



Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

ANÁLISE MULTIFÍSICA EM REGIME PERMANENTE DA BARRA DE ESTATOR APLICANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

**JOSÉ WILLIAM RIBEIRO BORGES(1); WELLINGTON DA SILVA FONSECA(1); FERNANDO DE SOUZA BRASIL(2);
UFPA(1); ELN(2);**

RESUMO

A isolamento elétrica é uma das principais causas de falhas em hidrogeradores, sendo assim é necessário realizar uma pesquisa acerca do sistema de isolamento da barra de estator. Portanto, o objetivo do informe é desenvolver a análise multifísica da barra de estator utilizando o Método de Elementos Finitos para verificar o comportamento elétrico, magnético e térmico em regime permanente. Dessa forma, é possível analisar aspectos relacionados à capacitância, estresses mecânicos e efeitos de temperatura, comparando, quando disponíveis, os dados obtidos via simulação com dados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE

Barra de estator, Método de Elementos Finitos, Análise multifísica, Hidrogerador

1.0 - INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas são responsáveis por produzir 60,7% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2019). Assim sendo, o hidrogerador é um equipamento vital para o Sistema Elétrico de Potência (SEP), por isso é necessário que operem dentro dos parâmetros de qualidade e estabilidade na geração de energia elétrica. Para alcançar níveis adequados de operação, é imprescindível conhecer os principais fatores que implicam em falhas nesses equipamentos.

As falhas em hidrogeradores possuem origens diversificadas podendo ser divididas em: térmicas, mecânicas, isolamento e mancal de rolamento. Dessa forma, observa-se que o isolamento é a principal causa de defeitos, equivalendo a metade dos eventos registrados, ver Figura 1 (CIGRÉ, 2009).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

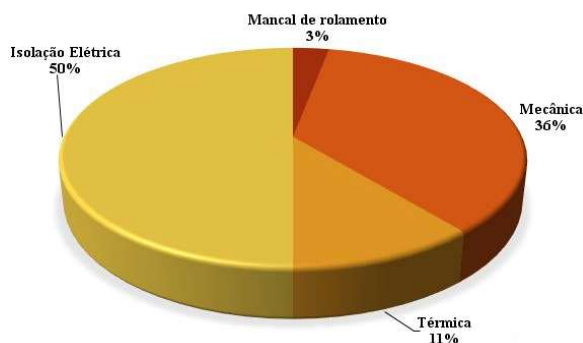


FIGURA 1 - Principais causas de falhas em hidrogeradores

Devido à quantidade de incidentes dessa natureza, verificou-se as diferentes raízes dos problemas no isolamento. Assim, constatou-se que 75% dos problemas na isolamento dos geradores são atrelados ao envelhecimento, ciclo térmico, sobrecarga e descargas parciais internas (BRASIL, 2013).

Atualmente, com a evolução da tecnologia de processamento de dados e o avanço das técnicas matemáticas, o emprego de softwares para a resolução de equações diferenciais obteve confiabilidade e aplicabilidade em inúmeras situações do Sistema Elétrico de Potência. Uma das principais técnicas matemáticas utilizadas é o Método de Elementos Finitos (MEF) que possibilita modelar equipamentos elétricos por meio de simulações numéricas solucionando as equações diferenciais que regem os fenômenos físicos (FONSECA *et al.*, 2018).

Portanto, o objetivo desse informe é apresentar uma análise multifísica da barra de estator utilizando o MEF de modo a verificar o comportamento elétrico, magnético e térmico em regime permanente. Esse informe é resultado de um trabalho contínuo com resultados iniciais apresentados em Borges *et al.* (2018).

No entanto, no presente trabalho, foi implementado um aperfeiçoamento no algoritmo para utilização da formulação harmônica de tempo com frequência fixa a partir do qual possibilitou-se verificar a variação de características elétricas e térmicas e analisar os estresses mecânicos da barra. Além disso, realizou-se a comparação de dados experimentais com a análise elétrica do equipamento.

