

ESTUDO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS EM BOBINAS DE GERADORES EÓLICOS BASEADO NA MODELAGEM POR EQUAÇÕES DE EULER-LAGRANGE E AVALIADO POR *SURGE TEST*

Alexsandro L. Mittmann, Arthur G. Bartsch, John J. A. Saldanha
Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
e-mail: sandroluan@gmail.com, arthur.bartsch@ifsc.edu.br, john.saldanha@ifsc.edu.br
Trabalho de Conclusão de Curso – 09/02/2022

Resumo – O objetivo deste documento é desenvolver a modelagem de um ensaio de *surge test* a partir das equações de Euler-Lagrange. Este modelo foi elaborado no intuito de analisar com os ensaios práticos, entre outros, de curto-circuito executados em bobinas de aerogeradores, durante a fase inicial do processo de produção, quando ainda não estão inseridas em um estator. O método analítico proposto foi capaz de atender esse objetivo proposto, permitindo comparar aos ensaios de bobinas em boas condições, com leves e altos curtos-circuitos entre espiras. Há também a possibilidade de simular o curto-circuito em qualquer local da bobina, indicado como um curto entre espiras.

Palavras-chave – Aerogerador, curto-circuito entre espiras, Euler-Lagrange, *surge test*.

STUDY OF SHORT CIRCUIT BETWEEN TURNS IN WIND GENERATOR COILS BASED ON MODELING BY EULER-LAGRANGE EQUATIONS AND EVALUATED BY *SURGE TEST*

Abstract – The purpose of this document is to develop the modeling of a *surge test* test from the Euler-Lagrange equations. This model was developed in order to analyze with practical tests, among others, of short circuits carried out in wind turbine coils, during the initial phase of the production process, when they are not yet inserted in a stator. The proposed analytical method was able to meet this proposed objective, allowing comparison to tests of coils in good condition, with light and high short circuits between turns. There is also the possibility of simulating the short circuit anywhere on the coil, indicated as a short between turns.

Keywords – wind turbine, short circuit between turns, Euler-Lagrange, *surge test*.

I. INTRODUÇÃO

A procura por fontes geradoras de energia elétrica renováveis em vez de fontes convencionais que utilizam combustíveis

fósseis está em alta, principalmente pelo alto custo do petróleo e emissão de gases tóxicos e poluentes [1].

Segundo o boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro no mês de novembro de 2021 [2], a energia eólica representou 10,6% da capacidade instalada no Brasil, sendo a terceira maior, ficando atrás da hidrelétrica, com 63,15%, e da térmica, com 23,4%. Os 2,85% restantes são de outras fontes.

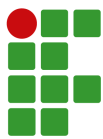
Desse modo, há um aumento expressivo na instalação de novos parques eólicos. A previsão da capacidade instalada é de chegar a 13,9% até 2026 [3]. Caso seja necessário que haja aumento de números de torres em um parque eólico, é possível expandi-lo sem interferir na geração das demais unidades. Além disso, durante a operação de uma usina eólica, não ocorre a emissão de gases poluentes. Outro ponto positivo, é a possibilidade de utilização do terreno para outros fins (agricultura ou pecuária) [4].

Porém, é preciso verificar alguns pontos negativos, como o aumento da poluição visual e sonora ocasionada pelas hélices, a interferência na migração de pássaros, as cintilações luminosas devido ao reflexo do sol nas hélices e o alto custo da manutenção nas torres eólicas [4].

A manutenção em um aerogerador apresenta custo elevado e contempla diversos problemas, devido a alguns fatores como a localização, pois geralmente está em locais de difícil acesso e longe de um posto de manutenção; dificuldade no transporte dos equipamentos e movimentação de pessoas, devido à altura da torre que se encontra; e, ao espaço restrito no interior do aerogerador [5].

Em [6], verifica-se a relação de uma falha em um dos principais componentes de um aerogerador parado há dias para a manutenção não programada. É visto que a ocorrência de uma falha elétrica no enrolamento de um aerogerador é baixa, porém, caso ocorra, haverá um alto custo para o reparo, principalmente, em parques *offshore* (localizados em regiões marítimas).

Já para [7], as falhas na isolação dos enrolamentos são divididas em cinco tipos: entre espiras; entre bobinas; circuito aberto; fase-fase e fase-terra, sendo que, basicamente, todas as falhas iniciam-se com uma falha de curto entre espiras. Assim, no curto entre espiras, haverá uma circulação maior de corrente, ocasionando uma elevação na temperatura e, conseqüentemente,



na degradação da isolação do enrolamento. Com o passar do tempo, a degradação da isolação aumentará até chegar a um nível mais crítico, ocorrendo falhas mais severas e de maiores custos para reparos.

Assim, é de suma importância que toda isolação dos enrolamentos oriundos de um aerogerador esteja em perfeitas condições e que, durante o processo de fabricação, eventuais problemas sejam constatados e solucionados. Dessa forma, um dos testes requisitados para identificação de falhas elétricas em isolantes é o *surge test*, ou surto de tensão. Este é considerado um dos métodos mais completos e eficazes. Entre os motivos, está o fato de que ele não é um ensaio destrutivo/agressivo para a isolação, diferentemente do ensaio de tensão aplicada, e pode ser utilizado em diversas etapas da fabricação, durante processo de bobinagem, montagem, ensaios finais e funcionamento em campo para a constatação de falhas [8].

Porém, é perceptível que pequenas variações na estrutura das bobinas, nas posições dos cabos do aparelho de *surge test*, na temperatura e na umidade relativa do ar influenciam nos resultados [9]. Nesse sentido, em algumas situações pode ocorrer uma interpretação errônea dos resultados obtidos do ensaio. Essa interpretação pode implicar falso-positivo de falha, demandando recursos para a investigação de um curto inexistente. Ou, pior, o teste mal feito pode causar um falso-negativo, liberando para o cliente um gerador com uma pequena falha, que pode ampliar-se com o tempo [5].

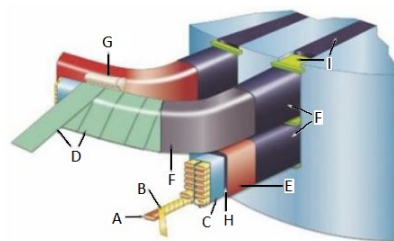
Com o objetivo de obter uma ferramenta de análise mais consistente para *surge test*, que minimize erros de interpretação, propõe-se o desenvolvimento de um modelo matemático para o ensaio. Com o modelo proposto, serão feitas simulações numéricas para auxiliar na interpretação dos laudos obtidos via *surge test* em bobinas de aerogeradores.

Este trabalho está organizado conforme descrito a seguir. Na Seção II, apresentam-se os tipos de falhas e suas causas. Na Seção III, é apresentada a modelagem matemática proposta através do equacionamento de Euler-Lagrange. Na Seção IV, são apresentados os métodos empregados para a determinação do artigo. Na Seção V, encontram-se os resultados obtidos através da modelagem e dos testes práticos em bobinas de aerogeradores com o aparelho de *surge test*. E na Seção VI, apresentam-se as conclusões encontradas com o desenvolvimento do artigo.

II. TIPOS DE FALHAS E SUAS CAUSAS

Caso haja um defeito em algum componente de uma máquina elétrica, há um sinal de redução da capacidade de operação e funcionamento conforme foi projetada. Caso não seja detectado o quanto antes, esse defeito poderá ser agravado até que ocorra uma falha, de modo a causar uma parada não planejada [10].

Porém, as falhas, sejam de origem elétrica ou mecânica, podem acarretar outros problemas, como tensões e correntes desbalanceadas; aumento de vibrações; aumento de perdas que reduzem o rendimento; aumento da temperatura de operação, entre outros fatores [11].



- | | |
|--|--|
| A) Condutor | F) Proteção a corona (condutivo) |
| B) Isolação do condutor | G) Materiais de amarração |
| C) Materiais de consolidação da espira | H) Resina de impregnação |
| D) Isolação principal (fita de mica) | I) Materiais de preenchimento da ranhura |
| E) Fitas de acabamento e vedação | |

Fig. 1. Isolação de bobinas de alta tensão. Adaptado de [15].

Há diversos tipos de falhas que podem ocorrer em uma máquina elétrica. De acordo com [12], as mais comuns são: falha no estator, falha no rotor, falha no enrolamento/mancal e falha de excentricidade.

As falhas no estator representam em torno de 35% das falhas totais identificadas em máquinas elétricas [13]. Usualmente, iniciam-se com um pequeno problema na isolação dos fios de uma bobina, gerando um curto-circuito entre espiras. Normalmente, os problemas estão associados à degradação da isolação das bobinas [14], seja por problemas internos à máquina ou externos.

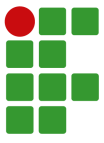
Na Fig. 1, é possível visualizar as camadas de isolantes existentes em uma bobina. Pode haver métodos distintos, de acordo com o projeto da máquina ou com as especificações do cliente ou do fabricante. As isolações de uma bobina de um aerogerador são similares à Fig. 1. Um curto-circuito entre espiras ocorrerá entre dois ou mais condutores devido à ineficiência da isolação "B". Um curto-circuito entre fase e fase, ou fase e terra, ocorrerá se houver diversas falhas combinadas entre a isolação "B", "D" e "H".

Assim, as principais causas de danos na isolação dos enrolamentos de máquinas elétricas são apresentadas nas subseções seguintes.

A. Estresse térmico

Conforme [16], os isolantes utilizados em máquinas elétricas precisam suportar os efeitos térmicos pelo menos durante 20 mil horas. Porém, foi constatado que a cada aumento de 10°C, a vida útil da isolação diminuirá pela metade. Para aumentar a vida útil da isolação, é necessário que seja reduzida a temperatura de operação ou a máquina seja produzida com um isolante de classe superior. Em condições normais de operação, o envelhecimento térmico não representa um risco; porém, torna a isolação mais vulnerável a outros problemas, podendo causar um curto-circuito.

Há diversos fatores que influenciam no aumento da temperatura, como: envelhecimento da isolação; falha no projeto de operação; falha na refrigeração; sobrecarga; operações em regimes diferentes do especificado pelo fabricante; e oscilações severas de temperatura do ambiente [16].



B. Estresse elétrico

O tipo de isolante utilizado e o modo de impregnação são determinantes para que não haja problemas associados a falhas elétricas. De acordo com [16], há fatores que interferem na eficiência de isolamento elétrica, como: espessura do material isolante; falha na impregnação, fazendo com que ocorra espaços vazios entre os condutores; geometria das bobinas; e estresse mecânico ou influência térmica, que podem acarretar a ocorrência de descargas parciais [17] — pequenas descargas elétricas que iniciam com um ponto de ionização na parte interna ou externa dos enrolamentos. Com o passar do tempo, esse ponto aumentará, causando a deterioração da isolamento e ocasionando uma falha mais crítica.

Outros fatores que degradam a isolamento são a operação de máquinas por meio de conversores de frequência ou a influência de transientes externas na rede de alimentação, devido a variações de frequência, tensão e corrente [18], [19].

