

OBTENÇÃO DA INDUTÂNCIA TRANSITÓRIA DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

OBTAINING A TRANSIENT INDUCTANCE OF A SYNCHRONOUS MACHINE BY USING THE FINITE ELEMENTS METHOD

OBTENCIÓN DE UNA INDUCTANCIA TRANSITORIA DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA USANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Vitor Anecchini Schmid¹

Artigo recebido em outubro de 2022

Artigo aceito em fevereiro de 2023

RESUMO

O artigo objetiva a apresentação de um método computacional para a obtenção da indutância transitória de eixo direto (L_d') de uma máquina síncrona com menor margem de erro possível. Este método se baseia na simulação do ensaio de resposta em frequência da máquina mediante a remoção de seus enrolamentos amortecedores. Com essa abordagem, foi possível obter o referido parâmetro com margem de erro abaixo de 2,65%. A maior contribuição deste trabalho está relacionada à fase de projeto da máquina síncrona, já que, com a utilização do método apresentado, sua indutância transitória de eixo direto (L_d') pode ser determinada antes de sua construção. Dessa forma, caso o referido valor de indutância seja insatisfatório para as aplicações desejadas, o projeto pode ser modificado sem a necessidade de construções de protótipos ou testes de laboratório.

Palavras-chave: Elementos Finitos. Indutância Transitória. Ensaio de Resposta em Frequência. Software Maxwell.

ABSTRACT

This article aims to present a computational method for obtaining the transient inductance of direct axis (L_d') of a synchronous machine with the smallest possible margin of error. This method is based on the simulation of the machine's frequency response test by removing its damper windings. With this approach, it was possible to obtain the aforementioned parameter with a margin of error below 2.65%. The greater contribution of this work is related to the design phase of the synchronous machine, since, with the use of the presented method, its direct axis transient inductance (L_d') can be determined before

¹ Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo e mestre em Sistemas de Potência pela Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: vitoranecchini@hotmail.com. Orcid: 0000-0002-4498-6671.

its construction. This way, if said inductance value is unsatisfactory for the desired applications, the project can be modified without the need for prototype constructions or laboratory tests.

Keywords: Finite Elements. Transient Inductance. Frequency Response Test. Maxwell Software.

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar un método computacional para obtener la inductancia transitoria del eje directo (L_d') de una máquina síncrona con el menor margen de error posible. Este método se basa en la simulación de la prueba de respuesta de frecuencia de la máquina mediante la eliminación de sus devanados amortiguadores. Con este enfoque fue posible obtener el mencionado parámetro con un margen de error inferior al 2,65%. El mayor aporte de este trabajo está relacionado con la fase de diseño de la máquina síncrona, ya que, con el uso del método presentado, se puede determinar su inductancia transitoria en el eje directo (L_d') antes de su construcción. De esta forma, si dicho valor de inductancia no es satisfactorio para las aplicaciones deseadas, se puede modificar el proyecto sin necesidad de construcciones de prototipos o pruebas de laboratorio.

Palabras clave: Elementos Finitos. Inductancia Transitoria. Prueba de Respuesta en Frecuencia. Software Maxwell.

1 INTRODUÇÃO

Máquinas síncronas são elementos essenciais em sistemas de potência modernos. São usadas principalmente como geradores de corrente alternada para fornecer a energia elétrica utilizada nos mais diversos setores das sociedades moderna. Segundo Pivetta (2019), dentre suas aplicações diretas estão o uso em hidroeletricidade, termoeletricidade e uso como turbina a vapor. Seu princípio de funcionamento, de acordo com Hord (2014), é a lei de indução de Faraday, que afirma que um campo magnético variável induzirá corrente em um condutor próximo.

Os valores de indutâncias e constantes de tempo de uma máquina síncrona são de grande utilidade no campo de sistemas de potência e, em anos recentes, o interesse em sua determinação precisa tem aumentado (Elrachid et al, 2022). Dentre suas principais aplicações estão: operação desbalanceada, controle de tensão e frequência, determinação de limites de operação, estabilidade transitória, entre outros (Zambrano, 2003).

A determinação de tais parâmetros em uma máquina rotativa, ainda em sua fase de concepção, é de grande interesse por parte dos projetistas, já que permite um estudo antecipado e uma predição de comportamentos da máquina no conjunto ao qual está inserida (Nabeta et al, 1998). Nesse contexto, uma ferramenta de grande utilidade é o método numérico dos Elementos Finitos, amplamente utilizado nos dias atuais por sua alta capacidade e precisão na determinação de parâmetros em sistemas físicos diversos.