2.0 - BARRA DE ESTATOR

O hidrogerador no qual o objeto de estudo está inserido possui as especificações listadas abaixo, ver Tabela 1. Além disso, a barra de estator é composta por duas bobinas isoladas entre si, sendo que cada uma dispõe de 2 colunas com 18 subcondutores que possuem sistema de isolamento próprio. Ademais, a modelagem realizada foi baseada em um equipamento de uma empresa geradora de energia elétrica do Norte do Brasil, ver Figura 2.

A isolamento da barra de estator é composta por uma componente de subcondutor e outra de aterramento. Nesse estudo, foi considerado um corte frontal da barra em sua região uniforme de modo que as fitas condutivas e semicondutivas não fazem parte do escopo desse informe.

TABELA 1 - Especificações do hidrogerador

Especificações	Valores
Potência nominal	12,5MVA
Tensão entre fases	6,9kV
Corrente nominal	1046A
Polos	32
Rotação	200rpm



FIGURA 2 – Bobina da barra de estator modelada

Assim sendo, a isolamento de subcondutor é responsável por proteger os condutores e diminuir a área de secção dos condutores, contribuindo para a diminuição dos efeitos peliculares (*skin effects*) que acarretam no decréscimo das perdas resistivas e correntes parasitas. Em caso de falha nesse isolamento, os condutores sob sinistro entram em curto-circuito implicando no aumento das perdas resistivas e, conseqüentemente, da temperatura. Entretanto, esse defeito não provoca diretamente a falha no hidrogerador (STONE *et al.*, 2004).

Por outro lado, a isolamento de aterramento é a principal componente de isolamento que separa os condutores do núcleo aterrado do estator (ISTAD *et al.*, 2011). Dessa forma, é necessário que essa isolamento possua espessura considerável devido às altas voltagens sob os condutores estão sujeitos. A falha nessa isolamento provoca a condução de corrente no estator, levando à falha na máquina (STONE *et al.*, 2004).

Ademais, as duas bobinas estão encaixadas na ranhura do estator e são separadas por um material isolante. Por fim, há uma cunha isolante que assegura a fixação dos condutores na estrutura de encaixe da ranhura. Assim, o modelo completo está ilustrado abaixo, ver Figura 3.

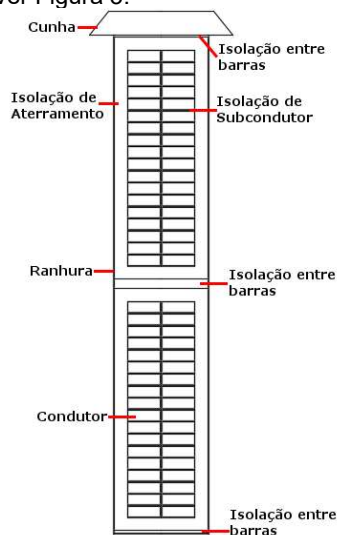


FIGURA 3 - Modelo da barra de estator utilizado

3.0 - MODELO MATEMÁTICO DA BARRA DE ESTATOR

Para análise da barra de estator, foi empregado um modelo bidimensional utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) utilizando o *software* livre FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) (MEEKER, 2018). Dessa forma, é possível obter o comportamento elétrico, magnético e térmico do equipamento em questão (BORGES *et al.*, 2018).

3.1 Modelo eletrostático

A análise eletrostática é baseada nas Equações de Maxwell na forma estática, considerando como parâmetros a densidade de carga (ρ) e a tensão (V) à qual a barra de estator está submetida. Assim, a formulação do problema eletrostático está apresentado abaixo, ver Equação 1 (BIANCHI, 2005).

$$-\epsilon \nabla^2 V = \rho \quad (1)$$

A partir disso, é possível calcular a capacitância do modelo desenvolvido pela relação entre carga (Q) – obtida numericamente – e diferença de potencial entre o condutor e a ranhura. Dessa forma, considera-se a capacitância de todo o sistema de isolamento da barra de estator.

