $x'd = 0.28$ pu. Em 700 MVA temos $x'd = 0.42$ pu e em 1000MVA observa-se $x'd = 0.55$ pu.

Essa mesma maquina foi utilizada para determinar a influencia da relação de curto-circuito em vazio sobre a potência de excitação, sobre as perdas totais e sobre a reatância transitória de eixo direto, quando mantidas constantes as dimensões da maquina e variando-se a relação de curto-circuito entre $I_{k0}/I_n = 0.40$ e $I_{k0}/I_n = 1.0$. Enquanto a retancia transitória de eixo direto apresentou uma diminuição de cerca de 30%, as perdas totais aumentaram em aproximadamente 100% e a potência de excitação aumentou cerca de 200%.

No que se refere as perdas, ou seja, aos custos operacionais, observou-se a seguinte situação: nas condições nominais, ou seja, com 425 MVA e fator de potência $\cos \phi = 0.90$ as perdas totais representam, aproximadamente, 1.5% da potência ativa total, ou seja, cerca de 6000 kW. Graças a refrigeração direta a água dos enrolamentos do indutor e do induzido, seria possível extrair da mesma maquina (sem maiores alterações) o dobro da potência original. O que se observa, neste caso, é que as perdas totais passam de 1.5% para 4.0% da potência ativa total e as perdas no enrolamento indutor (e, portanto, a potência de excitação) de 0.3% para 2.0% da potência ativa total. Isto significa dizer que, partindo-se do pressuposto que a maquina hidráulica pode permanecer com a mesma rotação, na construção de uma usina de 850 MVA pode-se reduzir, dramaticamente, as perdas da maquina elétrica, executando-se a usina com 2 maquinas ao invés de apenas 1 maquina.

A Tabela 1 apresenta os principais números da simulação de uma usina com 800 MW para a execução com 1 e com 2 unidades. O custo operacional foi determinado a razão de US\$ 1200 / kW:

Usina	2 x 400 MW	1 x 800 MW
Σ perdas [%]	1.5	4.0
Σ perdas [kW]	12000	32000
Σ perdas [US\$]	14.4×10^6	38.5×10^6
Perdas Indutor [%]	0.3	2.0
Perdas Indutor [kW]	2400	16000

Tabela 1

Somente com base no custo operacional, observa-se uma diferença de 24 milhões de US\$ entre as 2 execuções. Portanto, a execução com apenas 1

maquina somente passa a ser economicamente interessante se a diferença de custo total entre as execuções alternativas, incluindo a maquina elétrica, a maquina hidráulica, sistemas auxiliares e obra civil for superior aos citados 24 milhões de US\$.

6.0. ASPECTOS MECÂNICOS E FABRICAÇÃO

A tendência de aumentar a potência unitária traz consigo, via de regra, maiores solicitações ao rotor. As dimensões atualmente executadas ou em execução somente se tornaram possíveis com o desenvolvimento de acos especiais. Como exemplo, pode-se citar o desenvolvimento nos anos 90 das chapas com limite de escoamento superior a 600 N/mm² para rotores com coroas segmentadas. No entanto, mesmo esses acos com elevado limite de tensão de escoamento estão sujeitos aos problemas da dilatação mecânica elástica do rotor quando em movimento. Essa dilatação elástica é, independente do limite de escoamento, proporcional ao modulo de elasticidade e, portanto, praticamente a mesma para todos os tipos de aço empregados na construção de rotores de hidrogeradores. Por outro lado, é exatamente nas maquinas de grande diâmetro, geralmente com elevado numero de pólos, que se necessita de entreferros reduzidos e, portanto, o problema se manifesta de forma mais aguda e deve ser considerado na fase inicial de concepção.

Uma particularidade dos hidrogeradores reside nas rotações de disparo relativamente elevados em comparação com a rotação nominal. No passado, era usual que se especificasse que a coroa deveria ser contraída sobre o cubo de tal forma que ainda houvesse contato entre ambos na rotação de disparo. Posteriormente, com o aumento na potência unitária essa exigência foi suavizada e se passou a exigir contato na rotação de rejeição de carga ou de regulação e não mais na rotação de disparo. Aumentos ainda maiores na potência unitária e considerações de ordem econômica tornaram mesmo essa exigência virtualmente impossível de ser atendida e a contração passou a ser solicitada, somente, ate um pouco acima (10% e um valor característico) acima da rotação nominal. Em rotações acima do limite de flutuação, e necessário guiar, através de cunhas ou chavetas tangenciais, a expansão radial da coroa.

No caso dos estatores, principalmente os de grande diâmetro, e a dilatação térmica que representa a principal dificuldade a ser vencida. Além de representar em si mesma um risco para o núcleo magnético, a dilatação térmica pode produzir grandes variações na altura radial do entreferro entre os estados de maquina fria e de maquina quente. Em função desse fato e também em função da expansão elástica do rotor com o aumento da rotação e preciso considerar essas variações durante a fase de projeto e também na montagem da maquina.

6.1. Eixos

Naturalmente, o aumento na potência unitária dos hidrogeradores trouxe novas exigências para a execução dos eixos. Atualmente, é possível adquirir eixos maciços em uma única peça com massas de ate 300 toneladas. No entanto, na construção de grandes maquinas é economicamente vantajoso usar eixos

ocos soldados. A pratica recente comprovou, também, que é possível soldar eixos maciços forjados de forma a obter eixos robustos e confiáveis e as restrições conceituais que havia com relação a essa execução foram abolidas.

