



Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

DESAFIOS NO CÁLCULO E NO PROJETO DE HIDROGERADORES DE GRANDE POTÊNCIA NO SÉCULO XXI

J. JOHNNY ROCHA E.^{(1)(*)}; ARMANDO L. O. TORRES⁽²⁾; JULIANO R. DA SILVA⁽²⁾; EVERTON VON ZUBEN⁽³⁾;
MAURO UEMORI⁽⁴⁾; THOMAS HILDINGER⁽⁵⁾

⁽¹⁾Trassínio Consultoria; ⁽²⁾Itaipu Binacional; ⁽³⁾Andritz Hydro; ⁽⁴⁾GE Hydro; ⁽⁵⁾Voith Hydro

RESUMO

Estamos vivendo o grande marco histórico em que a humanidade está construindo hidrogeradores que superam a marca de 1 GW. Diante desse feito memorável, discutiremos sobre os elementos tecnológicos que precisaram ser superados para celebrar essa conquista.

Elencaremos conceitos como: fator de aproveitamento, intensidade linear de corrente, capa de corrente, potência por polo, tensão nominal, kV/mm de isolamento do enrolamento do estator, carregamento de corrente por ranhura, velocidade periférica circunferencial; fator de dificuldade técnica, rendimento a potência nominal; isso para mencionar os principais elementos comparativos de projeto a serem discutidos e comparados.

Complementaremos abordaremos elementos associados à estratégia adotada para o sistema de resfriamento e os elementos da engenharia mecânica que precisaram ser superados para tornar realidade desafios dessa envergadura.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador síncrono, hidrogerador; cálculo elétrico; grande potência, projeto hidrogerador.

1.0 - INTRODUÇÃO

Tudo indica que o grande salto tecnológico para o universo do sistema trifásico de energia elétrica ocorreu durante a Exposição Internacional de Tecnologia de Frankfurt em 1891, oportunidade em que a joint venture Oerlikon-AEG apresentou ao mundo o primeiro sistema de geração e de transmissão trifásico em alta tensão à longa distância. A central hidrelétrica localizada em Lauffen am Neckar, e abrigava duas unidades de 210 kW -40 Hz - 150 rpm e transmitia energia para ser consumida em Frankfurt a 175 km de distância [1].

Embora os elementos construtivos dessa unidade geradora, hoje exposta no “German Museum” em Munique, não tenham perseverado, o conceito dos geradores síncronos de polos salientes se consolidou universalmente ao ponto de, em 2015, responder por 16% da matriz elétrica mundial e por 68,1% da matriz elétrica brasileira [2].

O grande desafio associado ao cálculo e ao projeto de hidrogeradores está na condição única e singular do recurso hidro energético de cada nova usina, impondo um novo projeto para cada nova central. O projeto demanda dos engenheiros um conhecimento multidisciplinar para combinar fundamentos de engenharia elétrica e mecânica com dinâmica de fluidos, transferência de calor e domínio avançado da ciência dos materiais.

Não há oportunidade para a construção de modelos reduzidos de geradores; por isso, cada módulo de cálculo deve ser muito bem consolidado. Os seus resultados, além de confiáveis, devem materializar critérios economicamente competitivos. Isto torna compreensível o processo paulatino da evolução tecnológica e o comedimento dos saltos tecnológicos ocorridos ao longo do século passado. Mesmo porque, o investimento demandado por unidades geradoras cada vez com maior capacidade, significa uma alavancagem financeira cada vez maior e esses saltos tecnológicos, se não prudentemente administrados, poderiam comprometer o futuro do fabricante.

(*) Rua das camélias, n° 333 – CEP 06355 400 Carapicuíba, SP – Brasil

Uma demonstração histórica dessa situação é o empreendimento desafiador anunciado em 1967 por Mr. Udall, na condição de Secretário do Interior do governo dos Estados Unidos de América. Nesse momento, o estado da arte recomendava que a terceira central de Grand Coulee abrigasse unidades de 300 MW. O Governo Americano comunicou que essa central abrigaria unidades de 600 MW. Essa mudança faria de Grand Coulee o maior produtor de energia do mundo e detentora dos maiores geradores da sua época.

Essa central conta com 6 unidades geradoras, 3 de 825,7 MVA, 85,7 rpm com resfriamento direto com água no enrolamento do estator [3] e 3 unidades de 615,4/707,7 MVA, 72 rpm com sistema de resfriamento ar-água [4]; ambos os grupos gerando a 15 kV, 60 Hz e 0,975 de fator de potência. Tais geradores, na sua época, significaram um enorme salto tecnológico e, como veremos mais adiante, foi cercada de muita prudência a condução dos seus fundamentos de dimensionamento eletromagnético e térmico.

Nessa central ficou evidente o grande atrativo econômico de concentrar a geração de grandes volumes de energia em poucas unidades, pois assim se reduz as dimensões da casa de máquinas que, por sua vez, reduz o investimento na implantação da nova central.

Desde então, temos observado o galgar de novos marcos tecnológicos. Se, para Grand Coulee, a ousadia de implantar um sistema de resfriamento ar-água encontrou alguma relutância, isso serviu de antecedente para importantes centrais posteriores, como Itaipu e Three Gorges, que buscaram amparo em sistemas de resfriamento de ar em circuito fechado com trocadores de calor ar-água e fundamentalmente apoiados sobre o resfriamento do enrolamento estático diretamente com água; já no início deste século, temos presenciado a construção de centrais associadas a geradores resfriados com sistemas ar-água dotados de potências unitárias crescentes. Para ilustrar esse processo evolutivo, podemos mencionar os projetos mais emblemáticos em ordem cronológica:

- . China, 2007, Longtan com 9 unidades de 777,8 MVA, 18 kV, 107,1 rpm, 50 Hz e resfriamento ar-água;
- . China, 2012, Xiangjiaba com 8 unidades de 888,9 MVA, 50 Hz e resfriamento ar-água, sendo 4 delas em 23 kV, 71,43 rpm e as outras 4 unidades em 20 kV e 75 rpm;
- . China, 2013, Xiluodu com 18 unidades de 855,6 MVA, 20 kV, 125 rpm, 50Hz e resfriamento ar-água;
- . Brasil, 2016, Belo Monte com 18 unidades de 679 MVA, 18 kV, 85.7 rpm e resfriamento ar-água;
- . China, 2020, Wudongde com 12 unidades de 944,5 MVA, 22 kV, 50 Hz e resfriamento ar-água, sendo 6 delas com 90,9 rpm e as outras 6 unidades com 93,75 rpm;
- . China, Baihetan, 2021, com 16 unidades de 1111,1 MVA, 24 kV, 50 HZ e resfriamento ar-água, sendo 8 delas com 111 rpm e as outras 8 unidades em 107 rpm.