3.2 Modelo magnético

O modelo magnético baseia-se na formulação harmônica de tempo com frequência fixa (60Hz). Essa formulação considera a indução de correntes parasitas para materiais com condutividade elétrica (σ) diferente de zero. Além disso, os materiais utilizados no estudo são considerados lineares, isto é, permeabilidade elétrica (μ) constante em todo domínio. Nesse sentido, o MEF soluciona a equação em termos do potencial magnético (A), ver Equação 2 (MEEKER, 2018).

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + J_{src} - \sigma \nabla V \quad (2)$$

Onde J_{src} é a corrente nominal aplicada no problema. Assim, é possível obter as perdas nos subcondutores de cobre que são inseridos como fonte de calor no modelo térmico (BASTOS *et al.*, 1997)

3.2 Modelo térmico

Para a análise térmica, considerou-se o problema de condução de calor transiente em passos de tempo. O comportamento desse fenômeno é descrito abaixo, ver Equação 3 (MEEKER, 2018).

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} - \nabla \cdot (k \nabla T) = q \quad (3)$$

Onde ρc_p é a capacidade volumétrica de calor, k é a condutividade térmica, T é a temperatura e q é a geração interna de calor por unidade de volume. Esse problema é solucionado em passos de tempo utilizando a discretização implícita do tempo de Euler, ver Equação 4 (MEEKER, 2018).

$$\rho c_p \left(\frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = q \quad (4)$$

A partir disso, é possível obter a condutividade elétrica do material considerando seu estado inicial e a constante de temperatura α , ver Equação 5.

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha) T} \quad (5)$$

4.0 - ACOPLAMENTO TÉRMICO-MAGNÉTICO

O acoplamento entre as simulações magnética e térmica foi desenvolvido utilizando o Console Lua que é parte do FEMM. Dessa forma, elaborou-se um algoritmo capaz de realizar as modelagens utilizando propriedades de

materiais e condições de contorno preestabelecidas com o intuito de analisar propriedades térmicas e magnéticas da barra de estator em regime permanente.

Nessa modelagem, considera-se a temperatura externa semelhante à do gerador em funcionamento. Do mesmo modo, a temperatura resultante da simulação modifica os valores de condutividade dos materiais, utilizando a constante de temperatura do cobre $\alpha=0,004$. Assim, esse valor atualizado é reinserido na simulação magnética analisando as características em regime permanente da barra durante 20 segundos. O processo descrito é apresentado no fluxograma abaixo, ver Figura 4. Nesse sentido, considerou-se a variação das características dos condutores de cobre, haja visto que as isolações possuem variação de resistividade irrelevante no contexto das temperatura utilizadas.

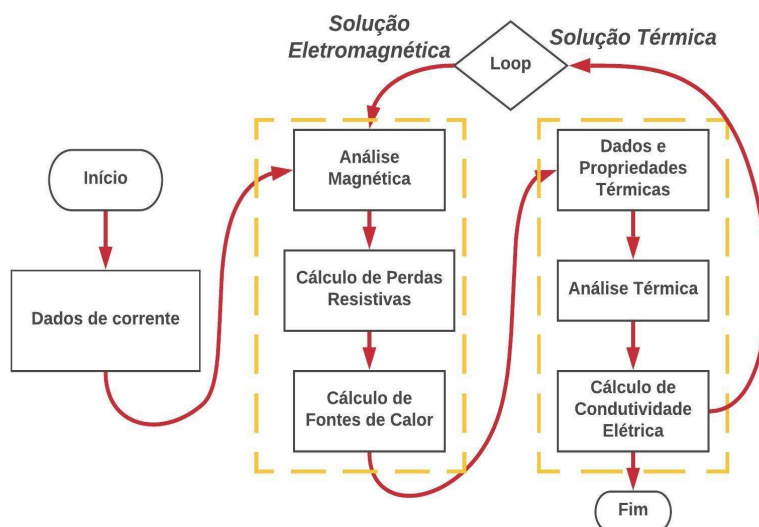


FIGURA 4 - Acoplamento térmico-magnético

5.0 - RESULTADOS

A análise desenvolvida considerou as condições normais de funcionamento da barra de estator em regime permanente com o intuito de verificar a variação de parâmetros do equipamento. Além disso, os efeitos do estator são desconsiderados nessa análise, isto é, a corrente nominal será aplicada no equipamento isoladamente.