C. Estresse mecânico

Máquinas operando em níveis elevados de vibração, que dependem da classe de operação e polaridade [20], problemas nos rolamentos, cargas desalinhas, e problemas de acoplamento geram um estresse mecânico muito alto nas máquinas elétricas. Esse estresse pode ocasionar a movimentação das bobinas ou colisões do rotor contra o estator, gerando trincas ou obstruindo os canais de ventilação. Assim, há uma diminuição da capacidade de isolamento elétrica e térmica do sistema de isolamento.

D. Estresse do meio ambiente

O local de instalação de cada máquina elétrica é crucial para um excelente desempenho, pois há fatores externos que degradam e diminuem consideravelmente a vida útil.

Fatores como a umidade e a temperatura ambiente influenciam na eficiência da dissipação de calor, causando a deterioração térmica. Também, a entrada de partículas metálicas podem ocasionar descargas ou efeito corona entre as bobinas. Produtos químicos podem causar corrosão da isolamento, tornando menos eficiente contra efeitos elétricos e mecânicos [21].

Tendo em vista os diversos tipos de estresses que podem ocorrer em uma máquina elétrica e suas intensidades, necessita-se a máxima eficiência possível dos isolantes empregados, de modo que ocorra maior acuracidade dos ensaios efetuados durante o processo de fabricação.

III. MODELAGEM DO PROCESSO

Nesta seção, são apresentados conceitos teóricos fundamentais para a modelagem do *surge test* em uma bobina bem como a própria modelagem do processo.

A. Euler-Lagrange

As equações de Euler-Lagrange são uma maneira de obtenção do equacionamento de um determinado sistema físico. Dependendo do problema e da quantidade de equações que

podem ser obtidas, usando as técnicas lagrangianas, torna-se um meio mais rápido e fácil de serem resolvidos em comparação com os métodos newtonianos [22]. Isso porque, usando método newtoniano, geralmente os problemas são formulados na forma de força ou vetor [23]. Já através do lagrangiano, os problemas são descritos através de conservação de energia, este na forma escalar [24]. Assim, é possível decompor um sistema em diversos sub-sistemas, e modelados/calculados em partes. Isso torna mais fácil a modelagem em comparação a um sistema completo [25].

Mas há alguns detalhes que precisam ser vistos antes de sua utilização. Utilizam-se as coordenadas generalizadas do sistema, para a definição da posição no espaço de um determinado conjunto de partículas [26].

O lagrangiano \mathcal{L} , pertencente as coordenadas generalizadas q, \dot{q} é o resultado da diferença entre a energia cinética T com a energia potencial V :

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q). \quad (1)$$

Segundo Lagrange, a seguinte relação é válida para a determinação dos sistemas físicos:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{d\mathcal{L}(q, \dot{q})}{d\dot{q}} \right] - \frac{d\mathcal{L}(q, \dot{q})}{dq} = Q(q) \quad (2)$$

onde Q , são as forças externas do sistema físico, compostas pelos seguintes termos:

$$Q(q) = -\frac{dF(\dot{q})}{d\dot{q}} + Q_\xi + \mu_u \quad (3)$$

onde $F(\dot{q})$ é a função dissipativa de Rayleigh, Q_ξ são perturbações ao sistema e μ_u é um termo de atuação na ação de controle.

As equações de Euler-Lagrange normalmente são utilizadas para sistemas mecânicos [25], mas é possível que sejam abordadas em circuitos elétricos [24], [27].

Contudo, é preciso atenção na definição das coordenadas generalizadas e determinação das energias cinética e potencial de cada componente do circuito analisado. As coordenadas generalizadas em um circuito serão as cargas elétricas $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ definidas como $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ [28].

Segundo [24] e [27], é possível associar relações envolvendo componentes elétricos, conforme descrito a seguir.

A energia (ou coenergia) magnética criada pelo indutor L é análoga à energia cinética. Assim, tem-se:

$$T = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}L\dot{Q}^2 \quad (4)$$

sendo a corrente I a derivada temporal da carga elétrica.

A energia potencial em um circuito é definida pela energia armazenada em capacitores e pela energia das fontes. A energia

potencial de uma fonte é expressa por:

$$V_f = -EQ \quad (5)$$

onde E é a força eletromotriz da fonte e Q a carga elétrica.

A energia potencial de um capacitor é definida pela equação:

$$V_c = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (6)$$

onde Q é a carga armazenada no capacitor e C a capacitância.

O terceiro elemento são as forças dissipativas. Em um circuito elétrico, a principal maneira de dissipação de energia é através das perdas por efeito Joule nos resistores. Há também outras perdas, como: correntes de Foucault, histerese, suplementares, entre outras. Porém, como essas últimas possuem menor intensidade, geralmente podem ser desconsideradas na modelagem do processo. Assim, a força dissipativa é definida por:

$$P_e = -RQ \quad (7)$$

onde P_e é a força dissipativa generalizada do circuito e R é a resistência ôhmica.

Em (3) são identificados mais duas forças que estão associadas a perturbação externa, Q_ξ e μ_u . Estas são desconsideradas devido a não aplicação ao circuito elétrico utilizado neste artigo.

Desse modo, a seguinte expressão é chamada de forma geral de Euler-Lagrange, descreve um conjunto de n equações diferenciais de segunda ordem [27].

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{d\mathcal{L}(q, \dot{q})}{d\dot{q}} \right] - \frac{d\mathcal{L}(q, \dot{q})}{dq} + \frac{dPe(q, \dot{q})}{dq} = 0 \quad (8)$$

Em circuitos elétricos, o conjunto n de equações diferenciais irá depender da quantidade de ramos e malhas, visto que as coordenadas generalizadas estão associadas as correntes elétricas de cada ramo e malha.

De modo geral, ao longo desse trabalho, omitem-se os parâmetros das funções para melhora da legibilidade do texto, exceto quando estritamente necessário explicitá-los.

B. Surge test

O ensaio de *surge test* é realizado no intuito de verificar a integridade da isolamento elétrica de bobinas de máquinas elétricas, identificando possíveis falhas, como: curto entre espiras; curto entre enrolamentos da mesma fase ou fases diferentes; ou curto entre uma fase e terra. O teste pode ser realizado em diversas etapas de fabricação e operações das máquinas elétricas, sendo executado de maneira *offline*, quando a máquina elétrica não está energizada [29], [30].

Na Fig. 2, é visto o diagrama de ligação elétrica do *surge test*. A capacitância, resistência e indutância interna do *surge* são representadas respectivamente por C_0 , R_0 e L_0 . Os componentes R_1 e L_1 indicam a bobina testada no momento.

No início do ensaio, a chave S_1 permanece na posição 1-2, para que ocorra o carregamento do capacitor C_0 . A chave S_2 permanece na posição 1-3, fazendo com que isole o restante do circuito. Após, a chave S_1 é alternada para a posição 1-3 no mesmo instante que a chave S_2 passa para a posição 1-2. Desse modo, haverá a descarga do capacitor C_0 na bobina. Após o tempo de descarga, inicia-se processo de carregamento do capacitor, repetindo o processo. Esta atividade irá acontecer, até que o operador desative o ensaio. Há um controlador, não indicado na Fig. 2, responsável pela atuação das chaves S_1 e S_2 .

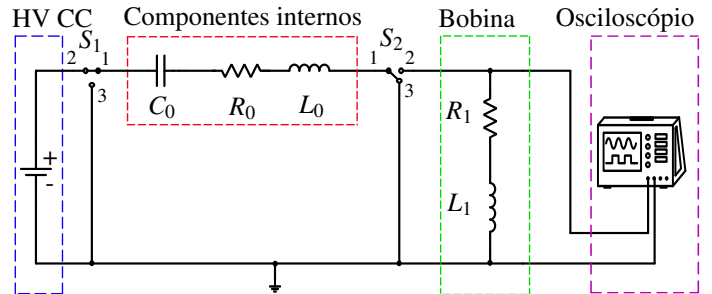


Fig. 2. Diagrama de ligação elétrica do *surge test*. Próprio autor.

O capacitor C_0 é carregado por uma fonte de alta tensão CC (HV CC), sendo essa tensão especificada de acordo com a bobina que está sendo testada. A energia contida neste capacitor é descarregada em curto período de tempo, aproximadamente $1,2 \mu s$, em uma bobina [8].

O resultado é armazenado pelo aparelho, servindo de comparação para as demais bobinas. Esse breve surto de tensão aplicado ocasionará um gradiente de tensão por todo o comprimento da bobina.

Como o circuito equivalente indicado na Fig. 2 representa um circuito RLC , haverá a absorção de energia, resultando assim em uma forma de onda senoidal amortecida. Essa forma de onda é medida através de um osciloscópio. A frequência dessa forma de onda, conhecida como frequência natural amortecida, pode ser calculada por meio da seguinte equação [31]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_{eq}} - \frac{R_{eq}^2}{4L_{eq}^2}} \quad (9)$$

em que L_{eq} é a indutância equivalente, C_{eq} é a capacitância equivalente e R_{eq} a resistência equivalente do circuito.

A frequência, a forma, o aspecto e a quantidade de picos dependerão dos valores de resistência, capacitância e indutância da bobina testada.

Caso a bobina testada contemple impedância muito similar a bobina de referência, as duas formas de onda ficarão completamente sobrepostas. Se houver uma falha na isolamento entre espiras [31], o potencial aplicado acaba sendo maior que a resistência do dielétrico do fio; assim, a isolamento será rompida e a indutância L_1 e consequentemente L_{eq} será desigual, fazendo com que a frequência natural amortecida fique diferente. Desse modo, haverá uma discrepância entre as formas de onda, da

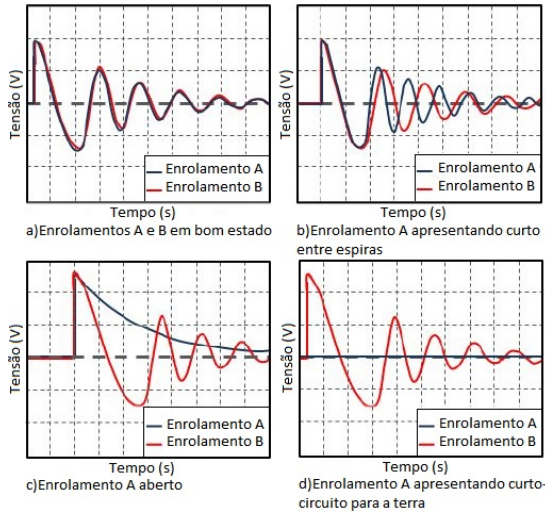


Fig. 3. Exemplos de formas de onda do *surge test*. Adaptado de [32].

bobina testada e da referência. Porém, é possível haver um número errado de espiras ou conexões invertidas, bem como variações no material isolante utilizado. Essas falhas também podem influenciar no valor da impedância [29].

A norma IEEE Std 522-2004 [8], recomenda que sejam executados os ensaios de *surge test* em bobinas individuais e enrolamentos de máquinas novas e reconhecidas.

Na Fig. 3, há quatro principais formas de onda que podem ocorrer durante um ensaio de *surge test* [32]. Sendo que para os quatro exemplos, a referência de cada ensaio é o enrolamento B, e o enrolamento A está sendo comparado para verificação a integridade de sua isolamento.

Na Fig. 3 a), os dois enrolamentos A e B estão com a isolamento em boas condições, visto pela sobreposição dos dois sinais.