Frente ao exposto, o presente informe técnico se propõe a discorrer sobre os elementos tecnológicos que precisaram ser superados para atingir essa conquista que, em termos de rendimento, beiram à casa dos 99%. Naturalmente, também abordaremos as dificuldades para superar a marca de 1 GW.

2.0 - FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA DE HIDROGERADORES

Sob a luz do conhecimento estruturado que se tem hoje ao nosso dispor, pode-se afirmar que o dimensionamento eletromagnético de máquinas rotativas em CA se fundamenta no o conceito da densidade volumétrica de energia que, na sua forma mais simples e associada a uma máquina elementar com um único enrolamento[5], apresenta-se sob a forma de (1)

$$\frac{T}{Vol} = H \frac{dB}{\partial\theta} = \frac{H}{\omega} \frac{dB}{\partial t} \quad (1)$$

Ou seja, denomina-se como densidade volumétrica de energia a proporção entre o torque mecânico T (energia mecânica) e o volume de material ferromagnético necessário para armazenar a energia magnética (aqui representado pela função da distribuição espacial da densidade de fluxo magnético B , ou simplesmente como campo magnético). Em contrapartida, num ambiente puramente eletromagnético, essa mesma densidade volumétrica de energia pode ser representada pelo empenho da *intensidade linear do campo magnético* H em bombear o fluxo magnético através da seção do núcleo que abriga o fluxo; com um agravante, esse fluxo magnético tem uma variação circunferencial $\partial\theta$ com a velocidade angular ω impondo um campo magnético variando no tempo. Nesse contexto, $H \left[\frac{A \cdot esp}{m} \right]$ caracteriza a quantidade de força magneto motriz -FMM- por unidade de comprimento médio percorrido pelas linhas de fluxo magnético.

2.1 O fator de aproveitamento e a identidade construtiva de uma máquina síncrona

Expressão semelhante a (1) pode ser deduzida para uma máquina síncrona de polos salientes. Para isso é necessário trabalhar com o conceito da potência aparente nominal de um gerador trifásico S_r (2), em conjunto com a expressão que descreve a tensão induzida nominal de fase-neutro nos terminais dessa máquina U_{ln} (3)

$$S_r = m \cdot U_{ln} \cdot I_r \quad (2)$$

$$U_{ln} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p \cdot n_r}{60} \cdot k_w \cdot \frac{b_i}{K_f} \cdot \frac{N_s \cdot N_{cs}}{2 \cdot m \cdot a} \cdot l_c \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} \cdot B_{emax} \quad (3)$$

Onde: m é o número de fases; I_r é a corrente nominal de fase neutro; $\frac{b_i}{K_f}$ representa a não idealidade do campo magnético gerado pela sapata polar; k_w fator de enrolamento estatórico; $N_{ph} = \frac{N_s \cdot N_{cs}}{a}$ é o número de espiras por fase; N_s número de ranhuras do estator; N_{cs} número de espiras por ranhura; a número de circuitos paralelos por fase; l_c é o comprimento bruto do núcleo do estator; $\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p}$ passo polar e D_i diâmetro interno do estator; p número de pares de polos. B_{emax} valor de pico do campo magnético observado sobre a linha do entreferro médio e n_r a rotação nominal do rotor em [rpm].

Levando (3) em (2) e trabalhando convenientemente, pode-se obter uma expressão para a densidade volumétrica de energia de uma máquina trifásica como em (4),

$$\frac{S_r}{\omega \cdot Vol} = \frac{\tau_r}{Vol} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \pi \cdot p \cdot k_w \cdot \frac{b_i}{K_f} \cdot A_i \cdot B_{emax} \quad (4)$$

Onde $A_i = \frac{N_s \cdot N_{cs} \cdot l_r}{a \cdot \pi \cdot D_i}$ é denominada como *intensidade linear de corrente*, e é como se a corrente máxima total por ranhura circulasse tangencialmente por um canal de seção formado pela altura da ranhura e o comprimento bruto do núcleo. Na (4), quando comparada com (1) a intensidade linear de corrente A_i cumpre a função intensidade linear do campo magnético H .

Todavia, por motivos históricos, a (4) não se popularizou na comunidade de projetistas de máquinas elétricas. A mesma, sob o mesmo conceito e empregando variáveis fáceis de colecionar, foi consolidada sob a forma de (5)

$$\frac{S_r}{n_r \cdot l_c \cdot D_i^2} = \frac{\pi^3 \cdot \sqrt{2}}{240} \cdot k_w \cdot \frac{b_i}{K_f} \cdot A_i \cdot B_{emax} \quad (5)$$

Talvez a expressão mais conhecida seja a do *coeficiente de aproveitamento* C e um pouco menos frequente a do *fator de utilização* F_u como descrito em (6)

$$C = \frac{S_r}{n_r \cdot l_c \cdot D_i^2} F_u = \frac{\pi^3 \cdot \sqrt{2}}{240} \cdot k_w \cdot \frac{b_i}{K_f} \cdot A_i \cdot B_{emax} \quad (6)$$