Obviamente, requer-se ainda uma elevada precisão na usinagem dos eixos de grande porte, mas o avanço nas maquinas de controle numérico eliminou, virtualmente, qualquer restrição na usinagem dos eixos para maquinas de elevada potência unitária,

6.2. Cubos

Seja por limitações impostas pelas rotas e dispositivos de transporte, seja por limitações fabris (em muitas fabricas não existem os tornos verticais com capacidade para usinar cubos inteiros), desde cedo na construção dos hidrogeradores se fez a opção preferencial por cubos "partidos", onde uma parte central usinada recebe braços montados (parafusados ou soldados) na sua parte externa. Esses braços podem ser, assim, usinados em separados da parte central do cubo.

Com o aumento da potência unitária dos hidrogeradores alcançou-se dimensões de cubos que requerem, em função das limitações fabris e de transporte, muitas operações de soldagem, diretamente, na obra. Naturalmente, esse fato precisa ser levado em conta tanto na fase de concepção (projeto) quanto na fase de montagem na obra, de forma a minimizar as possíveis deformações causadas pelos trabalhos de solda.

6.3. Carcaça

De forma geral, pode-se afirmar que, nas carcaças dos hidrogeradores, a usinagem dos suportes dos pacotes do núcleo foi abolida ha bastante tempo. As superfícies de apoio das placas de fundação e das cruzetas recebe seu acabamento final, na obra, através de fresadoras portáteis e transportáveis. Em muitos casos, as placas de apoio já acabadas são soldadas, diretamente, na carcaça. Nessas maquinas pode-se empilhar o núcleo magnético livremente. Na maioria das grandes maquinas, essa operação é executada na obra. Além de assegurar um transporte mais simples, essa solução oferece uma maior segurança operacional, pois um núcleo empilhado dessa forma dispensa as carcaças com partições.

6.4 Montagem

Ate os anos 60 era comum a idéia que as maquinas deveriam ser completamente montadas e testadas em fabrica. O aumento da potência unitária e, conseqüentemente, das dimensões dos geradores forçou o deslocamento dessas operações para a obra e, pode-se afirmar que, atualmente, a produção/fabricação da maquina ocorre, em parte, nas próprias obras. Em muitos casos sequer é possível executar, em fabrica, alguma montagem conjunta dos diversos componentes. Isto significa que muitas operações de relativa complexidade técnica precisam ser executadas na obra em maquinas elétricas que, por sua vez, também tendem a ser mais complexas e sofisticadas. Essa tendência deve ser considerada especialmente na fase de planejamento da obra, pois

requer suficiente área de montagem e capacidade de ponte rolante.

Uma alternativa útil, que vem encontrando aceitação generalizada, consiste em empilhar o núcleo magnético com a carcaça na sua posição definitiva em paralelo com os trabalhos na turbina. O único pré-requisito importante é que a fundação do gerador já esteja concluída. Essa alternativa, além de reduzir a área de montagem requerida possibilita tempos de montagem compatíveis com os das máquinas com estatores bi, tri ou quadripartidos, em que pesem os trabalhos adicionais representados pelo empilhamento e bobinagem.

Adicionalmente, pode-se, assim, reduzir a capacidade da ponte rolante se não for exigido que esta seja capaz de suspender o rotor completo (pois se pode montar e desmontar os pólos para efeitos de transporte).

Naturalmente, para essa espécie de continuidade da fabricação na própria obra é fundamental que a qualidade dos fornecimentos seja assegurada e que os dispositivos e ferramentas necessários sejam fornecidos adequadamente, tanto sob aspectos qualitativos e quantitativos quanto no prazo adequado.

7.0. CONCLUSÃO

Ao longo do Século XX ou, mais precisamente, do início do Século XX até os anos 80, pode-se observar um crescimento assombroso na potência unitária dos hidrogeradores: em menos de 80 anos, passamos de máquinas com potência ao redor de alguns poucos MVA para os grandes hidrogeradores com potências acima de 800 MVA, dentro os quais se destacam Itaipu, Guri, Grand Coulee e Three Gorges.

Novas ferramentas analíticas e numéricas, novos materiais isolantes e metálicos bem como novas tecnologias de produção permitem ampliar os limites alcançados no final do Sec. XX. Considerando o uso intensivo da refrigeração direta a água dos enrolamentos do indutor e do induzido e os limites impostos pelas tecnologias disponíveis (não considerando ainda a eventual utilização do potencial da supercondutividade) potências unitárias de até 1500 MVA, similares, portanto, aos grandes turbo-geradores das centrais nucleares, podem ser consideradas factíveis nos próximos anos.

8.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) Haas; Heinrichs; Schmoch; Happoldt; Koch; Simon; Spirk – Developments Trends of Large Power Generation Machinery – The 8th World Energy Konferenze Bukarest.
- (2) Faria, Hildinger; Poletto; Rocha – A influência dos parâmetros no custo dos hidrogeradores – XVI SNTPEE.
- (3) Auinger; Kracke; Neuhaus – Improving the Efficiency of Electrical Machines – Siemens Power Engineering.

- (4) Bonfert – Entwicklungstendenzen beim Bau elektrischer Maschinen – Symposium "Wissenschaft-Industrie".