Na Fig. 3 b), há um possível curto-circuito entre espiras no enrolamento A, devido à defasagem dos sinais.

Na Fig. 3 c), o enrolamento A está aberto ou os terminais estão desconectados, pois o sinal indica um decaimento exponencial, porém sem oscilações.

Na Fig. 3 d), o enrolamento A está totalmente em curto de fase-terra, no qual a energia do capacitor foi descarregada num baixíssimo instante de tempo.

A verificação dos resultados obtidos pelo osciloscópio pode ser realizada das seguintes maneiras [33]:

- **Comparação visual:**

Utiliza-se uma bobina com a isolamento em perfeitas condições como referência e a compara com as bobinas cuja integridade deseja-se verificar. Esse é um critério visual e que demanda tempo para que todas as curvas sejam inspecionadas por um operador. Além disso, pode acarretar falhas de interpretação por esse operador.

- **Error Area Ratio (EAR):**

Para esse método, também é necessária a utilização de uma bobina de referência como comparativo. Porém, para a

determinação da aprovação, o aparelho realiza um cálculo matemático dado por:

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)} - F_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |F_j^{(1)}|} \cdot 100 \quad (10)$$

onde $F^{(1)}$ é a bobina de referência e $F^{(2)}$ a bobina a ser testada.

Desse modo, determina-se em percentual a diferença entre as áreas das duas formas de onda. Além disso, esse método é bastante sensível às discrepâncias existentes entre as curvas avaliadas. Desse modo, um valor máximo de tolerância pode ser especificado facilmente, o que promove maior eficiência na condução de testes em sequência em várias bobinas.

C. Frequência natural amortecida

A equação (9) origina-se a partir do equacionamento do circuito *RLC* da Fig. 2, formado entre a bobina testada e o *surge test*.

Levando em conta que não há energia previamente armazenada na bobina, utiliza-se a lei de Kirchhoff das tensões. Considerando a seguinte situação:

$$I = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (11)$$

tem-se que:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{L_{eq}C_{eq}} = 0. \quad (12)$$

Utilizando (12), é possível definir a equação característica e encontrar as suas raízes:

$$s = -\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \pm \sqrt{\left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}\right)^2} \quad (13)$$

desse modo, ζ é determinado como o fator de carga do circuito *RLC* e ω_o como frequência de ressonância, respectivamente:

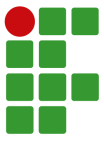
$$\zeta = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \quad (14)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \quad (15)$$

Neste circuito, há muitas influências que impactam nos resultados. Por isso, é necessário considerar o máximo de variáveis presentes. Assim, para determinar a ressonância com carga:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \zeta^2} \quad (16)$$

Substituindo (14) e (15) em (16), tem-se:



$$\omega_d = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}\right)^2 - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2} \quad (17)$$

Visto que ω_d é igual a $2\pi f$, igualando à equação (17) e isolando as variáveis, encontra-se o valor da frequência natural amortecida para um circuito *RLC* correspondente à (9).

D. Energia e coenergia armazenada

De acordo com [34] e [35], pela lei de Faraday, conforme ocorre a variação de um campo magnético no tempo, haverá a produção de um campo elétrico no espaço, sendo:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \hat{n} ds \quad (18)$$

onde \vec{E} é o campo elétrico que percorre ao longo de um contorno fechado L , $d\vec{l}$ é um elemento vetorial infinitesimal de L , \vec{B} é o campo magnético, $\hat{n}ds$ é um elemento vetorial infinitesimal de S . Em circuitos magnéticos, é possível associar que o campo elétrico \vec{E} é do domínio da quase estática, ao ponto de poder ser ignorado e, como o enrolamento deste circuito concatena o fluxo do núcleo de acordo com o número de espiras N , é possível reduzir a equação (18) da seguinte forma:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = e = N \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (19)$$

sendo λ o fluxo concatenado do enrolamento N e φ o fluxo magnético. Assim, é definido como:

$$\lambda = N\varphi. \quad (20)$$

Ainda considerando um circuito magnético que contenha um núcleo magnético de permeabilidade constante, pode ser utilizado apenas um único material, ou o ar. Assim, a relação entre λ e i será linear e pode-se definir a indutância L como:

$$L = \frac{\lambda}{i}. \quad (21)$$

Substituindo (21) em (19), tem-se que:

$$e = \frac{d}{dt}(Li). \quad (22)$$

No caso, por exemplo, de uma bobina que não está em movimento, sendo considerado um circuito magnético estático, a indutância será fixa. Assim, será possível reduzir a equação:

$$e = L \frac{di}{dt}. \quad (23)$$

A potência p é determinada pelo produto da tensão pela corrente de um circuito magnético, sendo ela a taxa com que

o fluxo de energia flui para dentro do circuito. É definida como:

$$p = ie = i \frac{d\lambda}{dt} \quad (24)$$

e a taxa de variação da energia magnética armazenada ΔW no circuito magnético, durante o intervalo de tempo de t_1 a t_2 , é:

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda. \quad (25)$$

Em circuitos magnéticos que apresentam apenas um enrolamento fixo, a taxa de variação da energia armazenada, quando há a variação de fluxo de λ_1 a λ_2 , pode ser escrita como:

$$\Delta W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \quad (26)$$

A energia magnética total armazenada nesse circuito, para qualquer valor de λ , é obtida fazendo λ_1 igual a zero [34]:

$$W = \frac{1}{2L} \lambda^2. \quad (27)$$

Dependendo da necessidade, é preciso que seja considerada como variável a corrente em vez do fluxo. Desse modo, é realizada a mudança de variável, em que é definida uma grandeza chamada de coenergia. Essa que corresponde ao complemento da energia armazenada em relação ao produto fluxo por corrente, sendo definida como [34]:

$$W' = \int_{i_1}^{i_2} \lambda di = \int_{i_1}^{i_2} Li di = \frac{1}{2} L (i_2^2 - i_1^2) \quad (28)$$

A coenergia magnética total armazenada nesse circuito, para qualquer valor de i , é obtida fazendo i_1 igual a zero:

$$W' = \frac{L}{2} i^2 \quad (29)$$

Em um circuito magnético linear, com a permeabilidade magnética do núcleo constante e sem variação da indutância da bobina, a energia e a coenergia são iguais.

$$W + W' = \lambda i \quad (30)$$

E. Modelagem de uma bobina

Neste tópico, serão contextualizadas duas situações. Na primeira situação, será abordado o modelo completo de uma bobina. Na segunda, com base no modelo completo, será especificado o modelo simplificado, sendo este utilizado para o desenvolvimento do artigo, apresentado na Fig. 4.

Ambos modelos, foram elaborados com base em [36], em que desenvolve-se uma formulação para o caso de um transformador, o que é similar ao presente caso estudado.

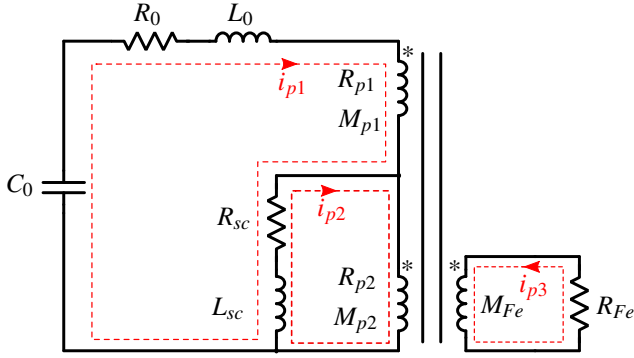


Fig. 4. Modelo de circuito equivalente para ensaio *surge test* considerando a aplicação em bobina com núcleo com curto-circuito entre espiras. Adaptado de [36].

1) *Modelo completo de uma bobina*: Para a obtenção do modelo completo, haverá a influência do núcleo de chapas. De acordo com a Fig. 4, considerando que:

$$i_{p1} = \frac{dq_{p1}}{dt} = \dot{q}_{p1} \quad (31)$$

$$i_{p2} = \frac{dq_{p2}}{dt} = \dot{q}_{p2} \quad (32)$$

$$i_{p3} = \frac{dq_{Fe}}{dt} = \dot{q}_{Fe} \quad (33)$$

O único elemento armazenador de carga elétrica, é o capacitor C_0 . Utilizando (6), a energia potencial é estabelecida como:

$$V(q) = \frac{1}{2} \frac{q_{p1}^2}{C_0}. \quad (34)$$

Conforme visualizado na Fig. 4, haverá quatro indutâncias que armazenaram a energia cinética ou coenergia. Porém, haverá duas indutâncias que não contém relação mútua com o ferro, contendo apenas uma relação linear de energia, não havendo uma distorção do modo de armazenamento. Sendo L_0 , valor de indutância interna do aparelho de *surge test* e o L_{sc} , a indutância referente ao curto-circuito. Usando (4), é indicada a relação linear de energia cinética:

$$T(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} L_0 \dot{q}_{p1}^2 + \frac{1}{2} L_{sc} (\dot{q}_{p1} - \dot{q}_{p2})^2. \quad (35)$$

As outras indutâncias, terão coenergia não lineares. Sendo assim, não é possível adotar (4). Os termos indicados com Ψ serão determinados como λ . Utiliza-se então, a seguinte relação:

$$T(q, \dot{q}) = \int_0^{\dot{q}_{p1}} \Psi_{p1}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) \dot{q}_{p1} + \int_0^{\dot{q}_{p2}} \Psi_{p2}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) \dot{q}_{p2} + \int_0^{\dot{q}_{Fe}} \Psi_{Fe}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) \dot{q}_{Fe} \quad (36)$$

Somando (35) com (36) e aplicando as equações de Lagrange

apresentadas em (1), tem-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(q_{p1}, q_{p2}, q_{Fe}, \dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) = & \frac{1}{2} L_0 \dot{q}_{p1}^2 + \frac{1}{2} L_{sc} \dot{q}_{p1}^2 - \\ & L_{sc} \dot{q}_{p1} \dot{q}_{p2} + \frac{1}{2} L_{sc} \dot{q}_{p2}^2 + \int_0^{\dot{q}_{p1}} \Psi_{p1}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) \dot{q}_{p1} + \\ & \int_0^{\dot{q}_{p2}} \Psi_{p2}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) \dot{q}_{p2} + \\ & \int_0^{\dot{q}_{Fe}} \Psi_{Fe}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) \dot{q}_{Fe} - \frac{1}{2} \frac{q_{p1}^2}{C_0} \end{aligned} \quad (37)$$

Utilizando (7), tem-se:

$$\begin{aligned} P_e(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}, \dot{q}_{Fe}) = & \frac{1}{2} R_0 \dot{q}_{p1}^2 + \frac{1}{2} R_{p1} \dot{q}_{p1}^2 + \\ & \frac{1}{2} R_{p2} \dot{q}_{p2}^2 + \frac{1}{2} R_{Fe} \dot{q}_{Fe}^2 + \frac{1}{2} R_{sc} (\dot{q}_{p1} - \dot{q}_{p2})^2 \end{aligned} \quad (38)$$