2.2 Aquecimento do enrolamento do estator e o conceito de capa de corrente

Em [5] se mostra que o aquecimento do enrolamento do estator é proporcional à capa de corrente K_s conforme a expressão (7)

$$\Delta T \approx \frac{P_{cu}}{\alpha_k \cdot A_{dis}} = \frac{\rho_b}{\alpha_k} \cdot \frac{l_b}{A_b} \cdot \left(\frac{N_s \cdot N_{cs}}{\pi \cdot D_i} \cdot \frac{I_{ln}}{a} \right) = \frac{\rho_b}{\alpha_k} \cdot J_b \cdot A_i \quad (7)$$

$$= \alpha_{CS} \cdot K\pi_s$$

Onde: P_{cu} são as perdas por efeito Joule do enrolamento estatórico; α_k é o coeficiente de transferência térmica; $A_{dis} = \pi \cdot D_i \cdot l_b$ representa a área de dissipação térmica do enrolamento do estator e l_b representa o comprimento desenvolvido de uma semi-espira da bobina como ilustrado na Figura 1. ρ_b é a resistividade do material do enrolamento, normalmente cobre; $J_b \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ é a densidade de corrente pela seção de uma espira. $K\pi_s \triangleq J_b \cdot A_i \left[m \frac{A^2}{m^3} \right]$ é definido como capa de corrente. $\alpha_{CS} = \frac{\rho_b}{\alpha_k}$ é o fator de proporcionalidade que transforma a capa de corrente em elevação

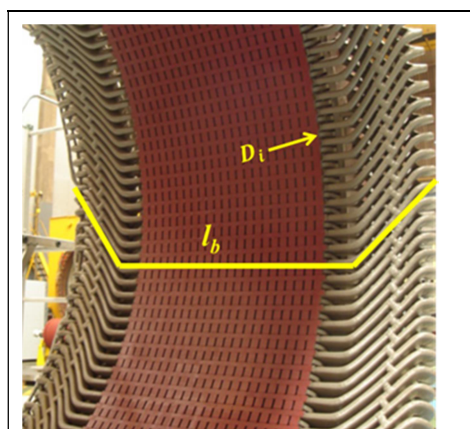


Figura 1 – Superfície de dissipação de calor do enrolamento do estator

de temperatura. Depende da natureza do material ρ_b e da efetividade troca térmica superficial α_k .

2.3 Aplicação dos parâmetros fundamentais ao dimensionamento eletromagnético de máquinas síncronas

A identidade construtiva descrita em (5) junto com a (7) associada ao aquecimento do estator dependente da capa de corrente muito possivelmente até a década de 1960 forneciam os parâmetros fundamentais de projeto. Com apoio da (5) se colecionaram dimensões e parâmetros de projetos bem-sucedidos como os ilustrados na Tabela 1. Assim, a partir do índice do gerador ($I_g = S_r/n_r$), ou energia na forma de torque, é possível identificar $C = F_u$.

As restrições mecânicas impostas pela velocidade periférica definem o valor de D_i que, conforme (7), é conveniente que seja o maior possível. Logo, junto com o valor orientativo de C podemos obter o valor inicial de l_c . Dentro desse arcabouço, considerando que B_{emax} amplitude do campo magnético estará sempre próximo de 1 T, então da A_i intensidade linear de corrente, podemos obter um número de ranhuras para igualar com F_u . Todavia, há uma restrição imposta pela necessidade de satisfazer o critério da capa de corrente imposta pela máquina de referência. Quando a condição $C = F_u$ é satisfeita, diz-se que a energia eletromagnética pode ser contida dentro do volume do gerador e, se e somente se $C = F_u$ for atendida, então pode se passar a cuidar dos demais detalhes de projeto.

Tipo de máquina Hidrogerador	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar e H ₂ O	Ar e H ₂ O	Ar e H ₂ O	Ar e H ₂ O
	Tucuruí	Grand Coulee Westinghouse	Guri II	Long Tan	Xiangjiaba	Belo Monte	Wudongde	Grand Coulee GE	Itaipu 60 Hz	Itaipu 50 Hz	Three Gorges
Ano	1978	1975	1976	2002	2008	2011	2014	1980	1986	1985	1997
Enrolamento estator	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	H ₂ O direto	H ₂ O direto	H ₂ O direto	H ₂ O direto
Núcleo do estator	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto
Rotor	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto	Ar direto
S [MVA]	390	615.4	700	777.7	888.9	679	944.5	825.641	737	823.6	840
Ur [kV]	13.8	15	18	18	23	18	22	15	18	18	20
Ir [A]	16316	23687	22453	24945	22313	21779	24787	31779	23639	26417	24249
a	8	10	8	8	7	7	8	6	6	6	5
2 Ir/a	4079	4737	5613	6236	6375	6223	6197	10593	7880	8806	9699
rpm	81.82	72	112.5	107.1	71.43	112.5	93.75	85.71	92.3	90.9	75
Polos	88	100	64	56	84	64	64	84	78	66	80
Lc [mm]	2100	3480	3800	3300	3490	2406	3120	2140	3260	3500	3130
Di [mm]	16200	18308	13650	15000	19000	18000	17850	18808	16000	16000	18500
C [kVA/m ³ rpm]	8.65	7.33	8.79	9.78	9.88	7.74	10.13	12.73	9.57	10.11	10.46
Ns	864	750	552	624	756	756	768	540	504	504	510
Ai [A/mm]	69.2	61.8	72.3	82.6	80.7	83.2	84.9	96.8	79.0	88.3	85.1
Jb [A/mm ²]	4.33	2.83	2.92	3.25	2.92	3.42	3.11	6	5.65	5.61	5.62
$\mathcal{K}\pi_s$ [A ² /mm ³]	299.8	174.8	211.0	268.4	235.8	284.5	263.9	580.9	446.4	495.3	478.3

Começamos avaliando o gerador de Grand Coulee fabricado pela Westinghouse. Embora tenha entrado em funcionamento em 1975, a sua concepção deve ter acontecido pelo menos 5 anos antes. Nesse momento histórico não existia no planeta um gerador próximo para servir de referência. Tudo o que se tinha era indicativo de que a intensidade linear de corrente deveria ser próxima de 60 A/mm e que a densidade de corrente $J_b \leq 3 \text{ A/mm}^2$ de modo que a capa de corrente $\kappa\pi_s \leq 200 \text{ A}^2/\text{mm}^3$. Ainda, se considerarmos que para a década de 1970 a indução no entreferro $B_{emax} \leq 0,95T$, então poderia se esperar um fator de utilização perto $F_u = C \leq 9,5 \text{ kVA}/(\text{m}^3 \cdot \text{rpm})$. Assim, podemos concluir:

- O gerador está “folgado” pois apresenta $C = 7,33$ quando esse valor poderia estar mais próximo de 9,5;
- Embora a intensidade linear de corrente $A_i = 61,8$ seja um pouco ousada para o momento;
- A densidade de corrente $J_b = 2,83$ se apresenta como prudente para conseguir uma capa de corrente $\kappa\pi_s = 175$ com características conservativas, pois esse valor poderia chegar a 200.