No caso específico de uma máquina síncrona, há mais de uma forma de determinação dos referidos parâmetros. Tradicionalmente, são utilizados ensaios ou simulações computacionais no domínio do tempo para tal finalidade devido a sua simplicidade e menor esforço computacional. Todavia, com o advento de softwares de Elementos Finitos mais modernos e computadores com maior capacidade de processamento, as simulações

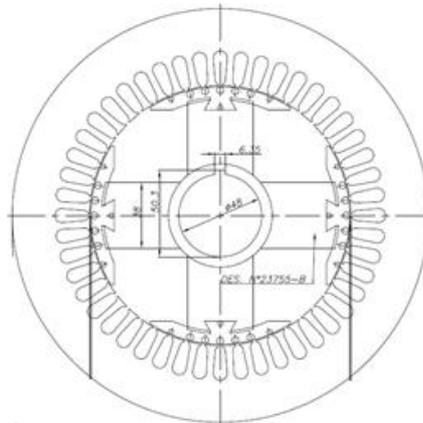
computacionais de ensaios de resposta em frequência se tornaram mais acessíveis e com resultados igualmente satisfatórios.

Uma etapa particularmente desafiadora do ensaio de resposta em frequência de uma máquina síncrona é a remoção de seus enrolamentos amortecedores, procedimento necessário para a determinação de sua indutância transitória, e que na prática, nem sempre pode ser realizado sem danificá-la. Com o método computacional dos elementos finitos, entretanto, é possível utilizar técnicas sofisticadas para a simulação desta etapa do ensaio e obter o referido parâmetro com baixa margem de erro, sendo este o foco do presente trabalho.

O objetivo deste projeto consiste na realização de uma simulação computacional de parte do ensaio de resposta em frequência (SSFR) de uma máquina síncrona pelo método dos elementos finitos. O procedimento terá como foco a obtenção da indutância transitória de eixo direto (L_d') da máquina mediante simulação da remoção de seus enrolamentos amortecedores. Segundo Jaros (2019), a validação do ensaio de resposta em frequência deve ser feita em uma máquina com parâmetros já conhecidos. Na máquina utilizada no presente artigo, o L_d' foi previamente obtido através de ensaios no domínio do tempo e vale $L_d'=16,15\text{mH}$. Ao final da simulação, este parâmetro servirá como base para atestar a precisão do resultado obtido.

A máquina síncrona, base deste trabalho está representada na Figura 1.

Figura 1 - Desenho da máquina síncrona



Fonte: Fabricante da máquina

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicia-se o referencial teórico pelo ensaio de resposta em frequência.

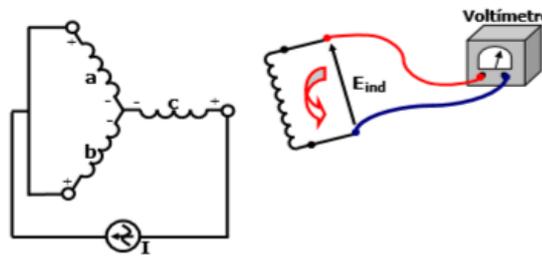
2.1 O ensaio de resposta em frequência

O ensaio de resposta em frequência consiste na aplicação de um sinal de tensão senoidal de frequência ajustável dentro de uma determinada faixa de valores. Com o conjunto de pontos

de tensão e corrente de armadura obtido, é possível plotar a curva de indutância da máquina síncrona no domínio da frequência e posteriormente obter os parâmetros da máquina. Segundo Antal (2017), o ensaio de resposta em frequência é totalmente normatizado pela IEEE e deve ser consultado no texto IEEE (2009).

O primeiro passo para a realização do ensaio é o posicionamento do rotor da máquina no eixo direto ou em quadratura, sendo que no presente trabalho foi adotado como referência o eixo direto. O ensaio no eixo em quadratura é similar e também pode ser realizado com base na norma da IEEE (2009). A Figura 2 apresenta o diagrama de conexões dos enrolamentos da máquina utilizado para determinar o posicionamento do rotor com a finalidade de ensaio no eixo direto.