Substituindo cada termo de corrente q_p de (37) e (38) em (8) e resolvendo as operações matemáticas, haverá três equações referente a i_{p1} , i_{p2} e i_{p3} , respectivamente:

$$\begin{aligned} (R_0 + R_{p1} + R_{sc}) \dot{q}_{p1} - R_{sc} \dot{q}_{p2} \left(L_0 + L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p1}} \right) \ddot{q}_{p1} + \\ \left(-L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p2}} \right) \ddot{q}_{p2} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{Fe}} \ddot{q}_{Fe} = -\frac{q_{p1}}{C_0} \end{aligned} \quad (39)$$

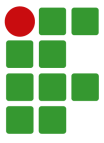
$$\begin{aligned} -R_{sc} \dot{q}_{p1} + (R_{p1} + R_{p2}) \dot{q}_{p2} \left(-L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p1}} \right) \ddot{q}_{p1} + \\ \left(L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p2}} \right) \ddot{q}_{p2} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{Fe}} \ddot{q}_{Fe} = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

$$R_{Fe} \dot{q}_{Fe} + \frac{d\Psi_{Fe}}{\dot{q}_{p1}} \ddot{q}_{p1} + \frac{d\Psi_{Fe}}{\dot{q}_{p2}} \ddot{q}_{p2} + \frac{d\Psi_{Fe}}{\dot{q}_{Fe}} \ddot{q}_{Fe} = 0 \quad (41)$$

Reescrevendo em forma matricial:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L_0 + L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p1}} & -L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p2}} & \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{Fe}} \\ -L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p1}} & L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p2}} & \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{Fe}} \\ \frac{d\Psi_{Fe}}{\dot{q}_{p1}} & \frac{d\Psi_{Fe}}{\dot{q}_{p2}} & \frac{d\Psi_{Fe}}{\dot{q}_{Fe}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q}_{p1} \\ \ddot{q}_{p2} \\ \ddot{q}_{Fe} \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} R_0 + R_{p1} + R_{sc} & -R_{sc} & 0 \\ -R_{sc} & R_{p2} + R_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Fe} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_{p1} \\ \dot{q}_{p2} \\ \dot{q}_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{q_{p1}}{C_0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (42)$$

2) *Modelo simplificado de uma bobina*: No modelo simplificado, não será levada em consideração a presença do núcleo estático. Não havendo mais elementos que contenham perdas no ferro, a permeabilidade magnética será



constante por todo o segmento. Desse modo, a corrente elétrica i_{p3} pode ser desconsiderada para os cálculos.

Utilizando (31) e (32) em (1), tem-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(q_{p1}, q_{p2}, \dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}) &= \frac{1}{2} L_0 \dot{q}_{p1}^2 + \frac{1}{2} L_{sc} \dot{q}_{p1}^2 - \\ &L_{sc} \dot{q}_{p1} \dot{q}_{p2} + \frac{1}{2} L_{sc} \dot{q}_{p2}^2 + \int_0^{\dot{q}_{p1}} \Psi_{p1}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}) \ddot{q}_{p1} + \\ &\int_0^{\dot{q}_{p2}} \Psi_{p2}(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}) \ddot{q}_{p2} - \frac{1}{2} \frac{q_{p1}^2}{C_0} \end{aligned} \quad (43)$$

Utilizando (7), tem-se:

$$\begin{aligned} Pe(\dot{q}_{p1}, \dot{q}_{p2}) &= \frac{1}{2} R_0 \dot{q}_{p1}^2 + \frac{1}{2} R_{p1} \dot{q}_{p1}^2 + \\ &\frac{1}{2} R_{p2} \dot{q}_{p2}^2 + \frac{1}{2} R_{sc} (\dot{q}_{p1} - \dot{q}_{p2})^2 \end{aligned} \quad (44)$$

Substituindo cada termo de corrente \dot{q}_p de (43) e (44) em (8) e resolvendo as operações matemáticas, haverá duas equações referente a i_{p1} e i_{p2} , respectivamente:

$$\begin{aligned} (R_0 + R_{p1} + R_{sc}) \dot{q}_{p1} - R_{sc} \dot{q}_{p2} + (L_0 + L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p1}}) \ddot{q}_{p1} + \\ (-L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p2}}) \ddot{q}_{p2} = -\frac{q_{p1}}{C_0} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} -R_{sc} \dot{q}_{p1} + (R_{p2} + R_{sc}) \dot{q}_{p2} (-L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p1}}) \ddot{q}_{p1} + \\ (L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p2}}) \ddot{q}_{p2} = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

Reescrevendo em forma matricial:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L_0 + L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p1}} & -L_{sc} + \frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p2}} \\ -L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p1}} & L_{sc} + \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q}_{p1} \\ \ddot{q}_{p2} \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} R_0 + R_{p1} + R_{sc} & -R_{sc} \\ -R_{sc} & R_{p2} + R_{sc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_{p1} \\ \dot{q}_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{q_{p1}}{C_0} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (47)$$

Pode-se estabelecer uma relação linear entre os fluxos, através da linearização através do método de Taylor. Sendo este termo, a relação da indutância da parte onde não há curto entre espiras M_{p1} , sendo:

$$\frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p1}} = L_{p1}. \quad (48)$$

O seguinte termo é referente a indutância mútua que há entre as duas partes da bobina M_{p12} , divididos pela presença do curto-circuito, assim:

$$\frac{d\Psi_{p1}}{\dot{q}_{p2}} = \frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p1}} = L_{p12}. \quad (49)$$

O último termo, a relação da indutância da parte onde se encontra o curto-circuito entre espiras M_{p2} , sendo este:

$$\frac{d\Psi_{p2}}{\dot{q}_{p2}} = L_{p2}. \quad (50)$$

Reescrevendo (47), com as relações (48), (49) e (50), tem-se:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L_0 + L_{sc} + L_{p1} & -L_{sc} + L_{p12} \\ -L_{sc} + L_{p12} & L_{sc} + L_{p2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q}_{p1} \\ \ddot{q}_{p2} \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} R_0 + R_{p1} + R_{sc} & -R_{sc} \\ -R_{sc} & R_{p2} + R_{sc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_{p1} \\ \dot{q}_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{q_{p1}}{C_0} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (51)$$

F. Resolução das equações numericamente

Conforme (51) haverá um sistema com duas equações, porém contendo duas segundas derivadas (\ddot{q}_{p1} e \ddot{q}_{p2}) e uma derivada temporal de q_{p1} . Para a solução de equações diferenciais, há diversos métodos, um destes é o método de Euler.

O método de Euler é baseado na expansão de uma função $y(x)$ em series de Taylor. Podendo assim, expandir esta função de acordo com o valor de x_n . Sendo $n=1,2,3,\dots,n$.

Desse modo, o método de Euler irá fazer com que se aproxima o valor de $y(1)$ do valor exato de $y(x_1)$ no ponto x_1 . Assim, ao continuar repetindo com os pontos $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$, tem-se as aproximações de $y_2, y_3, y_4, \dots, y_n$, dos valores exatos de $y(x_2), y(x_3), y(x_4), \dots, y(x_n)$ [37].

Desse modo, para otimização das operações matemáticas, utiliza-se uma matriz M , com os termos associados as indutâncias do sistema.

$$M = \begin{bmatrix} L_0 + L_{sc} + L_{p1} & -L_{sc} + L_{p12} \\ -L_{sc} + L_{p12} & L_{sc} + L_{p2} \end{bmatrix} \quad (52)$$

O mesmo feito, é realizado para os termos relacionados aos resistores. Sendo assim, criada uma matriz R_i .

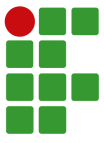
$$R_i = \begin{bmatrix} R_0 + R_{p1} + R_{sc} & -R_{sc} \\ -R_{sc} & R_{p2} + R_{sc} \end{bmatrix} \quad (53)$$

Conforme visualizado em (51), há duas segundas derivadas (\ddot{q}_{p1} e \ddot{q}_{p2}), para a determinação destas variáveis, utiliza-se a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_{p1} \\ \ddot{q}_{p2} \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \left[-R_i \begin{bmatrix} \dot{q}_{p1} \\ \dot{q}_{p2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{q_{p1}}{C_0} \\ 0 \end{bmatrix} \right] \quad (54)$$

Assim, utilizando um software que possibilita a criação de um programa em código de linha, e substituindo os valores dos parâmetros do aparelho, da bobina ensaiada e aplicando o método de Euler em (54), irá ser gerada as curvas das correntes, para i_{p1} e i_{p2} e a curva para a carga i_{q1} . Também é possível criar a curva de tensão, visto que é proporcional a curva de corrente, correspondente ao *surge test*.

O *script* completo utilizado no *software* Octave, encontra-se



no Anexo 1. No qual, o mesmo está todo comentando, apenas foram omitidos os valores de parâmetro da bobina, por uma questão de segurança e proteção dos dados, de acordo com a lei de propriedade intelectual (9.279/96) [38]. Para todas as simulações, foi utilizado o mesmo *script*, variando apenas os valores de cada componente ou tensão do ensaio.

IV. MÉTODOS

A natureza deste artigo consiste em uma pesquisa aplicada, que busca investigar o fenômeno de um curto-circuito entre espiras em bobinas de aerogeradores, realizando ensaios práticos e a partir de modelos computacionais.

A abordagem foi quantitativa. Foram verificadas diversas amostras de ensaios de *surge test* em bobinas de aerogeradores durante a fase inicial de produção, em que as bobinas ainda não foram inseridas no núcleo estático. Esse processo visa identificar falhas na isolamento dos fios, que podem causar falhas de curto-circuito entre espiras. Outro ponto está na modelagem de uma bobina utilizando as equações de Euler-Lagrange, a partir dos parâmetros de uma bobina e do aparelho de *surge test*.

O objeto de estudo para esse problema foi um estudo de caso único, sendo necessário maior aprofundamento na compreensão de um curto-circuito entre espiras e no equacionamento de Euler-Lagrange, devido à complexidade e de ambos serem assuntos bem específicos. Devido a isso, houve a necessidade da coleta de diversos ensaios e análise dos dados obtidos.

Para isso, a análise dos dados foi feita por meio de experimentos em diversas amostras de bobinas. Foi utilizado como parâmetro um percentual denominado EAR (*Error Area Ratio*) entre a área total de uma bobina em condições ideais, sendo esta a referência para todos os ensaios, e a bobina a que se deseja verificar a integridade da isolamento. Os dados obtidos pelo aparelho de *surge test* foram avaliados e comparados ao modelo elaborado, de modo a comparar também sua eficiência na determinação do percentual entre as curvas reais, obtidas pelo aparelho, e as curvas simuladas.

Para a obtenção dos dados práticos, foi utilizado o *surge test* (Fig. 5) da fabricante alemã Schleich. O aparelho apresenta uma excelente eficiência em agilidade e precisão dos resultados obtidos. Os dados de cada ensaio são salvos em formato de arquivo .CSV (*comma-separated-values*) sendo este um arquivo de texto com formato específico para possibilitar o salvamento dos dados em um formato estruturado de tabela. Ideal para a manipulação e estratificação dos pontos de interesse. A tensão de ensaio é de 15 kV, sendo este um valor especificado pelo fabricante dos aerogeradores e, por uma questão de segurança e proteção de dados, não serão descritos os detalhes específicos do projeto das bobinas e do local onde foram executados os testes, de acordo com a lei de propriedade intelectual (9.279/96) [38].