Em suma, embora tenham estudado a ventilação do gerador num protótipo em escala, isso não foi suficiente para otimizar as dimensões da máquina. Os calculistas da época preferiram usar de prudência diante do salto tecnológico que significava pular de 300 MVA para 600 MVA.

Contemporaneamente, na Venezuela entrou em operação a Central Hidrelétrica de Guri II, um feito transcendente, com 10 unidades de 700 MVA (60K) / 805 MVA (80K) construídas pela Siemens em cooperação com fabricantes japoneses. Avaliando os mesmos índices construtivos (C ; A_i ; J_b e $\kappa\pi_s$), pode-se afirmar que foi um grande feito para sua época. Com a mesma rotação de Belo Monte e Wudongde, a máquina apresenta uma agressiva $\kappa\pi_s > 200 A^2/mm^3$ e um C muito audacioso para esse momento histórico em que o cálculo do aquecimento por computador estava nos seus primórdios.

Por sua vez, a GE, para o mesmo empreendimento de Grand Coulee, preferiu buscar amparo em uma solução inédita para hidrogeradores, porém segura (derivada dos grandes turbo-geradores), que foi resfriar o enrolamento estatórico diretamente com água. Essa decisão permitiria um salto tecnológico muito ousado, pular de 300 MVA para 826 MVA.

Em geradores com enrolamento estatórico diretamente resfriado com água, a densidade de corrente J_b pode muito bem orbitar a casa dos $6 A/mm^2$ e a intensidade linear de corrente pode chegar à casa dos $100 A/mm$. Logo, considerando uma indução de $0,95T$ típica à época e um fator de enrolamento $k_w \approx 0,9152$. Idealmente, poder-se-ia esperar $F_u = C \leq 15,5 kVA/(m^3 \cdot rpm)$.

Sobre esses termos, o gerador da GE apresentou um $C = 12,73$ mostrando que ainda se teria algum espaço para otimizar a máquina, visto que esse parâmetro poderia estar orbitando a casa dos 15,5. No entanto, o valor praticado para a capa de corrente $\kappa\pi_s = 581$ muito próximo de 600 mostra uma atitude ousada para sua época. O impacto nas dimensões de ambas as soluções, GE e Westinghouse, podem ser comparadas nos esboços em escala ilustrados na Figura 2.

Na sequência, vieram os geradores de Itaipu, ocasião em que, a pesar de Guri II, parecia ser a solução natural optar por enrolamento estatórico resfriado com água e, quase uma década depois, a China resolve trilhar em Three Gorges a senda estreita legada pela GE, BBC e Siemens, e construir geradores com enrolamento estatórico resfriado diretamente com água. Merece ser destacado que 5 anos depois de Three Gorges, em 2002 entra em operação os geradores de LongTan, com 777,7 MVA totalmente resfriados com ar! Podemos até rotulá-lo de ser o 1º gerador do século XXI a ser totalmente calculado com um acoplamento das redes de ventilação com as de aquecimento, oferecendo um domínio sem precedente sobre as garantias de aquecimento. Certamente, que esse advento tecnológico propiciado pelo CFD –Computational Fluid Dynamics- trouxe consigo uma quebra de paradigmas: a) a intensidade linear de corrente não precisa ser mais limitada em $60 A/mm$. Desse projeto em diante, esse valor poderá orbitar entre 80 e $85 A/mm$; b) a densidade de corrente na barra Roebel poderá assumir valores superiores a $3 A/mm^2$ desde que a capa de corrente não passe os $300 A^2/mm^3$. Naturalmente, conforme se observa na Tabela 1, à medida que a potência nominal cresce, a definição da capa de corrente demanda de usar muita prudência para oferecer garantias de elevação de temperatura e, por que não, para garantir o rendimento ofertado.

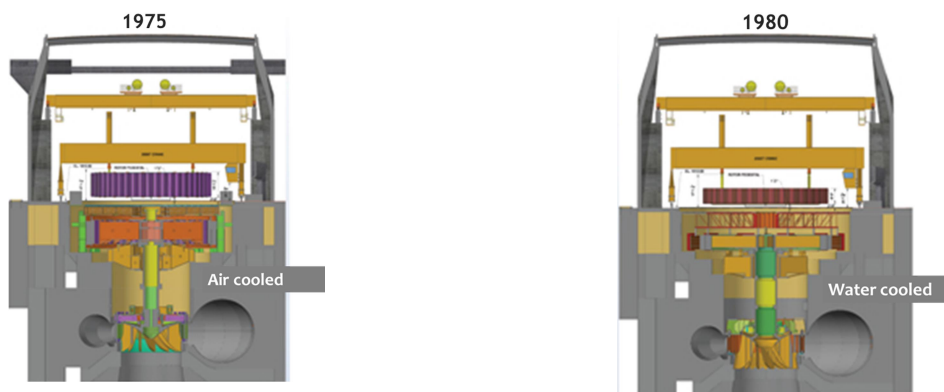


Figura 2 – Geradores de Grand Coulee, soluções com enrolamentos resfriados com ar e água

3.0 - TECNOLOGIA DE GERADORES DE GRANDE POTÊNCIA

Tudo indica que a década de 1970 foi o grande marco em que começou a perspectiva de se construir centrais hidrelétricas abrigando unidades com cada vez maior capacidade de gerar energia. Foi o caso da central hidrelétrica de Grand Coulee II, originalmente planejada para abrigar unidades de 300 MW, por uma decisão estratégica passou para unidades com mais de o dobro de capacidade por unidade. Os resultados alcançados confirmaram as expectativas: usinas hidrelétricas construídas com a maior capacidade possível por unidade resultam em um kW instalado mais econômico.