Figura 2 - Circuito para definição do eixo direto



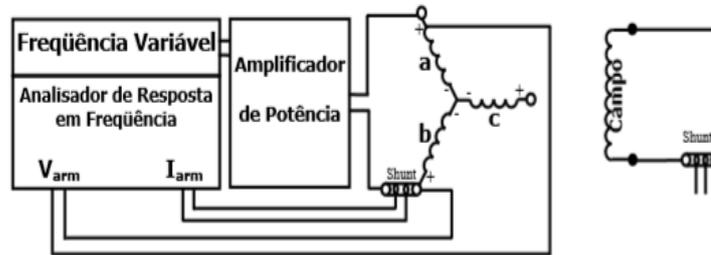
Fonte: Zambrano (2003)

Neste diagrama de conexões, dois terminais das fases são conectados em paralelo. Posteriormente, o circuito resultante é conectado em série com o outro terminal da máquina. Os terminais do circuito são então conectados a uma fonte de corrente senoidal, cuja frequência é de 60Hz. Os terminais do enrolamento de campo são mantidos em circuito aberto, induzindo-se assim uma tensão. A intensidade da tensão induzida varia com a posição do rotor (Zambrano, 2003).

A tensão induzida entre os terminais do circuito de campo será igual a zero quando o eixo direto fica alinhado com o eixo magnético da armadura. Desta maneira, o rotor está posicionado para a realização do ensaio no eixo direto (Zambrano, 2003).

O próximo esquema de ligação, representado na Figura 3, apresenta a configuração dos enrolamentos da máquina para a obtenção da curva de indutância de eixo direto (L_d) no domínio da frequência. Dois enrolamentos do estator são conectados em série e o terceiro fica em circuito aberto. Os terminais ligados em série são ligados através de um amplificador de potência com uma fonte alternada, cuja frequência é variável. Então, os enrolamentos de campo são colocados em curto-circuito e os valores de tensão e corrente na armadura são medidos para o cálculo da indutância.

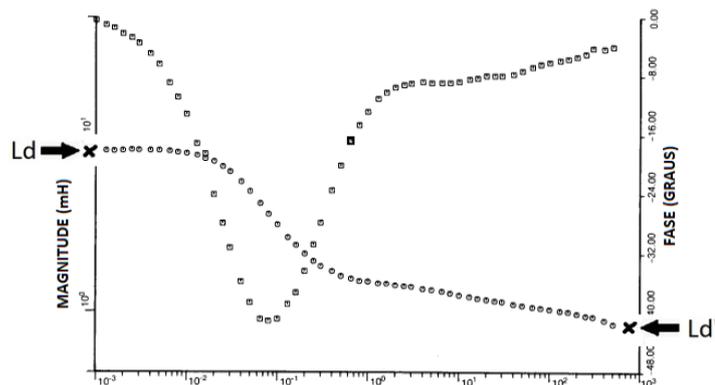
Figura 3 - Configuração dos enrolamentos da máquina para a obtenção de $L_d(s)$



Fonte: IEEE (2009), modificado

Após a realização do ensaio, obtém-se a curva de indutância da máquina no domínio da frequência. O valor da indutância transitória de eixo direto (L_d'), para uma máquina de frequência nominal de 60Hz, é definido por um ponto da curva de indutância referente a qualquer frequência acima de 200Hz, desde que o ensaio seja realizado com prévia remoção dos enrolamentos amortecedores da máquina. A Figura 4 apresenta a curva de indutância padrão para máquinas síncronas segundo a norma da IEEE (2009).

Figura 4 - Indutância de eixo direto de uma máquina síncrona



Fonte: IEEE (2009), modificado

Para a obtenção do valor de L_d' , deve-se então simular os circuitos das Figuras 2 e 3, sendo este último na frequência de 200Hz.

2.2 O método dos elementos finitos

Muitos problemas da física e engenharia são modelados a partir de equações diferenciais de difícil resolução. Para que sejam encontrados resultados exatos para tais modelos matemáticos, devem-se resolver essas equações de forma analítica (Malagoni, 2012). Para geometrias irregulares de máquinas elétricas rotativas, entretanto, a resolução analítica é de tamanha complexidade que acaba por se tornar impraticável. Além disso, Gerber (2011) afirma que máquinas elétricas possuem uma dependência intrínseca de muitas variáveis não lineares, tornando sua modelagem ainda mais difícil.