5.1 Análise eletrostática

A análise eletrostática foi utilizada para avaliar o sistema de isolamento do modelo desenvolvido. Assim, aplicando a tensão nominal da barra (6,9kV), observa-se que o sistema de isolamento do equipamento é responsável pela queda de tensão na barra, reduzindo consideravelmente a tensão na ranhura, ver Figura 5.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

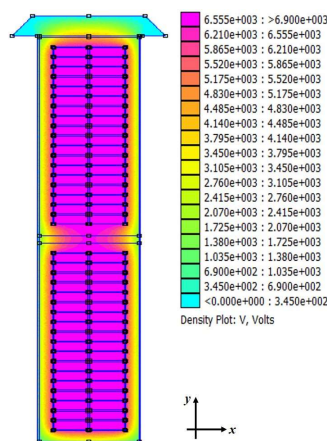


FIGURA 5 - Distribuição de tensão na barra de estator

Além disso, comparou-se os parâmetros obtidos na modelagem com os dados experimentais de capacitância. Os resultados foram avaliados relacionando a capacitância calculada no sistema de isolamento da barra. A capacitância observada na simulação utilizando o MEF foi aferida a partir de um segmento de reta paralelo ao eixo x. Esse segmento inicia-se na isolação de subcondutor terminando na ranhura.

A partir disso, foram desenvolvidas simulações implementando diversos valores de tensão elétrica para avaliar a modelagem numérica em relação a experimental. Assim, inseriu-se valores de tensão correspondentes a 20, 40, 60, 80 e 100% da tensão nominal da barra. O gráfico comparativo está apresentado abaixo, ver Figura 6, onde é possível verificar que o erro máximo relativo é de 11% entre o modelo desenvolvido e o experimental configurando uma simulação semelhante ao caso real.

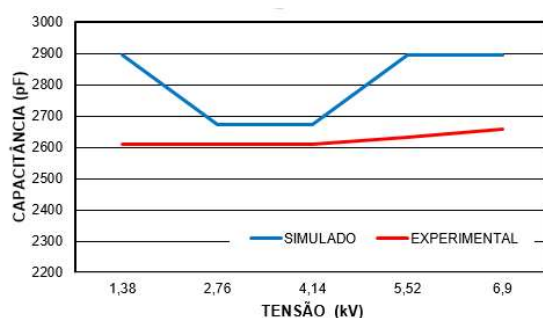


FIGURA 6 - Comparativo da capacitância no sistema de isolamento

5.1 Análise magnética

A análise magnética utiliza como parâmetro de entrada o valor de corrente nominal aplicado na barra de estator (1046A). Assim, é possível verificar o comportamento da condutividade elétrica nos condutores de cobre que é modificada no período analisado, ver Figura 7.

Nesse sentido, observa-se que a condutividade elétrica é diferente nas bobinas superior e inferior em decorrência do defasamento da corrente entre as bobinas. Além disso, verifica-se a diminuição dessa grandeza ao longo do tempo devido aos efeitos térmicos que está sujeito. Ademais, a diminuição na condutividade elétrica implica diretamente no aumento das perdas resistivas, ver Figura 8.