V. RESULTADOS

Nesta seção, são expostos os resultados puramente experimentais, de bobinas em condições ideais e não ideais, e a



Fig. 5. Aparelho de *surge test* Schleich. Retirado de [39].

coerência e simulação do modelo elaborado.

A. Resultados puramente experimentais

Inicialmente, são executados ensaios experimentais em três bobinas. É possível visualizar na Fig. 6 os resultados obtidos pelo *surge test* em três condições, descritas a seguir. A forma de onda na cor preta representa uma bobina com a isolamento em perfeitas condições, onde não há a presença de um curto entre espiras. Utilizando (10) é possível identificar o valor percentual do EAR em 5,10%. A forma de onda de cor vermelha representa uma bobina com uma pequena variação, considerando um curto entre espiras de baixa intensidade, porém estando reprovada no ensaio, com o EAR em 12,10%. A forma de onda na cor verde indica uma bobina com curto entre espiras de alta intensidade, esse com o EAR em 67,90%. Todos os ensaios foram executados nas mesmas condições, garantindo assim a menor influência externa possível.

Ao serem analisadas as três formas de onda, é nítido o entendimento de que há uma falha grave na isolamento da bobina 4, onde é vista a alteração da magnitude e da defasagem. Porém, há uma difícil caracterização de aprovação ou reprovação da bobina 3, visto que graficamente está muito similar à bobina 1 (referência) e 2 (sem curto), onde há apenas uma pequena defasagem do tempo.

Para manter um padrão de figuras e para maior facilidade na manipulação dos dados, as figuras foram geradas no *software* Octave, através dos dados obtidos no aparelho de *surge test*.

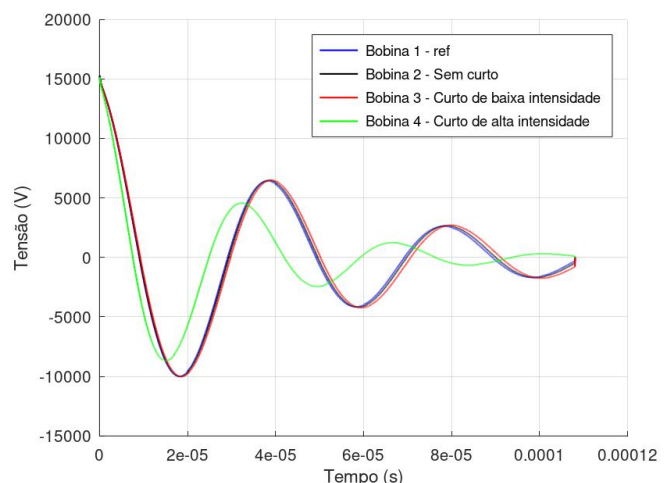
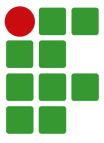


Fig. 6. Resultados experimentais de três bobinas. Próprio autor.



A Fig. 7 foi ampliada, para uma melhor visualização das variações das curvas, desse modo sendo possível a identificação da variação entre as curvas das bobinas 1, 2 e 3.

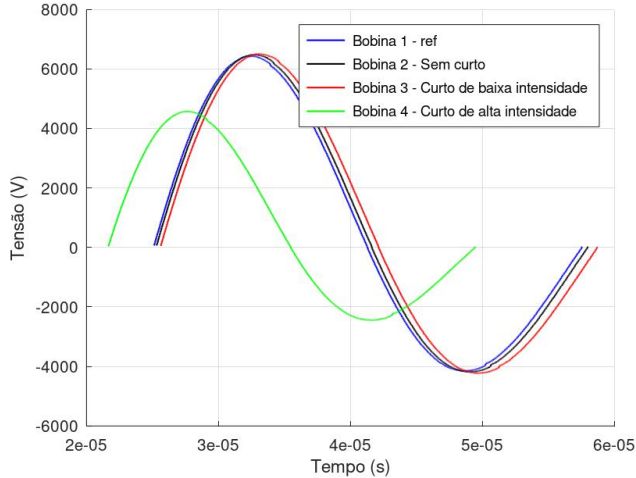


Fig. 7. Resultados experimentais ampliados. Próprio autor.

As três situações foram comparadas com a mesma bobina de referência, de cor azul, em um local de temperatura e umidade controlada. Foi encontrada uma enorme dificuldade em relacionar as formas de onda testadas com o aparelho com a forma de onda simulada. Essa dificuldade é decorrente da dificuldade de mapear o valor exato das condições ambientes externas supracitadas. Assim, apesar de estarem controladas para garantir a repetibilidade e validade dos testes experimentais, são desprezadas no modelo de simulação o que provoca pequenas discrepâncias.

B. Coerência do modelo

O modelo de simulação numérico foi elaborado com base na equação diferencial de segunda ordem, detalhada em (47).

Conforme visto anteriormente, as formas de onda de tensão em um circuito *RLC* têm características senoidais amortecidas. Isso ocorre pelo fato do capacitor descarregar a energia na bobina, sendo descrita como um indutor em série com um resistor. Esses dois componentes absorvem a energia descarregada, fazendo com que a tensão tenda a zero, criando, assim, a forma de onda amortecida. Os valores de capacitância, indutância e resistência são de extrema importância para a determinar a frequência natural amortecida (9), porém o principal fator é a indutância da bobina.

Na Fig. 8, consta a coerência entre as formas de onda medidas por meio do *surge test* e da simulação. A forma da simulação ainda não está coincidente com a verificada na prática, devido à necessidade de ajustes mais precisos dos valores nominais de capacitância do surge, indutância e resistência da bobina, pois há diversos fatores relacionados. Estes ajustes serão efetuados no decorrer do artigo.

Ao ampliar a Fig. 8, é possível visualizar uma variação na

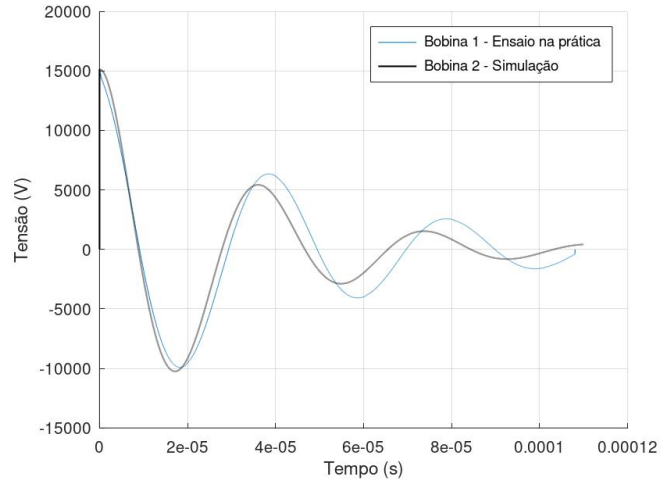


Fig. 8. Coerência da simulação com o ensaio na prática. Próprio autor.

parte inicial da onda simulada e da realizada na prática através do *surge test*, Fig. 9. Essa diferença ocorre por alguns principais fatores, como o chaveamento do capacitor do aparelho que ocorre em uma alta frequência, causando uma elevada trepidação que gera uma variação de tensão e corrente e maior dissipação de energia no transiente de conexão dos interruptores. Outro fator a ser considerado é que há uma dissipação de energia maior do que o esperado, através dos componentes, cabos e garras. Além disso, pode ocorrer a presença, em pequena intensidade, de acúmulo de energia elétrica ou magnética de ensaios executados em momentos anteriores, o que influencia nos resultados. Quando a comparação dos ensaios é realizada pelo equipamento, a divergência inicial pode ser desconsiderada, visto que ocorrerá em ambos os casos com uma grande similaridade.

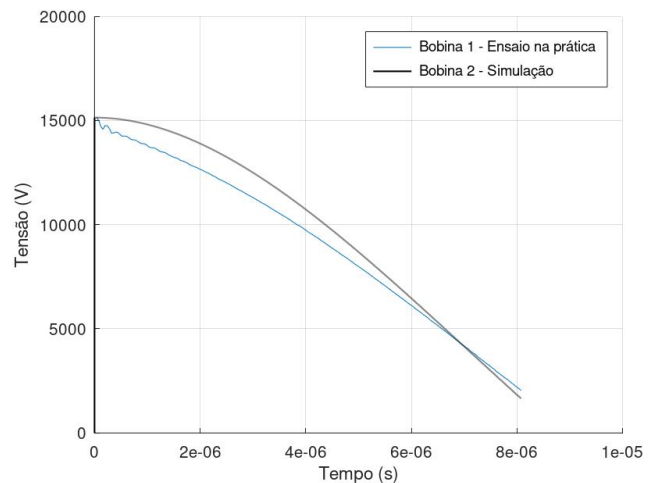
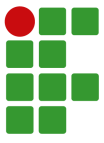


Fig. 9. Parte inicial da forma de onda. Próprio autor.

Porém, ao comparar o teste executado na prática com a simulação obtida através da modelagem, é visto que essa variação fará com que ocorram variações nos resultados do



EAR. Deste modo todos os ensaios elaborados, foram efetuados seguindo as mesmas condições, para que não ocorressem variações muito abruptas entre os ensaios. Além disso, foi necessário alterar o ponto inicial de comparação com o ensaio prático para inibir o efeito de trepidação inicial, decorrente da transição do interruptor. Em outras palavras, foi realizada a mudança do ponto inicial de avaliação dos dados no cálculo do EAR para eliminar esse efeito do comparativo entre simulação e prática dado que esse fenômeno é uma não idealidade. Em todas as figuras, a curva utilizada como referência, não iniciará em 0 s mas sim em 2 μ s. Assim, casa-se melhor a parte inicial da curva, reduzindo a interferência no valor final do EAR entre resultado simulado e experimental de bobinas boas e bobinas em curto.

C. Simulação da bobina em condições ideais

Conforme visto na Fig. 8, o modelo elaborado apresenta variações de magnitude, ocasionadas pela resistência, e de defasagem, ocasionadas pela indutância. Esses efeitos são provenientes da falta de precisão dos valores internos do aparelho de *surge test*, das bobinas ensaiadas e de fatores externos, que influenciam diretamente nos ensaios. Assim, ocorre a necessidade de realizar pequenos ajustes para o alinhamento do resultado obtido através da simulação e do ensaio na prática.

1) *Ajuste da indutância:* A frequência natural amortecida do sinal obtido pelo *surge test* dependerá de três fatores: L_{eq} , R_{eq} e C_{eq} . No caso deste estudo, haverá apenas um componente com propriedade capacitiva, isto é, $C_{eq} = C_0$, sendo este o mais fácil de ser obtido. Já para as outras duas situações, há diversos fatores envolvidos, que impossibilitam a correta medição. Desse modo, foram mantidos fixos os parâmetros cujos dados foi possível obter; aos demais, foram realizados ajustes até o casamento da defasagem das ondas.

Desse modo, foram realizados diversos ensaios, alterando os valores de L_{eq} , indicados na Tabela I. Conforme descrito anteriormente, não serão fornecidos nenhum valor de indutância ou resistência das bobinas testadas, por questões de segredo industrial, de acordo com a lei de propriedade intelectual (9.279/96) [38], apenas fornecidos os valores do equipamento testado. A partir deste ponto, os testes serão numerados, conforme a sequência de cada ensaio.