Para que a análise e projeto de máquinas elétricas seja possível, é usual a utilização de ferramentas computacionais para o equacionamento e resolução de seu modelo. Um dos métodos mais eficientes para essa finalidade é o MEF (Método dos Elementos Finitos), que é descrito por Lotti et al. (2006) como uma ferramenta matemática de discretização de um meio contínuo em elementos menores, mantendo as suas mesmas propriedades. Cada um desses pequenos elementos é então transformado em uma equação diferencial que possa ser resolvida por um modelo matemático pré-definido. Apesar de o algoritmo numérico dos elementos finitos ter sido criado no século XVIII, sua utilização só se popularizou após o surgimento de computadores com capacidade de processamento suficiente para a resolução das milhares de equações diferenciais resultantes do modelo.

Em suma, o método dos elementos finitos transforma uma geometria altamente complexa em pequenos elementos que geram equações mais simples de serem resolvidas.

3 MÉTODO

Inicia-se o método pelo software Maxwell.

3.1 O software Maxwell

O software escolhido para a realização deste projeto em elementos finitos foi o Maxwell/Ansys, por se tratar de um programa com todas as ferramentas necessárias para a realização da simulação em questão, como módulos de configuração de enrolamentos amortecedores, fontes de tensão, configuração de circuitos externos para ligações em paralelo, *solver* para cálculos de tensões induzidas, etc.

O Maxwell trabalha com diferentes *solvers* para diferentes problemas eletromagnéticos. Para o caso do ensaio de resposta em frequência, foi utilizado o *solver Eddy Current* ou *Harmônico Magnético*, que trabalha com modelos estáticos e resolve campos magnéticos senoidais à frequência previamente determinada.

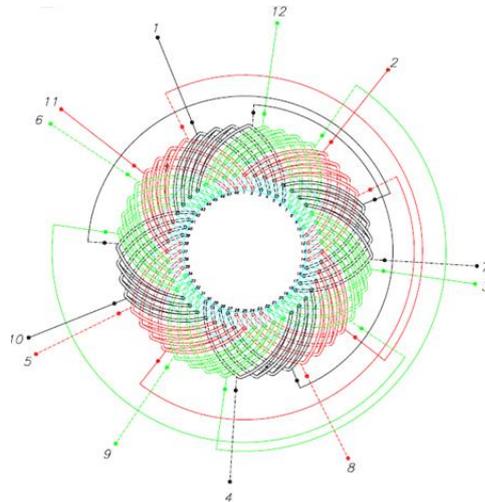
3.2 Modelagem da máquina utilizando o método dos elementos finitos

Para a realização da simulação proposta, foi utilizada uma máquina síncrona de quatro polos e 2KVA de potência. As características e dimensões da máquina são utilizadas para criar o modelo no Maxwell. Inicialmente, os vértices de cada parte da máquina são conectados por linhas, formando diferentes áreas. Uma vez definidas as áreas, os materiais da máquina devem ser atribuídos. O estator e as sapatas dos polos são definidos como aço silício. Já o corpo dos polos é composto por aço de baixo carbono SAE1020 e o eixo da máquina é feito de aço de médio carbono SAE1045, que magneticamente equivale ao SAE1020. As curvas de magnetização de cada um desses materiais são então acrescentadas à biblioteca do Maxwell. Já os enrolamentos do estator e barras amortecedoras são compostas de cobre, que é um material previamente pertencente à biblioteca do Maxwell. Outro aspecto importante da criação do modelo da máquina é a definição do tipo de conexão das bobinas do estator, que no presente

projeto foi a ligação YY. Esta ligação consiste em conectar em paralelo dois pares de bobinas ligadas em série, para cada uma das três fases da máquina, e posteriormente ligá-las em Y.

A Figura 5 apresenta o esquema das ligações dos enrolamentos do estator.

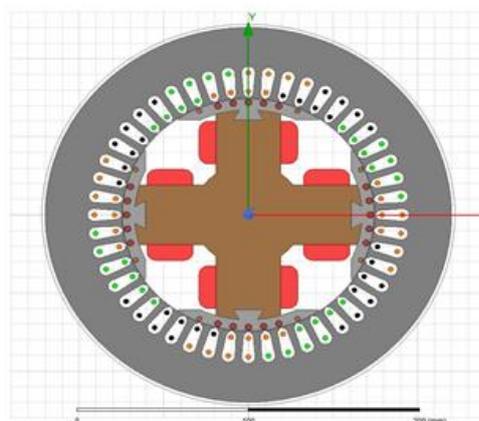
Figura 5 - Esquema dos enrolamentos do estator da máquina