Embora, nesse processo, a opção por geradores com enrolamento estático resfriado com água tenha sido a opção inicial, como veremos, o empenho por soluções com maior índice de confiabilidade e, por consequência, com maior índice de disponibilidade, levou a vanguarda de projetistas de geradores a desenvolver unidades de grande porte totalmente resfriadas com ar em apenas 5 anos depois de entrar em operação a última unidade de “Three Gorges”.

3.1 Geradores com enrolamento estático resfriados com água

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, com potência instalada de 14.000 MW, ocupa posição estratégica nos sistemas elétricos brasileiro e paraguaio, e respondeu no ano de 2018 pelo abastecimento de 20% da energia consumida no Brasil e 94% do consumo paraguaio. A Itaipu Binacional vem constantemente aprimorando seus processos de operação e manutenção para garantir elevados índices de disponibilidade das unidades geradoras. Nos últimos 6 anos este índices estiveram sempre acima de 96%, e em 2017 e 2018 ultrapassaram os 97%, registrando-se 97,10% e 97,16% respectivamente. Este fato, associado à eficácia operacional, proporcionou a verdadeira “dança das águas” possibilitando excelentes números de produção, com rendimentos energéticos de 98,09% e 99,30% respectivamente.

Nesse contexto de consequente superação de suas marcas de geração anual, foram levantadas em Itaipu as ocorrências com necessidade de reparo e manutenção corretiva entre 2006 e 2016 [6], período em que podemos considerar que as unidades já estejam na sua maturidade operacional, as quais são brevemente descritas abaixo:

- i. Vazamento de água pura causado por um parafuso alojado entre barras inferiores no lado acoplado do estator.
- ii. Vazamento de água pura causado por um parafuso alojado entre uma barra inferior e o anel de curto.
- iii. Vazamento de água pura em um condutor oco de uma barra inferior, próximo à câmara hidráulica, lado não acoplado do estator.
- iv. Vazamento de água pura em um condutor oco de uma barra inferior, lado não acoplado do estator (lado superior).
- v. Vazamento de água pura em uma barra inferior, próxima à câmara hidráulica, lado não acoplado do estator (lado superior).
- vi. Vazamento de água pura na câmara hidráulica inferior de uma barra superior na ranhura 34, lado acoplado do estator (lado inferior).

Esse cenário é coerente com a “pesquisa de falhas em hidrogeradores” elaborada pelo WG A1.10 do CIGRE [6]. Nas constatações dessa brochura técnica, as falhas associadas a isolamento respondem por 43% do total das falhas. Sendo que nas unidades resfriadas com água, o sistema de resfriamento com água foi a principal causada falhas.

Se tomarmos o universo de falhas de uma década, todas atribuídas ao circuito de água do enrolamento, 33% das mesmas podem ser atribuídas a causas mecânicas externas. Todavia, 67% dessas contingências são totalmente atribuíveis ao próprio sistema de resfriamento com água, condição essa que poderia muito bem ter sido evitada se o gerador fosse totalmente resfriado com ar.

3.2 Consolidação da tecnologia de geradores de grande potência totalmente resfriados com ar

A condição atual de sermos capazes de construir hidrogeradores totalmente resfriados a ar, cuja capacidade individual supera 1,00 GVA, é resultado de um processo evolutivo de consolidação tecnológica, ameadado por uma contribuição intercultural, entre os que o Brasil tem um quinhão muito importante.

Esses mais de 120 anos de empenho em dominar a energia elétrica e pô-la ao serviço da humanidade podem ser divididos, conforme a Figura 3, em 3 grandes períodos ou eras. Ao discernimento dessas eras seguiram marcos impactantes na tecnologia de concepção de hidrogeradores, conforme descrito a seguir:

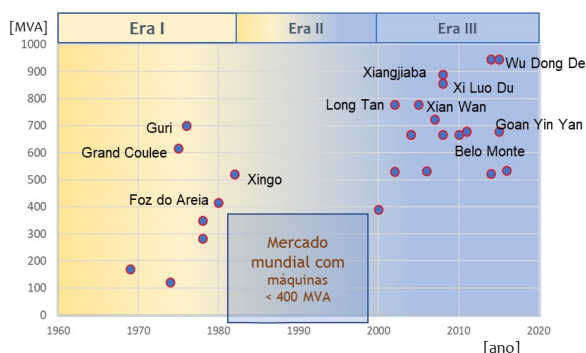


Figura 3 –Evolução tecnológica dos hidrogeradores

3.2.1 Era I – até 1980: consolidação do cálculo analítico multidisciplinar das unidades geradoras

Sem dúvida alguma, a grande contribuição do início do século XX foi o domínio da técnica de soldar com eletrodo de arco revestido [7]. Junto com o aprimoramento da produção de chapas de aço cada vez mais finas,

essa técnica permitiu a construção de estruturas cada vez mais complexas, tais como estatores, cruzetas e aranhas.

Após a descoberta das correntes parasitas por Jean Bernard Léon Foucault em 1855 e a introdução da lei da histerese por Charles Proteus Steinmetz 1892, a construção dos núcleos das máquinas elétricas passaram por uma transformação radical, passando dos núcleos fundidos para os laminados. Assim, por volta de 1903 foram introduzidas as primeiras chapas de aço-silício laminadas a quente com 3,75 W/kg a 1T e 60 Hz. Hoje podemos contar com chapas de aço-silício de grão não orientado, laminadas a frio, com perda de 1,2 W/kg medidas nas mesmas condições.