N° do teste	EAR
Teste 1	90,81%
Teste 2	41,12%
Teste 3	33,47%

A primeira linha da Tabela I indica o valor de EAR relativo à indutância medida diretamente em uma bobina de um aerogerador eólico. Contudo de acordo com a Fig. 10, não é diretamente aplicável ao modelo, pois não ocorre o alinhamento

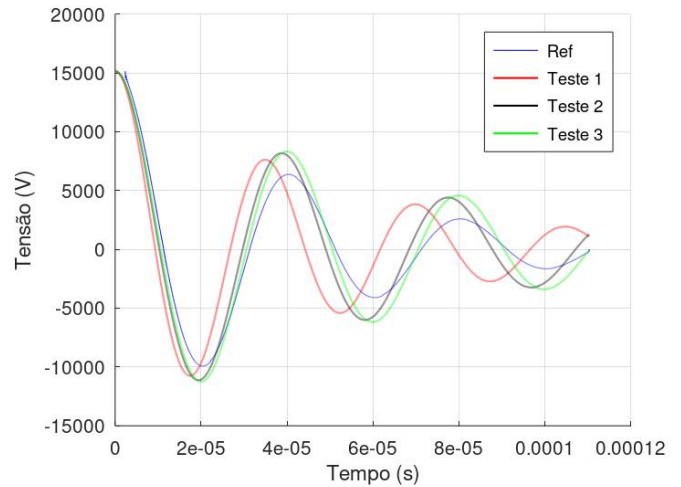


Fig. 10. Ajuste do L_{eq} . Próprio autor.

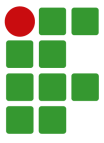
entre as duas formas de onda. A segunda linha da Tabela I indica o valor de indutância calculado através de (9). Visualizando a Fig. 10, é possível notar uma melhor coerência, porém, ainda não é satisfatório. Por isso, foi necessário realizar alguns ajustes finos, devido a pequenas variações que não foram possíveis de serem mensuradas pelos equipamentos que estavam disponíveis, indicados na terceira linha da Tabela I.

Assim, a Fig. 10 contém quatro formas de onda, sendo uma a referência do ensaio e as outras três os ajustes efetuados para o casamento da defasagem.

2) *Ajuste da resistência:* O manual técnico do *surge test* do fabricante Schleich não apresenta os valores de resistência interna, R_0 . Assim, há uma grande dificuldade no ajuste do pico das formas de onda simulada, uma vez que essa resistência é muito superior a resistência da bobina e é o principal elemento dissipador da energia do ensaio. Desse modo, foram elaborados diversos ensaios, e foram alterados os valores de R_0 (Tabela II), até ser possível a obtenção do alinhamento dos picos. O valor inicial escolhido foi de 12,0 Ω por este ser o valor encontrado em alguns manuais de outros fabricantes [40] e [41]. Os demais valores, como indutância e resistência das bobinas, foram mantidos constantes.

N° do teste	R_0	EAR
Teste 4	12,0 Ω	33,47%
Teste 5	17,0 Ω	5,56%
Teste 6	17,5 Ω	4,22%
Teste 7	18,0 Ω	4,99%

De acordo com os dados da Tabela II, o valor mais coerente de R_0 , é de 17,5 Ω . Valores de resistores com casas decimais não são muito usuais. O valor mais coerente deveria ser de 16,0 Ω ,



porém é preciso levar em consideração a resistência interna do capacitor, que neste caso é de aproximadamente $1,5 \Omega$.

Assim, a Fig. 11 contém cinco formas de onda, onde uma é a referência do ensaio e as outras quatro são os ajustes efetuados para o casamento do pico.

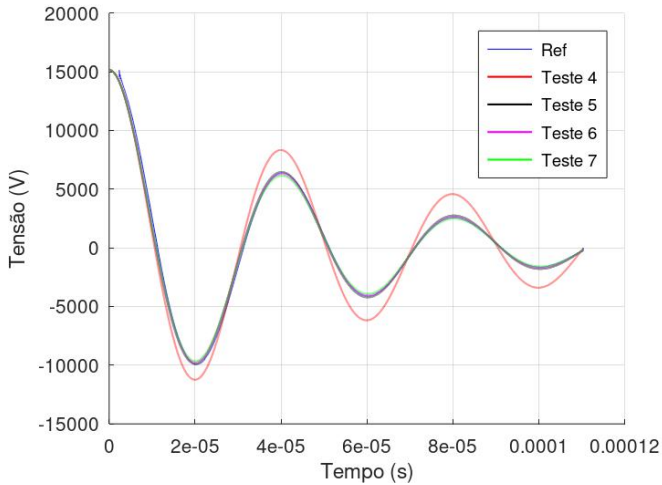


Fig. 11. Ajuste do R_0 . Próprio autor.

A Fig. 12, foi ampliada, para uma melhor visualização das variações das curvas, conforme o ajuste de R_0 .

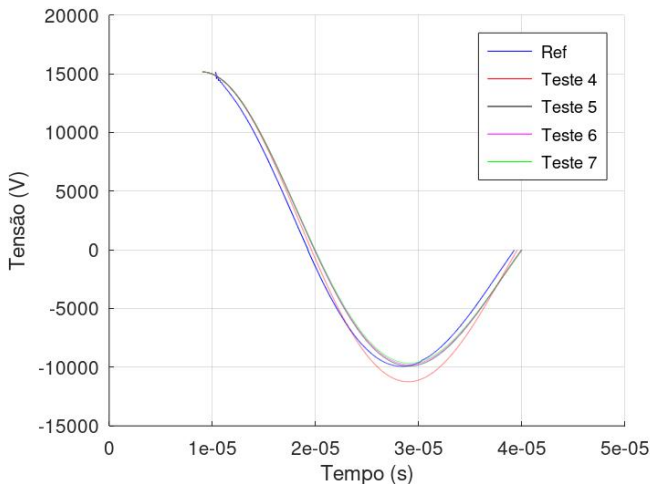


Fig. 12. Curva ampliada do ajuste do R_0 . Próprio autor.

Com os dois principais valores ajustados, L_{eq} e R_0 , é possível determinar que o modelo, para bobinas de aerogeradores sem a presença de um pacote de chapas magnéticas, é válido para a comparação de ensaios que estejam considerados aprovados. Constata-se isso a partir da visualização das curvas na Fig. 11 e dos resultados apresentados na Tabela II, em que verifica-se EAR de 4,22% (inferior a 5,0%). O casamento não é perfeito devido às razões explicadas anteriormente.

Nota-se que o valor de resistência interna do *surge* influencia

na magnitude da forma de onda, enquanto o valor da indutância da bobina influencia na defasagem. Conseqüentemente, ambos alteram o valor do EAR. Destaca-se também que ambos os parâmetros influenciam na frequência natural amortecida.

D. Simulação da bobina em condições não ideais

Com o modelo validado para as condições sem a presença de um curto entre espiras, o intuito agora é a verificação se o modelo identifica a presença de um curto entre espiras. Para esse efeito, foi danificada propositalmente uma bobina, e é sabido o local exato do curto.

Ao utilizar os dados da bobina curto-circuitada no modelo computacional, gerou-se uma forma de onda diferente do esperado, conforme Fig. 13.

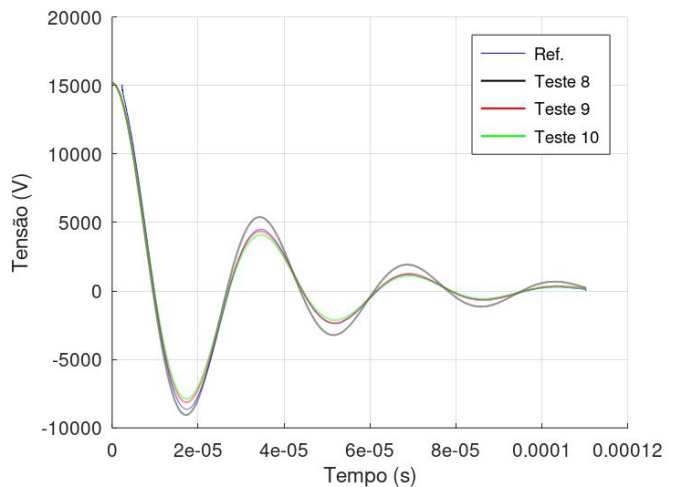


Fig. 13. Ensaio de curto-circuito considerando diferentes valores de R_0 . Próprio autor.

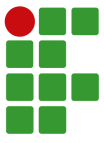
Nota-se que, a defasagem das curvas está coerente, porém o valor da amplitude da curva simulada está menor do que a curva testada. Aumentando os valores de R_0 , esse problema é resolvido. Na Tabela III, estão listadas as três situações indicadas e seus respectivos valores de EAR.

TABELA III

Valores simulados para uma bobina com curto entre espiras

N° do teste	R_0	EAR
Teste 8	$17,5 \Omega$	19,52%
Teste 9	$21,0 \Omega$	5,42%
Teste 10	$22,0 \Omega$	8,15%

Esse aumento de R_0 para casos onde há a presença de um curto entre espiras não deve ser efetuado, apenas deve-se alterar os parâmetros medidos da bobina. Assim, uma hipótese levantada para essa situação está na proteção interna do aparelho de *surge test*, visto que está sendo aplicada a tensão máxima suportada pelo aparelho. Com a presença de um curto na bobina ensaiada, a resistência e indutância da bobina serão menores



e, conseqüentemente, haverá um aumento de energia dissipada pelo capacitor C_0 . Portanto, para que não haja avarias em seus componentes, o aparelho limita a energia máxima dissipada.

Como essa condição é aplicada a todos os ensaios executados, essa limitação não irá omitir ou resultar em um ensaio falso-positivo ou falso-negativo. Mas, ao ser comparado com o modelo que não contém essa limitação física, haverá a divergência.

E. Simulação da bobina em condições não ideais, com tensão reduzida

O efeito de limitação do aparelho é possível de ser identificado ao ser executado o ensaio com as mesmas condições, porém, com um nível de tensão inferior. Neste ensaio, utilizou-se 6 kV e, ao ser comparado com o modelo, não foi necessário alterar o valor de R_0 de $17,5 \Omega$ para $21,0 \Omega$. Utilizou-se, também, uma bobina sem a presença de um curto entre espiras, a fim de verificar a curva. Nessa situação, também obteve-se resultados satisfatórios. Na Fig. 14 constam as curvas para as duas situações e na Tabela IV estão os valores de resistência e EAR para cada teste.

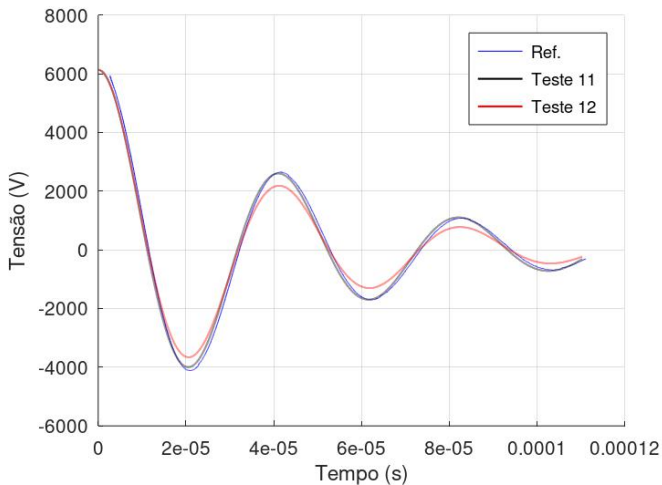


Fig. 14. Curva com curto-circuito com tensão de 6 kV. Próprio autor.