Fonte: fabricante da máquina cedida ao laboratório de máquinas elétricas da USP

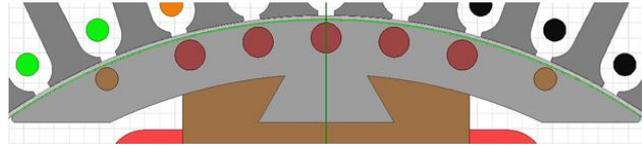
Após a criação da geometria, conexão dos enrolamentos, definição dos materiais e condição de contorno, o passo seguinte foi dividir as áreas em elementos finitos. A Figura 5 representa o modelo completo da máquina síncrona e a Figura 7 representa uma das sapatas polares do estator, região na qual estão os enrolamentos amortecedores.

Figura 6 - Modelo da máquina síncrona no Maxwell



Fonte: autor

Figura 7 – Sapata Polar

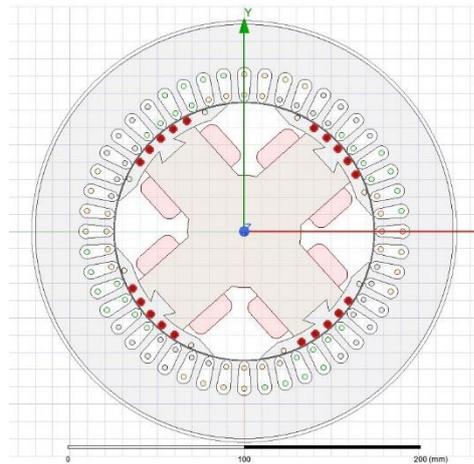


Fonte: autor

As circunferências nas sapatas polares representam os enrolamentos amortecedores. Para simular a remoção destas bobinas, os materiais destas áreas foram definidos como vácuo. Desta forma, o valor da indutância de fase obtida no Maxwell, para frequência de alimentação de 200Hz, corresponde ao valor da indutância transitória procurada.

A Figura 8 mostra a seleção de todos os enrolamentos amortecedores da máquina para definição de material.

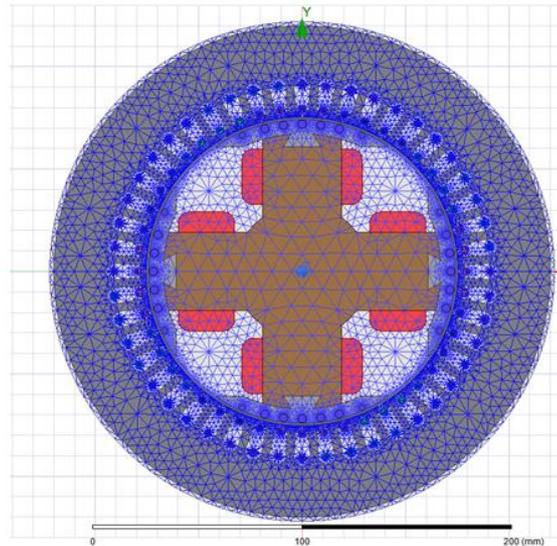
Figura 8 – Seleção dos enrolamentos amortecedores



Fonte: autor

A Figura 9 apresenta a malha criada para o modelo.

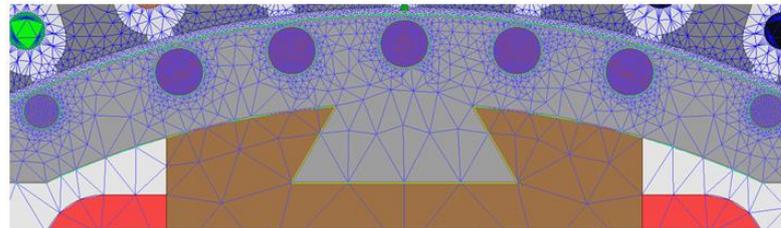
Figura 9 - Malha do modelo



Fonte: autor

A Figura 10 apresenta a malha da região do entreferro e enrolamentos amortecedores, região de grande interesse no presente projeto, e, portanto, com um nível de refinamento maior.