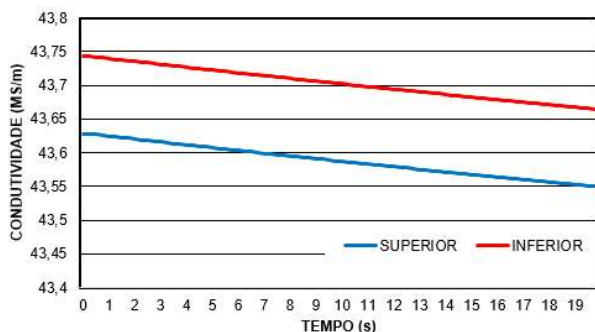


FIGURA 7 - Condutividade elétrica média nos condutores

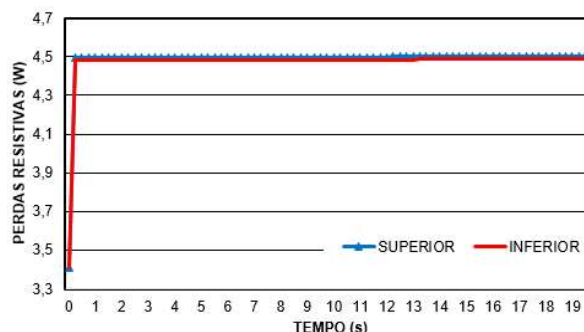


FIGURA 8 - Perdas resistivas nos condutores

O comportamento da densidade de fluxo magnético está ilustrado abaixo, ver Figura 9(a), onde observa-se que a isolamento de aterramento possui as maiores intensidades dessa grandeza. Dessa forma, é possível analisar a componente normal da densidade de fluxo magnético traçando um contorno paralelo ao eixo y na metade da isolamento de aterramento de ambas as bobinas, ver Figura 9(b). Nesse sentido, nota-se que as maiores intensidades estão presentes nas extremidades das bobinas.

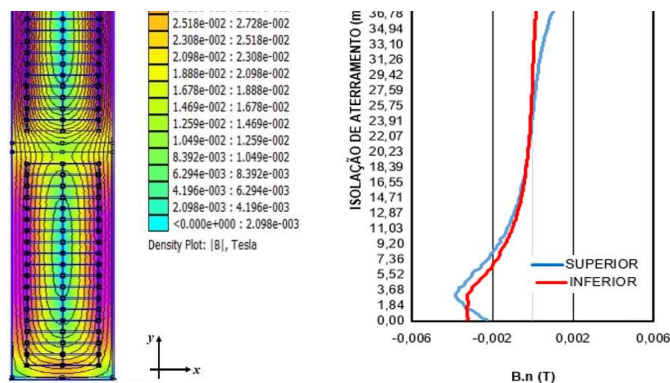


FIGURA 9 - (a) Distribuição de densidade de fluxo magnético;
(b) componente normal de B na isolamento de aterramento

Outro aspecto analisado foram os esforços mecânicos na barra de estator. As forças mecânicas, nesse caso, decorrem da Força de Lorentz que se originam a partir da interação da densidade de corrente com a densidade de fluxo magnético (FONSECA *et al.*, 2018). A componente normal da densidade de fluxo, ver Figura 10, foi considerada a partir de um contorno inserido paralelamente ao eixo y no centro do modelo.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

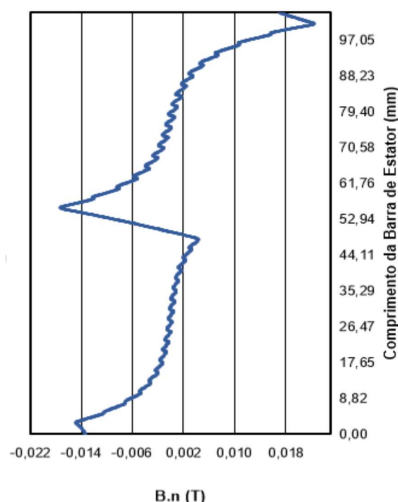


FIGURA 10 - Componente normal de B ao longo da barra de estator.

A partir dos dados obtidos numericamente, verificou-se que a força resultante na bobina superior ocorre predominantemente na direção y com módulo $-0,71\text{N}$ e na bobina inferior $1,532\text{N}$. Portanto, a força resultante no modelo equivale a $0,822$ na direção y provocando esforços mecânicos desprezíveis devido à baixa magnitude. Assim, em condições normais, o sistema de isolamento não possui esforços mecânicos consideráveis, evitando possíveis problemas de vibração no equipamento.