TABELA IV
Valores simulados com variação de tensão

Nº do teste	R_0	EAR
Teste 11	$17,5 \Omega$	3,31%
Teste 12	$21,0 \Omega$	15,21%

Neste caso, ficou evidente duas situações, a primeira é que não é necessário estar sendo alterado o valor de R_0 , o valor de $17,5 \Omega$ do Teste 11 é satisfatório. O segundo ponto, é a existência da limitação do aparelho *surge test*, em casos onde há a ocorrência de curto-circuitos.

F. Simulação do modelo

Após todos os parâmetros serem definidos e válidos para as duas condições — quer sejam bobinas em boas e péssimas condições de isolamento entre as espiras —, são efetuados diversos testes, verificados na Tabela V, que buscam identificar as curvas obtidas pelo modelo de acordo com um curto-circuito cuja posição na bobina é variável.

TABELA V
Variações dos parâmetros

Nº do teste	Espira curto-circuitada	EAR
Teste 13	1	14,62%
Teste 14	2	22,69%
Teste 15	3	30,86%
Teste 16	5	46,96%
Teste 17	10	80,49%
Teste 18	20	100,72%

Conforme os testes efetuados na Tabela V, é possível verificar que um curto-circuito no início da bobina contém um percentual de EAR inferior a um curto em uma posição mais ao centro, por exemplo. Esse efeito ocorre, devido a variação dos parâmetros L_{p2} e R_{p2} influenciados pela presença do curto-circuito. Desse modo, os valores de R_{eq} e L_{eq} serão menores, fazendo com que haja alteração na frequência natural amortecida.

Se o operador fosse utilizar o método visual, para identificação de falhas nas curvas da Fig. 15, para curtos entre espiras com uma, duas e três espiras, haveria uma grande dificuldade na identificação. Visto pela similaridade das curvas. Porém, ao utilizar o método do EAR em conjunto com as informações clarificadas pela simulação, essa identificação tornou-se mais racional, sendo menos empírica.

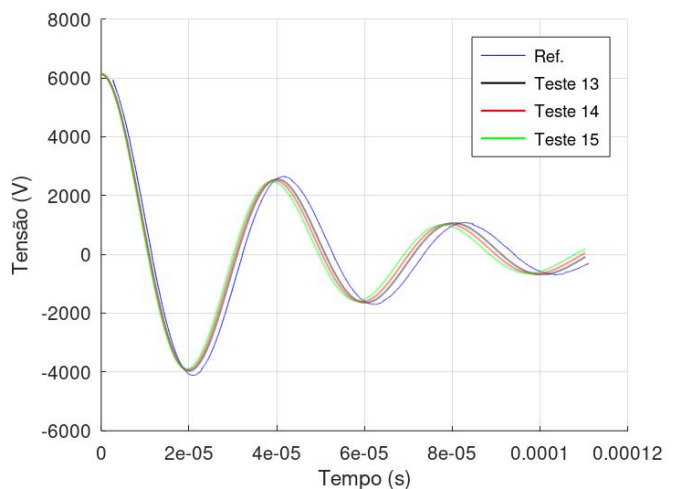


Fig. 15. Testes 13, 14 e 15. Próprio autor.

Para os casos mais expressivos, verificados na Fig. 16, não existiria dúvida de identificação tanto por abordagem



visual quando percentual. Porém, estes casos verificados são hipotéticos e dificilmente seriam encontrados durante o processo fabril.

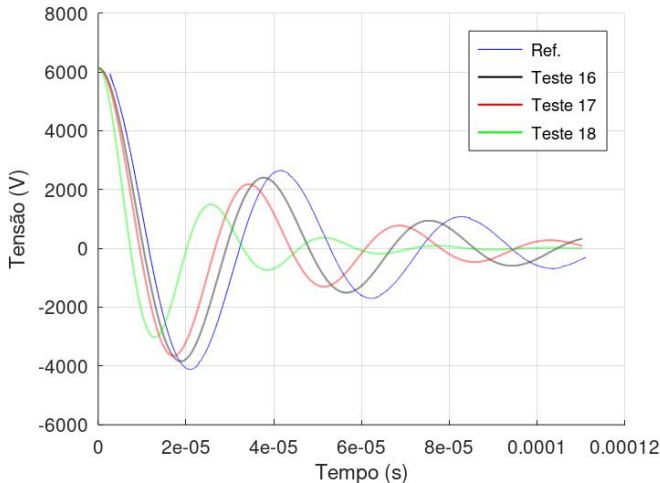


Fig. 16. Testes 16, 17 e 18. Próprio autor.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi possível realizar a modelagem de uma bobina de aerogerador sem a presença do núcleo e comparar com ensaios de *surge test* realizados na prática com uma precisão de aproximadamente 4,22% de variação, quando aplicado 15 kV e 3,31%, no ensaio com tensão reduzida para 6 kV. Essa variação já era prevista devido a fatores externos e físicos que diferem de um ensaio para outro, mesmo na fidelidade da posição nas repetições dos ensaios.

Assim, esse trabalho procurou investigar um problema comum em um *surge test*: caso o valor de EAR esteja em torno de 10,0%, existe de fato um pequeno curto entre espiras ou essa é apenas uma variação normal? Essa pergunta é feita considerando a possibilidade de otimizar um processo fabril que eventualmente pode desperdiçar recursos com investigações desnecessárias ou, pior, entregar ao cliente um equipamento com falha de isolamento.

Com o modelo elaborado, foi possível avaliar a relação entre o EAR e um curto entre espiras, de modo que constatou-se que para pequenos curtos-circuitos há realmente pouca discrepância visual entre as curvas. Porém, para valores de EAR inferiores a 15,0% (e superiores a 10,0%), constatou-se que é possível caracterizar o resultado como um curto entre espiras.

Outro ponto interessante é a constatação da ativação de proteção de sobrecorrente do *surge test*, quando há um curto entre espiras mais severo na bobina ensaiada com tensão de 15 kV. Essa proteção é importante para que nenhum componente do *surge test* sofra avarias. Isso só foi possível constatar ao ser ensaiada e comparada a mesma bobina com curto em dois níveis de tensão diferentes. Adaptando o modelo, foi possível chegar a um resultado bastante próximo ao obtido pelo *surge test*.

O equacionamento através das equações de Euler-Lagrange, mostrou a praticidade na manipulação dos modelos de bobinas, completo e simplificado. Percebe-se que, há uma complexidade matemática para determinação de um modelo inicial, porém a manipulação deste torna-se mais prática, para a identificação dos fenômenos que estavam sendo estudados.

Foi verificada, também, a ineficácia do método visual entre as curvas, de referência e testada. O método de cálculo EAR realmente é importante para a identificação de falhas que não são percebíveis visualmente. Além disso, o próprio equipamento já fornece em seu laudo a informação do EAR, que não deve ser desprezada pelo operador.

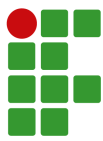
Ficou nítido, a importância e necessidade das melhorias contínuas em um processo fabril, para que haja a redução e/ou detecção de falhas em seus produtos. Garantindo assim, uma maior eficiência e qualidade entregue a seus clientes e fornecedores.

Neste trabalho, as bobinas foram ensaiadas separadamente e sem estarem inseridas no pacote. Por isso, para continuidade desse trabalho, propõe-se um estudo para a detecção de curto entre espiras após as bobinas serem inseridas, e no processo final, quando as bobinas estão impregnadas. Para esses casos, será necessária a utilização do modelo completo de uma bobina.

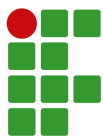
Outro estudo que pode ser realizado, é a utilização de outros métodos matemáticos para solucionar as equações diferenciais. Como por exemplo, método de Runge-kutta, que contém um erro de aproximação inferior ao método de Euler. Comparando os resultados com o modelo obtido através do método de Euler, no intuito de verificar as variações percentuais atreladas devido ao método numérico empregado.

REFERÊNCIAS

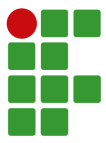
- [1] R. S. do Nascimento, G. M. Alves, “Fontes Alternativas e Renováveis de Energia no Brasil: Métodos e Benefícios Ambientais”, in *XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica*, 2016.
- [2] “Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro”, *Ministério de Minas e Energia Secretária de Energia Elétrica Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico*, Novembro, 2021.
- [3] ONS, “Matriz de energia elétrica do SIN”, URL: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- [4] M. B. d. C. Salles, *Modelagem e análises de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- [5] I. d. S. A. d. Fonseca, *Manutenção de sistemas de geração de energia renovável eólica através de redes IP*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [6] B. Hahn, M. Durstewitz, K. Rohrig, “Reliability of Wind Turbines. Wind Energy”, *Springer*, pp. 329–333, 2007.