Figura 10 - Malha da região do entreferro e enrolamentos amortecedores

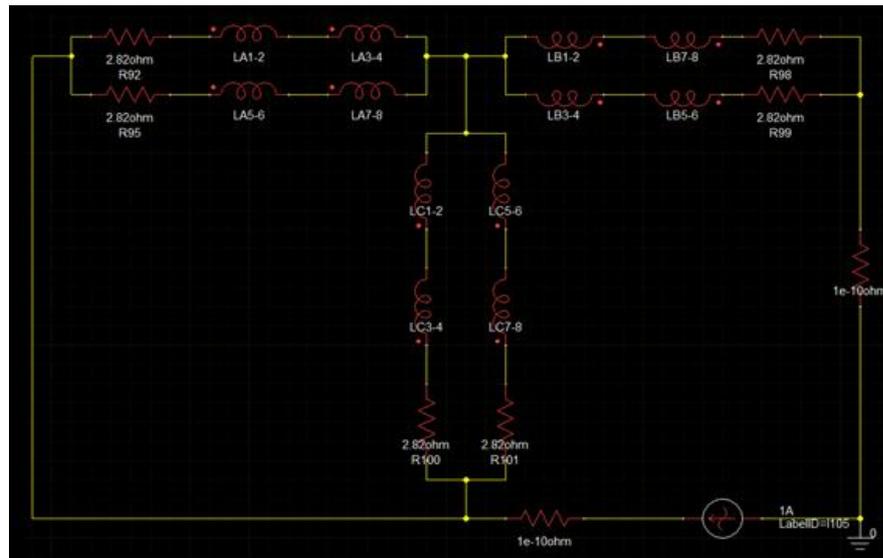


Fonte: autor

3.3 Procedimento de posicionamento do rotor para fins de ensaio no eixo direto

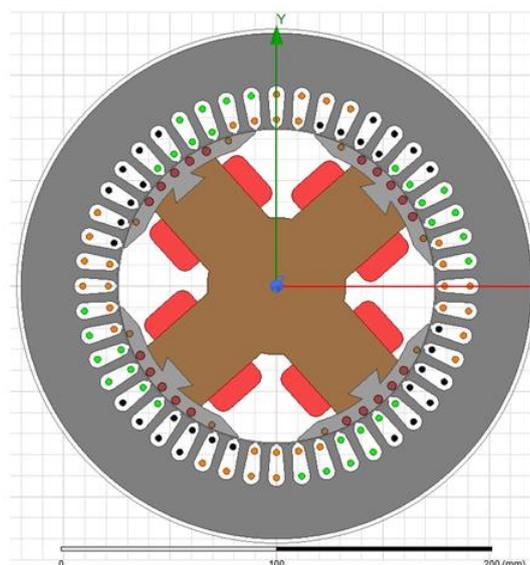
A fim de reproduzir a etapa de posicionamento do rotor no eixo direto, conforme definido na seção 2, foi definido o circuito da Figura 11, em que cada uma das fases A, B e C da máquina possui quatro bobinas, conforme definido na figura 5. A ligação proposta, conforme mencionado na seção 4, é a YY.

Figura 11 - Circuito para definição do eixo direto



Fonte: autor

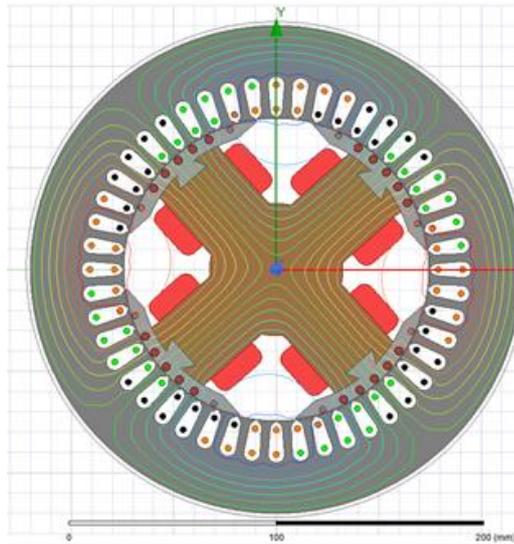
O próximo passo desta etapa é deslocar o rotor repetidas vezes até encontrar o ponto de máximo alinhamento das linhas de fluxo. O valor de ângulo de deslocamento encontrado foi de $41,7^\circ$, conforme Figura 12.

Figura 12 - Rotor deslocado de $41,7^\circ$ 

Fonte: O autor

A Figura 13 é a demonstração de que, para o ângulo de $41,7^\circ$, o circuito de campo concatena a maior parte do campo magnético produzido pela corrente de armadura, caracterizando assim a posição de eixo direto.