5.1 Análise térmica

A análise térmica recebe como parâmetro de entrada as perdas obtidas na análise magnética. Assim, é possível avaliar a temperatura média nos condutores de cobre e a distribuição de temperatura nos isolamentos do equipamento. Dessa forma, é possível verificar a distribuição de temperatura na barra de estator, onde os pontos com maiores temperatura ocorrem nos subcondutores das bobinas, ver Figura 11.

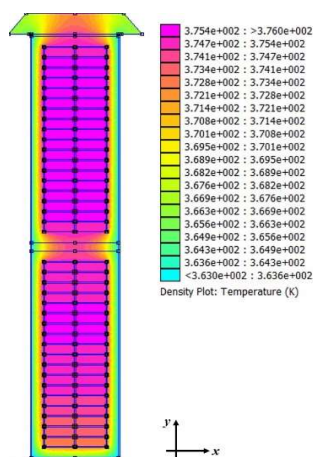


FIGURA 11 - Distribuição de temperatura

Além disso, é possível observar o aumento da temperatura média nos condutores de cobre, ver Figura 12, onde verifica-se que a bobina superior possui temperaturas mais elevadas devido às maiores perdas resistivas obtidas previamente. Ademais, observa-se que a isolamento de subcondutor está exposta às maiores temperaturas devido ao contato direto com os condutores possuindo temperaturas médias de $102,62^\circ\text{C}$ e $101,75^\circ\text{C}$ nas bobinas superior e inferior, respectivamente.

Por fim, é possível analisar a variação de temperatura na isolação de aterramento inserindo um contorno paralelo ao eixo x. Nesse sentido, nota-se o aumento da temperatura com a proximidade dos condutores de cobre, ver Figura 13.

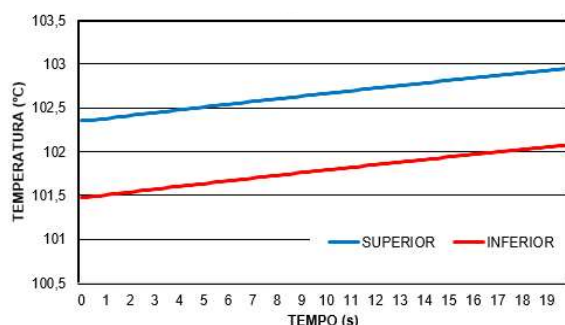


FIGURA 12 - Temperatura média nos condutores

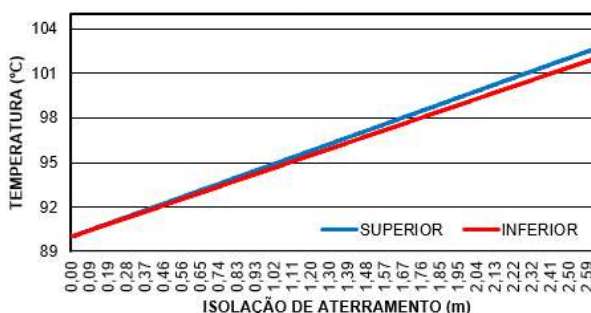


FIGURA 13 - Variação de temperatura na isolação de aterramento

6.0 - CONCLUSÃO

O objetivo desse estudo foi desenvolver uma análise acoplada da barra de estator de modo a observar os efeitos magnéticos e térmicos no sistema de isolamento. O modelo desenvolvido foi baseado em uma barra estatórica de uma empresa concessionária de energia do Norte do Brasil. A partir disso, utilizou-se o Método de Elementos Finitos, por meio do software FEMM, com o intuito de analisar o comportamento magnético e térmico do sistema de isolação presente na barra em regime permanente.

Dessa forma, verificou-se que a magnitude da densidade de campo magnético radial apresentou baixa magnitude não implicando em estresses mecânicos significativos no estado de operação da máquina. Ademais, observou-se que as maiores temperaturas estão presentes no isolamento de subcondutor de modo que deve possuir boa condutividade térmica para que, associado à isolação de aterramento, transmita o calor gerado para o meio externo de modo a evitar sobreaquecimento na máquina.