- [7] M. F. Tariq, A. Q. Khan, M. Abid, G. Mustafa, “Data-Driven Robust Fault Detection and Isolation of Three-Phase Induction Motor”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 6, pp. 4707–4715, 2019.
- [8] “IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines”, *IEEE Std 522-2004 (Revision of IEEE Std 522-1992)*, pp. 1–28, 2004.
- [9] S. Saeed, J. Garcia, M. S. Perdigão, V. S. Costa, R. Georgious, “Evaluation of temperature effect on inductance computation in variable magnetic components for Dual-Active-Bridge application”, in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3286–3292, 2020.
- [10] O. Thorsen, M. Dalva, “Failure identification and analysis for high voltage induction motors in petrochemical industry”, in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)*, vol. 1, pp. 291–298, 1998.
- [11] H. H. C. Pinheiro, *Sistema para detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução utilizando lógica fuzzy*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.
- [12] S. Nandi, H. Toliyat, X. Li, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, 2005.
- [13] L. Filho, P. C. Monteiro, *Monitoramento permanente de motores de indução trifásicos.*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [14] R. Sharifi, M. Ebrahimi, “Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring”, *ISA Transactions*, vol. 50, pp. 14–20, 2011.
- [15] A. L. M. Rodrigues, *Estudo comparativo de sistemas de isolamento em motores MT*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2010.
- [16] A. Bonnett, G. Soukup, “Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, 1992.
- [17] “IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage”, *ANSI/IEEE Std 95-1977*, pp. 1–27, 1977.
- [18] V. N. Höpner, V. E. Wilhelm, “Modelo eletrotérmico para determinação da durabilidade do enrolamento de motores elétricos alimentados com tensão PWM”, in *XI Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, 2019.
- [19] “IEEE Draft Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, *IEEE P519/D6ba, September 2013*, pp. 1–26, 2013.
- [20] “Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 r/min a 5000 r/min”, *NBR10082*, 2021.
- [21] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu, T. G. Habetler, “A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, 2008.
- [22] A. P. Arya, *Introduction to Classical Mechanics*, 2a ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- [23] R. Fowles, J. W. Jewet, *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 7a ed., Thomson Learning Inc., Connecticut, 2008.
- [24] A. H. Panuluh, A. Damanik, “Lagrangian for RLC circuits using analogy with the classical mechanics concepts”, *Department of Physics Education, Sanata Dharma University*, pp. 1–6, 2017.
- [25] L. Nascimento, “A dinâmica Lagrangeana do pêndulo duplo”, pp. 129–136, 2018.
- [26] D. A. Welss, “A Power Function for the Determination of Lagrangian Generalized Forces”, *Journal of Applied Physics*, vol. 16, pp. 535–538, 1945.
- [27] A. F. Neto, A. M. de Oliveira, G. Lmabert-Torres, F. A. Lotufo, “Formulação Lagrangeana para Circuitos Eletromecânicos”, in *Revista Seleção Documental/GLPA*, pp. 15–21, 2011.
- [28] A. Szatkowski, “Remark on “Explicit topological formulation of Lagrangian and Hamiltonian equations for nonlinear networks””, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 26, no. 5, pp. 358–360, 1979.
- [29] B. Jacob, *Surge test values and diagnostics for ITIG II*, Electrom Instruments, 2016.
- [30] J. Wilson, *Current state of surge testing induction machines*, Baker Instrumente Company, 2003.
- [31] D. A. Asfani, D. C. Riawan, M. Y. Negara, D. Fahmi, M. F. Anshori, M. Wahyudi, “Evaluation of Rotor Position Effect on Stator Diagnostic Based on Surge Voltage Test”, in *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, pp. 164–168, 2017.
- [32] A. S. Guedes, *Estudo e Proposição de Técnicas para a Avaliação do Isolamento em Motores de Indução Trifásicos de Baixa e Média Tensão*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- [33] T. Gaerke, N. Lang, “A Problematic Field Experience Using Surge Testing”, in *Electrical Insulation Conference (EIC)*, pp. 352–354, 2020.
- [34] A. E. Fitzgerald, *Máquinas elétricas*, 6a ed., McGraw-Hill, São Paulo, 2006.
- [35] E. Bim, *Máquinas elétricas e Acionamento*, 3a ed., Elsevier, Rio de Janeiro, 2014.

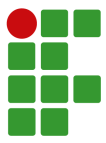


- [36] M. Michna, A. Wilk, M. Ziółko, M. Wołoszyk, L. Swędrowski, P. Szwangruber, “Detection of interturn faults in transformer winding using the capacitor discharge method”, *Open Phys*, pp. 979–983, 2017.
- [37] G. Baratto, *Solução de equações diferenciais ordinárias usando métodos numéricos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- [38] Brasil, “Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996”, *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 1996, URL: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9279.htm.
- [39] Schleich, “MTC2 15kV”, , 2021, URL: <https://www.schleich.com/en/product/mtc2-en/>.
- [40] EMC Partner, *Datasheet Surge Testers*, 2002.
- [41] 3cTest, *Combination Wave Surge Immunity Test Simulator - Datasheet*, 2021, v1.1.

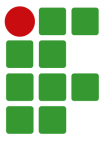


ANEXO 1 - *SCRIPT DA SIMULAÇÃO*

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4
5 #Parametros da simulacao
6 dt = 2e-9; %Intervalo de tempo
7 tmax = 0.001103353; %Tempo maximo, similar ao aparelho de surge
8 npontos = round(tmax/dt); %Numero de pontos inteiros
9
10 #Parametros do sistema
11 L0 = 0.05e-9; %Indutancia do aparelho de surge test
12 Msc = XX; %Indutancia de curto
13 L1 = XX; %Indutancia da bobina, parte sem curto
14 L2 = XX; %Indutancia da bobina, parte com curto
15 L12 = XX; %Indutancia mutua entre as duas partes da
16 bobina
17 R0 = 17.5; %Resistencia do surge
18 Rsc = XX; %Resistencia do curto
19 R1 = XX; %Resistencia da bobina, parte sem curto
20 R2 = XX; %Resistencia da bobina, parte com curto
21
22 C0 = 100e-9; %Capacitancia do aparelho de surge test
23
24 q1p = 0; %Corrente ip1, sendo considerado 0A
25 q2p = 0; %Corrente ip2, sendo considerado 0A
26 inicialmente
27 v = 15158.15; %Tensao maximo do ensaio executado na
28 q1 = C0*v; %Condicao inicial de carga q1
29
30 #Vetores para memoria
31 Q1p = zeros(npontos,1); %Vetor da corrente ip1
32 Q2p = zeros(npontos,1); %Vetor da corrente ip2
33 Q1 = zeros(npontos,1); %Vetor da carga q1
34 T = zeros(npontos,1); %Vetor do tempo
35 V = zeros(npontos,1); %Vetor da tensao do ensaio
36
37 #Atualizacao dos vetores de memoria
38 Q1(1) = q1;
39 V(1) = v;
```



```
40 k = 0;
41
42 R = [R0+R1+Rsc -Rsc;-Rsc R2+Rsc];           %Matriz R, das resistencias
                                                do circuito do ensaio
43 M = [L0+Msc+L1 -Msc+L12;-Msc+L12 Msc+L2]; %Matriz M, das indutancias
                                                do circuito do ensaio
44 Minv = inv(M);                             %Matriz M inversa
45
46 qsol = [q1p;q2p];                          %Vetor das correntes ip1 e ip2
47
48 for t = 0:dt:tmax                          %Loop para resolucao das equacoes
                                                diferencias, dentro do passo de
                                                tempo dt ate tmax.
49
50 k = k+1;
51 vq = [q1/C0;0];                          %vetor da tensao, de acordo com a
                                                carga q1
52 dqsol = dt*Minv*(-R*qsol-vq);            %calculo da derivada temporal das
                                                correntes ip1 e ip2
53 dq1 = dt*q1p;                             %calculo da derivada temporal da
                                                carga q1
54
55 #Incremento da equacao de Euler
56 qsol = qsol+dqsol;
57 q1 = dq1+q1;
58
59 %Atualizacao das variaveis
60 q1p = qsol(1);
61 q2p = qsol(2);
62
63 #Atualizacao dos vetores de memoria
64 Q1(k) = q1;
65 Q1p(k) = q1p;
66 Q2p(k) = q2p;
67 V(k) = q1/C0;
68 T(k) = t;
69 end
70
71 Ma = dlmread("Ensaio_bob_1.csv",";",49,0); %Leitura do arquivo .CSV
                                                obtido pelo aparelho
72 time = Ma(:,1)*(0.001103353);             %Alocacao da coluna 1 para tempo
73 Data = Ma(:,2);                          %Alocacao da coluna 2 para tensao
74 Mpontos = size(Ma)(1);                   %Definicao do vetor de linha com
                                                tamanho de acordo com a quantidade
                                                de linhas do arquivo .CSV
75
```



```
76
77 #Vetores para memoria
78 Vamost = zeros(Mpontos,1);           %Vetor da tensao
79 Tamost = zeros(Mpontos,1);         %Vetor do tempo
80 rel_amost = round(npontos/Mpontos); %Numero de pontos inteiros
81 k = rel_amost -1;
82 j = 1;
83
84 #Criacao de um loop para a atualizacao dos vetores de memoria
85 for i = 1:npontos
86     k = k+1;
87     if k >= rel_amost
88         k = 0;
89
90         Vamost(j) = V(i);
91         Tamost(j) = T(i);
92         j = j+1;
93     end
94
95 end
96
97 Vamost(1,1) = V(1,1);
98
99 #Criacao dos graficos do ensaio na pratica (dados do arquivo .CSV) e
100 #da simulacao (utilizacao dos vetores de memoria)
101 figure
102 hold on;
103 grid on;
104 plot(time,Data,'b')
105 plot(T,V,'r','LineWidth',[1])
106 xlabel "Tempo(s)";
107 ylabel "Tensao(V)";
108 legend('Bobina 1 - Ensaio na pratica','Bobina 2 - Simulacao');
109
110
111 #Calculo do EAR, comparado entre a simulacao e o ensaio
112 soma_sup = 0;
113 soma_inf = 0;
114 for i = 1:Mpontos
115     soma_sup = soma_sup+abs(Data(i) - Vamost(i));
116     soma_inf = soma_inf+abs(Data(i));
117 endfor
118
119 EAR = (soma_sup/soma_inf)*100 %Valor do EAR indicado em percentual
```

Alexsandro Luan Mittmann

ESTUDO DO CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS EM BOBINAS DE GERADORES EÓLICOS BASEADO NA
MODELAGEM POR EQUAÇÕES DE *EULER-LAGRANGE* E AVALIADO POR *SURGE TEST*.

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 09 de fevereiro de 2022.

Prof. Dr. Arthur Garcia Bartsch
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Prof. Dr. José de Oliveira
UDESC/CCT

Prof. Dr. Denivaldo Pereira da Silva
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Prof. MSc John Jefferson Antunes Saldanha
Coorientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau



Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)
Certificado de assinatura gerado em 09/02/2022 às 12:06:57 (GMT -3:00)

TermoDeAprovacao_TCC_EngEletrica_IFSC_JGS_RAU_09022022_ALEXSANDRO
LUAN MITTMANN.pdf

ID única do documento: #2bc8ecf2-5f02-4a25-bc46-0458103bd0e3

Hash do documento original (SHA256): e058ef4b8ea13a6fd4a2068243f4f1456688e62f50c160aff2d41073e98fb2d2

Este Log é exclusivo ao documento número #2bc8ecf2-5f02-4a25-bc46-0458103bd0e3 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

Assinaturas (4)

- ✓ José de Oliveira (Participante)
Assinou em 09/02/2022 às 16:23:20 (GMT -3:00)
- ✓ Arthur Garcia Bartsch (Participante)
Assinou em 09/02/2022 às 12:09:33 (GMT -3:00)
- ✓ Denivaldo Pereira da Silva (Participante)
Assinou em 09/02/2022 às 20:58:33 (GMT -3:00)
- ✓ John Jefferson Antunes Saldanha (Participante)
Assinou em 09/02/2022 às 15:26:43 (GMT -3:00)

Histórico completo

Data e hora

09/02/2022 às 12:06:58
(GMT -3:00)

Evento

Arthur Garcia Bartsch solicitou as assinaturas.

Data e hora

09/02/2022 às 12:09:33
(GMT -3:00)

Evento

Arthur Garcia Bartsch (Autenticação: e-mail arthur.bartsch@ifsc.edu.br; IP: 179.223.196.136) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

09/02/2022 às 15:26:43
(GMT -3:00)

John Jefferson Antunes Saldanha (Autenticação: e-mail john.saldanha@ifsc.edu.br; IP: 131.100.95.34) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

09/02/2022 às 16:23:20
(GMT -3:00)

José de Oliveira (Autenticação: e-mail jose.oliveira@udesc.br; IP: 191.245.88.135) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

09/02/2022 às 20:58:33
(GMT -3:00)

Denivaldo Pereira da Silva (Autenticação: e-mail denivaldo.silva@ifsc.edu.br; IP: 131.100.93.24) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

09/02/2022 às 20:58:33
(GMT -3:00)

Documento assinado por todos os participantes.