Figura 13 - Linhas de fluxo para posicionamento do rotor no eixo direto

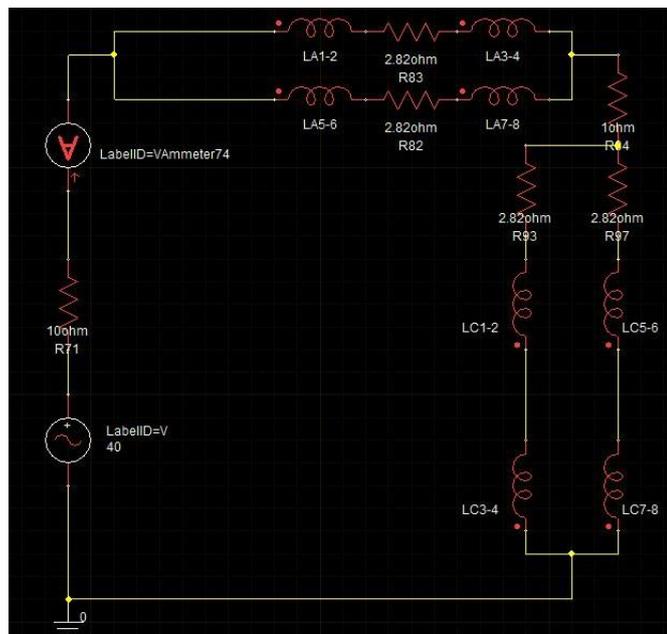


Fonte: autor

3.4 Obtenção da indutância transitória

A fim de reproduzir a segunda etapa do ensaio no Maxwell, conforme definido na seção 2, foi definido um circuito conforme Figura 14, em que uma das fases da máquina não foi considerada, já que está em aberto, e, portanto, não influencia no restante do circuito.

Figura 14 - Ligação para ensaio de máquina síncrona no domínio da frequência

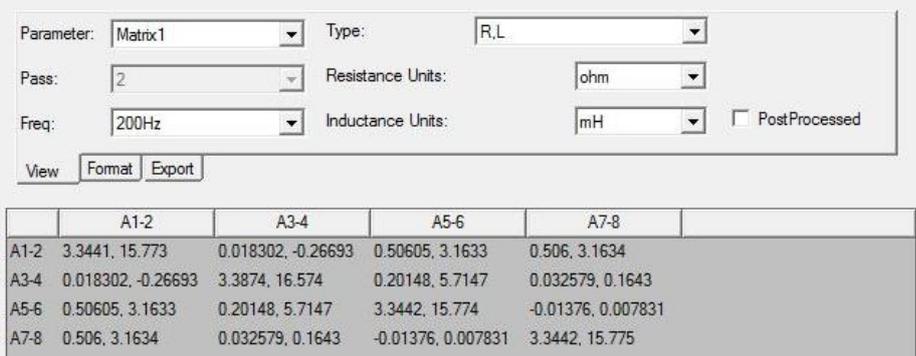


Fonte: autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o procedimento definido, o Maxwell calculou dois possíveis valores para a indutância transitória de eixo direto (L_d'). Conforme Figura 15, tem-se que $L_d'=15,773\text{mH}$ ou $L_d'=16,574\text{mH}$, que são as indutâncias próprias das fases A, B e C. Esses valores devem então ser comparados ao valor previamente obtido a partir de ensaios no domínio do tempo ($L_d'=16,15\text{mH}$).

Figura 15 - Valor de L_d' encontrado pelo Maxwell



	A1-2	A3-4	A5-6	A7-8
A1-2	3.3441, 15.773	0.018302, -0.26693	0.50605, 3.1633	0.506, 3.1634
A3-4	0.018302, -0.26693	3.3874, 16.574	0.20148, 5.7147	0.032579, 0.1643
A5-6	0.50605, 3.1633	0.20148, 5.7147	3.3442, 15.774	-0.01376, 0.007831
A7-8	0.506, 3.1634	0.032579, 0.1643	-0.01376, 0.007831	3.3442, 15.775

Fonte: autor

Idealmente, a simulação deveria encontrar apenas um valor para a indutância transitória. Entretanto, na prática, o posicionamento perfeito do rotor no eixo direto é virtualmente impossível de ser obtido, e, conseqüentemente, pode haver uma pequena diferença entre valores de indutância de diferentes fases. Ainda assim, esses dois valores são extremamente próximos entre si, e se comparados ao valor do referido parâmetro medido no domínio do tempo, ambos possuem margem de erro abaixo de 2,65%, o que é plenamente satisfatório.