Outro fator observado foi a redução da temperatura na isolação de aterramento. Nesse sentido, verificou-se que a referida isolação é responsável por reduzir aproximadamente 10°C da temperatura do equipamento, diminuindo a temperatura na ranhura da máquina.

Assim, atividade desenvolvida serve como metodologia para implementação de modelagens com falhas no isolamento, envelhecimento dos materiais, VET, ciclos térmicos, entre outros que podem ocasionar diversos problemas para a máquina elétrica. Além disso, é possível aplicar a mesma metodologia para outros equipamentos a fim de verificar padrões de temperatura e campo magnético.

Como projetos futuros, serão realizadas simulações com falhas no sistema de isolamento de modo a verificar problemas resultantes, como descargas parciais. Além disso, devem ser realizados ensaios experimentais utilizando o objeto real de modo a observar os padrões de temperatura a serem comparadas com os obtidos por meios computacionais.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL. Matriz de energia elétrica. Disponível em: www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm. 2019. Brasil
- (2) CIGRÉ. Survey of hydrogenerator failures. CIGRÉ. 2009.
- (3) FONSECA, W.S.; LIMA, D.S.; NUNES, M.V.A.; SOEIRO, N.S.; LIMA, A.K.F. Analysis of electromagnetic stresses and structural integrity on the winding of a transformer under inrush currents conditions. INDUSCON – Brasil, 2016.

- (4) BORGES, J.W.R.; FONSECA, W.S.; BRASIL, F.S. Development of a finite element model for steady state electromagnetic-thermal stator bar analysis. SBSE – Brasil. 2018.
- (5) STONE, G.C.; BOULTER, E.A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H. Electrical Insulation for Rotating Machines Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. WILEY – Nova Iorque. 2004
- (6) ISTAD, M.; RUNDE, M.; NYSVEEN, A. A review of results from thermal cycling tests of hydrogenerator stator windings. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011
- (7) MEEKER, D. Finite element method magnetics version 4.2 user's manual. 2018
- (8) BIANCHI, N. Electrical machine analysis using finite elements. CRC Press. 2005
- (9) BASTOS, J.; CABREIRA, J.; SADOWSKI, N.; ARRUDA, S.; NAU, S. A thermal analysis of induction motors using a weak coupled modeling. IEEE Transactions on Magnetics. 1997.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



(1) JOSÉ WILLIAM RIBEIRO BORGES

Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (em andamento)
Técnico em Informática pelo Instituto Federal do Mato Grosso do Sul (IFMS) em Corumbá, Mato Grosso do Sul, Brasil. Atua como bolsista de iniciação científica no Laboratório de Concepção e Análise de Dispositivos Elétricos (LCADE) do CEAMAZON da Universidade Federal do Pará (UFPA), na área de análises computacionais de equipamentos do Sistema Elétrico de Potência.

(2) WELLINGTON DA SILVA FONSECA

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará – 2016.
Atualmente é Professor do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará - ITEC/FEED. É pesquisador do CEAMAZON - Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia. É Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM/UFPA e do Programa de Pós-Graduação em Docência em Educação em Ciências e Matemática - PPGDOC/UFPA. Tem experiência na área de Física e Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletromagnetismo de Baixas Frequências, interações entre fenômenos Eletromagnéticos e Mecânicos, de Materiais Elétricos, de Educação em Engenharia, Ensino de Física, Novas Metodologias para Educação em Engenharia, Energia, Modelagem de Dispositivos Eletromagnéticos e Eletromecânicos Utilizando Método de Elementos Finitos.

(3) FERNANDO DE SOUZA BRASIL

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade federal do Pará – 2016
Atualmente é Engenheiro de Manutenção Elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte e Professor do curso de Engenharia Elétrica na Faculdade FACI Wyden. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando nas áreas de manutenção preditiva de equipamentos de alta tensão de subestações e usinas hidrelétricas.