Discreta, porém de grande importância, a tecnologia de ventilação evoluiu junto com a ciência de aeronavegação no desenvolvimento de ventiladores radiais e axiais. No entanto, a prática conhecida como *rotor rim ventilation system* adquire relevância à medida que os hidrogeradores crescem em diâmetro[8].

Os sistemas de isolamento do enrolamento do estator a base de asfalto-classe B, a partir de 1960 evoluem para os contendo polímeros para se consolidar nos sistemas a base de epóxi-poliéster-classe 155 (IEC) / F(IEEE), passando de 0,75 kV/mm para 3,0 kV/mm de rigidez dielétrica em hidrogeradores.

A tecnologia de mancais, tanto de guia como os de escora, nesses 80 primeiros anos, exibem uma evolução sem precedentes; saindo dos mancais de casquilho, os mancais de guia adquirem o conceito de segmentos pivotantes.

O domínio do conceito e controle da cunha hidrodinâmica do filme de óleo promove inovações nos mancais de escora. E os segmentos de escora de dupla camada são uma tendência conceitual preferida para grandes geradores. Conforme Figura 4, o colchão de molas helicoidais proporciona uma melhor distribuição das cargas por cm^2 , além de melhorar o seu resfriamento.

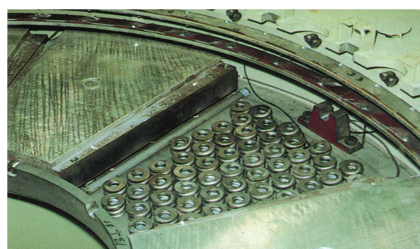


Figura 4 – mancal de escora de dupla camada e molas helicoidais

Se em 1905 A. B. Field nos lega o primeiro tratado sobre a circulação de correntes nos enrolamentos estatóricos que, imediatamente depois, culmina com o conceito de transposição natural das bobinas de múltiplas espiras; temos que 1912, como fruto dessa semente, surge o conceito de transposição interna, coroada pela patente da barra Roebel, que permite o manejo de elevadas quantidades de corrente por espira, de até 7000 A na atualidade, de modo que a barra Roebel se consolida como a solução natural para geradores com potência superior a 50MVA e está presente inclusive no gerador de 1 GW.

Por sua vez, o conceito do cálculo estrutural do gerador passa por uma mudança de paradigmas. Assim, as estruturas rígidas adquirem um caráter flexível, aliviando o peso de todos os componentes. Por exemplo, o conceito original da carcaça do estator, rígido por conceito, oferecia uma expansão radial como único grau de liberdade e era guiado por pinos radiais. No conceito de carcaça flexível, as longarinas estruturais axiais que uma vez eram radiais, agora oblíquas ao raio e são estendidas para baixo, a título de molas oblíquas, oferecendo dois graus de liberdade: radial e tangencial.

Esse mesmo conceito foi estendido, tanto para as cruzetas como para a aranha. O resultado desse conjunto permite praticar um entreferro mais uniforme em todas as condições operacionais e, durante os transitórios, mitigam os torques de origem eletromagnética antes de os transmitir às fundações.

Pode-se afirmar que todos esses aspectos do cálculo dimensional sejam eles elétricos, magnéticos, térmicos ou mecânicos eram fundamentados sobre bases analíticas rigidamente conduzidas, em sua grande parte, em teses de doutoramento.

3.2.2 Era II – de 1980 até 2000: advento da era computacional e corte a LASER

No início da década de 1980 os computadores de grande porte, os famosos *main frames*, encontram espaço na indústria de hidrogeradores, abrindo todo um universo novo de possibilidades, como a consolidação do método dos elementos finitos, seja aplicado ao cálculo estrutural mecânico, ou seja à solução de problemas eletromagnéticos. A solução de problemas numéricos não lineares sob a forma de variáveis de estado, agora é uma realidade, com aplicação principal na solução de malhas de ventilação.

Assim, a década de 1980 marca uma época de transformar as “marchas de cálculo” em programas computacionais. Ainda mais, a possibilidade de acoplar soluções elétricas com as magnéticas, e juntas, acoplá-las ao cálculo estrutural mecânico é uma possibilidade muito almejada e que se tornará realidade menos de 10 anos depois. Em consequência, o profissional de cálculo elétrico de geradores adquire uma condição eclética com domínio multidisciplinar para poder operar conscientemente programas tão sofisticados.

Por volta do ano 2000, as máquinas de corte a LASER encontram seu espaço na indústria abrindo um universo novo de possibilidades. Por exemplo, não haveria mais necessidade de fabricar estampas para diversas

posições, a máquina LASER tem capacidade de produzir tantas posições quantas sejam necessárias para construir uma peça composta mais sofisticada, como é o caso da coroa magnética do rotor com dutos radiais de ventilação. Todavia, talvez a grande virtude do corte a LASER seja a de permitir o uso de chapas com maior resistência mecânica, antes limitada pelo estampo a no máximo a 450 MPa, agora se transformou numa realidade cotidiana trabalhar com chapas de 6mm de espessura com padrões de 600 a 800 MPa. Na atualidade, tanto as chapas do núcleo dos polos como as do segmentos da coroa magnética podem ser em sua totalidade cortadas a LASER.

Por volta de 1980, tanto proprietários como fabricantes ainda mantinham reservas quanto a realizar empilhamentos contínuos na obra, sejam de núcleos estatórios, ou sejam de coroas magnéticas do rotor. É justo comentar que esse movimento começou uns dez anos antes, em que o trabalho realizado na UHE Ilha Solteira pode ser citado como um dos grandes pioneiros no Brasil. Contudo, a consolidação do empilhamento na obra ocorre na década de 1980; tudo indica que os geradores de Itaipu são a grande coroação desse processo.

Más para o fim do século XX surgem as primeiras notícias do CFD; como toda inovação numérica, o seu começo foi cheio de visões de um espectro nunca pensado de possibilidades no universo da mecânica dos fluidos. No entanto a sua consolidação ainda demoraria mais de uma década para resolver problemas complexos. Esses resultados somente seriam desfrutados no início do século XXI com pequenos trunfos na análise de singularidades e que abririam espaço para futuros desafios.