Trabalhos como o de Sousa (2011) e Kornrumpf (2017) demonstram a dificuldade em se obter parâmetros de máquinas síncronas em ensaios de bancada. Os ensaios clássicos no domínio do tempo, apesar de geralmente mais precisos, são conhecidos por danificarem a máquina. Já o ensaio de resposta em frequência feito em bancada demanda equipamentos de altíssima precisão e custo elevado, geralmente estando disponíveis apenas em laboratórios para aplicações muito específicas. Em se tratando de um ensaio de resposta em frequência adaptado com equipamentos mais baratos, o grau de precisão nem sempre é satisfatório, muitas vezes ficando abaixo do obtido pelo método apresentado neste artigo.

Dessa forma, é possível concluir que a simulação computacional do ensaio de resposta em frequência é uma excelente alternativa para a obtenção de parâmetros de máquinas elétricas, já que, como demonstrado, levam a resultados precisos e sem a necessidade de altos gastos com equipamentos e/ou possibilidade de dano à máquina. Ademais, os métodos numéricos são a única forma de previsão de parâmetros de máquina ainda em sua fase de projeto, o que pode ser fundamental dependendo da aplicação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a aplicação de um método para a determinação da indutância transitória de eixo direto (L_d') de uma máquina síncrona ainda em sua fase de concepção. Caso o projetista reconheça que o referido valor de indutância seja insatisfatório para as aplicações desejadas, o projeto pode ser modificado sem a necessidade de construções de protótipos ou testes de laboratório, sendo essa a principal contribuição deste projeto.

O método aqui apresentado pode ser adaptado para a obtenção de diversos parâmetros de máquinas elétricas. O grau de precisão obtido e a não necessidade da realização de ensaios de bancada caros a muitas vezes danosos à máquina são a demonstração da viabilidade do método.

6 REFERÊNCIAS

- ELRACHID, B; HAMMOUD, H; OUSSAMA, B. **Parameters Identification of Synchronous Machine on Particle Swarm Optimization**, Brighton: IEEE, 2022.
- GERBER, S; **A Finite Element Based Optimisation Tool for Electrical Machines**, Stellenbosch, 2011.
- IEEE GUIDE. **Guide for test Procedures for Synchronous Machines**. 2009.
- GOZDOWIAK, A; KISIELEWSKI, P; ANTAL, L. **Determination of turbogenerator electromagnetic parameters from the SSFR test in the simulation process**, Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2017.
- HORD, K; **Modeling and Validation of a Synchronous-Machine/Controlled-Rectifier System**, Lexington: The University of Kentucky, 2014.
- JAROS, A. **Parameter Identification of Synchronous generator using Standstill Frequency Response (SSRF) test**, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2019.
- KORNRUMPF, L. **Algoritmos de Tratamento de Curvas para Determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos Através do Ensaio de resposta em Frequência Utilizando Metodologia com Inversor de Frequência**, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017.
- LOTTI, R; MACHADO, A; MAZZIEIRO, E; JÚNIOR, J. **Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos**, Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2006.
- MALAGONI, J. **Os Elementos Finitos no Estudo de Eletromagnetismo Utilizando os Software GMSH/GETDP**, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

MENDOZA, M. **Identificação de Parâmetros de Geradores Síncronos usando Métodos de Ajuste de Curvas e Ensaio em Frequência**, Campinas: Unicamp, 2011.

PIVETTA, R. **Obtenção de Parâmetros Dinâmicos da Máquina Síncrona de Polos Salientes Através de Ensaio de Resposta em Frequência**, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

NABETA, S; CARDOSO, J. **Determinação dos Parâmetros de Máquinas Síncronas Pela Simulação por Elementos Finitos do Ensaio de Resposta em Frequência**, São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.

SOUSA, M; **Determinação de Parâmetros de Máquinas Síncronas pelo Ensaio de Resposta em Frequência: Proposta de Metodologia com Inversor de Frequência**, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

ZAMBRANO, G. **Simulação do Ensaio de Resposta em Frequência em Máquina Síncrona de Pólos Salientes Utilizando o Método dos Elementos Finitos**, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.