3.2.3 Era III – de 2000 até o presente: advento da era computacional intensiva, polímeros e corte a LASER

Definitivamente esta terceira era se caracteriza pelo uso intensivo de recursos computacionais, pela consolidação dos polímeros e elastômeros visco-elásticos como materiais cotidianos e pelo corte de metais por LASER.

Decididamente as *workstations* tomam conta da indústria, a capacidade computacional individual é uma realidade e, para dar conta de processamentos intensivos de dados como os requeridos pelo CFD, surgem os clusters. Essa nova opção, de num ambiente virtual observar a mecânica dos fluidos, permitiu reavaliar conceitos associados a singularidades de perda de carga que, antes, unicamente eram possíveis de serem observados em laboratórios sofisticados e limitados ao próprio processo de observação e análise. Assim, o CFD se transforma numa plataforma de apreciação e validação de circuitos de ventilação e resfriamento de geradores.

Nesse contexto, tanto malhas de ventilação como malhas de aquecimento agora podem ser virtualmente acopladas e, o que é mais admirável, parece não haver limitação para o número de nós. Talvez a penalização maior seja esperar alguns segundos a mais para se obter uma imagem térmica mais detalhada do gerador. Não há mais necessidade de se agrupar canais de ventilação em grupos paralelos; agora é possível estudar o fluxo de ar em cada duto associado à sua capacidade de resfriamento. Detalhar as cabeças de bobina e os fechamentos dos circuitos em forma de barramentos circulares encontra apenas limitação na capacidade de detalhar geometricamente cada região.

Sem dúvida alguma, a grande contribuição para a arte de conceber hidrogeradores foi a capacidade de calcular os circuitos de circulação de ar e o conseqüente aquecimento dos seus componentes, associada a uma precisão sem precedentes. Hoje é possível prever aquecimentos do enrolamento do estator e das bobinas polares com erro inferior a 5 K, limitado pela capacidade fabril de tornar realidade o objeto de simulação computacional.

O dimensionamento magnético do circuito percorrido pelas linhas de fluxo também tem se beneficiado; há uma tendência global a associar procedimentos analíticos com resultados provenientes do FEM altamente confiáveis. A condição magnetostática evolui para permitir estudar computacionalmente o comportamento do gerador com o rotor em movimento de regime permanente. Mais recentemente, encontramos simulações de regimes transitórios totalmente simulados num ambiente virtual modelado por elementos finitos 3D.

A saga da tecnologia de polímeros iniciada ao final da segunda guerra mundial, neste século XXI, abre um universo de possibilidades sem precedentes e a sua influência na tecnologia de hidrogeradores tem substituído paradigmas, criando outros, mais robustos, e alguns que ainda estamos assimilando os seus benefícios. Esse é o caso da substituição dos revestimentos de liga de metal branco conhecidos como Babbit por novos a base de polímeros. Esse conceito tecnológico de revestir os segmentos dos mancais introduzido em 1839 por Issac Babbit, manteve-se imbatível até 1978 quando na UST-ILIM, a 9ª maior central hidrelétrica da Rússia, com 18 unidades de 238 MVA, adotaram mancais de escora revestidos com PTFE-politetrafluoretileno, polímero conhecido como Teflon® de DuPont. Seguiram-se outras, como a da estação reversível de Zagork, também na Rússia, com 6 unidades de 236 MVA, empuxo axial de 1460 toneladas e 1200 partidas anuais; a da estação reversível de Tadjikistan com 9x353MVA e empuxo axial de 1720 toneladas; para citar as mais emblemáticas.

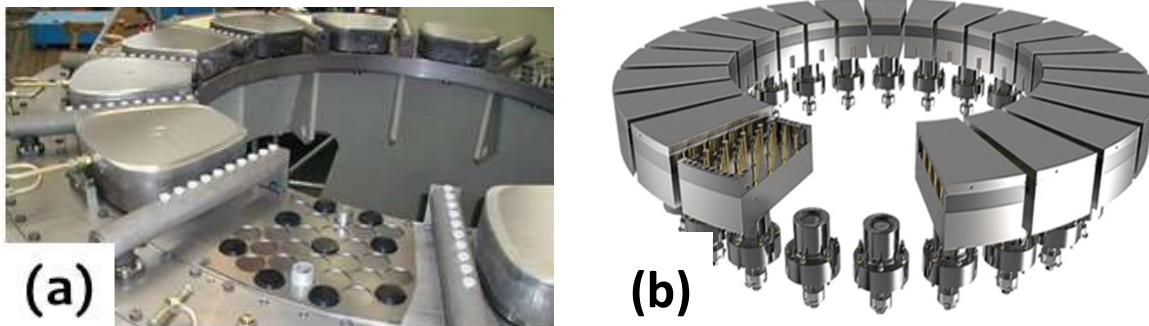


Figura 5 - Soluções para mancal de escora (a) segmentos de escora sobre colchão de molas visco-elásticas; e (b) segmento de dupla camada com pinos elásticos.

Tudo indica que as primeiras aplicações nas Américas ocorreram na virada de 1999 para 2000, com aplicações tímidas, principalmente em pequenos trabalhos de retrofit. No ocidente, temos observado com cautela a evolução dessa nova tecnologia e os grandes fabricantes: Andritz; GE; Voith e outros menores, tem aderido a essa nova tecnologia com as suas próprias contribuições. Na atualidade, o revestimento do mancal de escora com polímeros tem se apresentado com novas formulações: FEP, MFA, PFA, ETFE e PEEK. Todos eles despertaram interesse dos fabricantes devido ao seu baixo coeficiente de atrito, elevadas taxas de resistência/peso, facilidade de fabricação, baixa taxa de desgaste e, principalmente, porque é possível introduzir cargas na formulação que melhoram as suas propriedades térmicas e mecânicas. Por tudo isso, não é surpreendente que os fabricantes ainda estão à procura do polímero ideal para substituir o tradicional metal branco de Babbitt, embora se encontrem alegações de alguns fabricantes que já obtiveram a sua formulação ótima. Independente do fabricante ou país, a aplicação dos polímeros em mancais de escora ou guia é uma realidade irreversível.



Figura 6 – Conceito de mancal de guia com sistema *autopumping* embarcado

Em todo caso, a tecnologia de mancais de escora, independente do revestimento, parece ter se consolidado na forma de segmentos que descansam sobre colchão de molas. Como pode ser apreciado na Figura 5, as molas podem ser visco-elásticas ou pinos elásticos. Note-se a robustez dos segmentos de escora e o sistema de lubrificação com direcionamento dedicado de óleo na tecnologia associada a elementos visco-elásticos, Figura 5(a). Já na tecnologia segmentos de escora de dupla camada, as molas do tipo helicoidal (Figura 4) evoluíram para pinos com coeficiente de elasticidade definida pela geometria e liga do metal. A solução dupla camada possibilita o resfriamento do segmento superior e, o fato de ele descansar sobre um distribuição de pinos elásticos, permite controlar a sua deformação. Nessa estrutura, o segmento inferior age como uma base pivotante que contribui para o controle da formação da cunha hidrodinâmica do filme de óleo.

Por sua vez, o conceito de *autopumping* incorporado aos mancais de guia se tornou uma tecnologia consolidada e adotada, com algumas variações, por todos os grandes fabricantes. Nessa solução, o excedente de pressão da cunha hidrodinâmica é canalizado para um circuito fazendo com que o óleo, antes de retornar, passe pelos trocadores de calor óleo-água. Esse conceito, ilustrado na Figura 6, está tão otimizado que consegue fazer circular o óleo dos mancais combinados guia-escora.

Para coroar esse apogeu tecnológico, temos a grande contribuição dos sistemas de instrumentação e monitoramento. A tecnologia a LASER, junto com o das fibras óticas, contribuiu para os sistemas de medição distribuída de temperatura (já utilizados em turbogeradores) e pirômetros de alta velocidade que permitem fazer uma varredura distribuída da temperatura das bobinas de campo. Contamos com TC's e TP's em fibra ótica e LASER imunes à saturação e a influência dos campos eletromagnéticos. *Straingauges*, detectores de vibrações numa variedade e precisão sem precedentes. E o que é mais fascinante, todos eles podem ser digitalizados e

preprocessados localmente, para serem transmitidos por redes de fibra ótica numa velocidade de aquisição de dados extraordinária.

4.0 - CONCLUSÃO

Apresentou-se uma visão do processo evolutivo da tecnologia associada à construção de hidrogeradores com o propósito de destacar os desafios que tiveram que ser superados nesses mais de 130 anos investidos para superar a marca de construir geradores superiores a 1GVA.

Resgatou-se os conceitos de coeficiente de aproveitamento e capa de corrente para melhor apreciar os saltos tecnológicos emblemáticos; principalmente, entender os motivos que nos levaram a, temporariamente, construir hidrogeradores com enrolamentos estatóricos resfriados diretamente com água.

Com o mesmo ímpeto, relatamos brevemente a evolução dos sistemas de isolamento e a sua consolidação na forma de compósitos de mica, fibra de vidro e polímeros (epóxi-poliéster). Dedicamos atenção a descrever os elementos tecnológicos que, beneficiados pela tecnologia computacional, nos permitiram consolidar os programas de cálculo de ventilação e aquecimento.

Finalmente, pinçamos elementos associados à tecnologia de mancais, com ênfase nos de escora e a tendência mundial de substituir o metal branco de Babbitt por polímeros. Brevemente, realçamos os avanços na tecnologia de instrumentação e monitoramento que permitem obter validações de campo com tanta efetividade que promovem a confiança dos cientistas de vanguarda na tecnologia de hidrogeradores.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Neidhöfer, "The Evolution of the Synchronous Machine," *Engineering Science and Educational Journal*, pp. 239 - 248, October 1992.
- [2] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. [Acesso em janeiro 2019].
- [3] V. A. Moore, "Experience with large hydro-generators at Grand Coulee," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No 10, pp. 3265 - 3270, Outubro 1983.
- [4] F. J. Horn e P. S. Johrde, "Electrical and mechanical design features of the 615 MVA generators for Grand Coulee dam," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-94, no. 6, pp. 2015 - 2022, November/December 1975.
- [5] CIGRE WG A1.42, "Influence of key requirements to optimize the value of hydro generators," CEIGE, Paris, (to be published 2019).
- [6] A. L. Ortiz T., "Geatão do projeto - Reparo do estator de unidades geradoras da Itaipu Binacional," Monografia - Especialização em Engenharia de Confiabilidade - Universidade Tecnológica do Parana, Foz do Iguaçu, 2017.
- [7] W. A. CIGRE, *TB 392 SURVEY OF HYDROGENERATOR FAILURES*, October 2009.
- [8] E. BRASIL, *Um século de desenvolvimento em soldagem e corte*, Contagem MG Brasil, Abril 2005.
- [9] G. Floyd e H. Sills, "The Evolution of the Modern Waterwheel Generator in Canada," *Transactions AIEE Part III: Power Apparatus and Systems*, pp. 6 - 16, April 1958.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

J. Johnny Rocha E. Nasceu em Cochabamba, Bolívia, 1959.



Engo. Eletricista pela PUC/RS em 1982; Me. Eng. Elétrica pela UFSC em 1985; Dr. em Sist. de Potência pela USP em 1996; MBA pela FGV em 2005 e Post Doc. na UNIFEI em 2018.

Como Prof. Universitário, trabalhou na PUC/RS e na UnB até 1990. Desde então, tem se dedicado ao desenvolvimento teórico e prático de máquinas elétricas rotativas, com ênfase em hidrogeradores. Nesse âmbito, trabalhou para as grandes empresas do ramo: ABB; Siemens; Alstom e General Electric. Desde 2018 se encontra à frente da Trassinio Consultoria.

IEEE SM; CIGRE SC A1 Expert.