

## Rede de relutâncias que estima o fluxo em geradores síncronos de polos salientes

## Reluctance network that estimates the flux on salient pole synchronous generators

### RESUMO

Gustavo Garbelini de Menezes  
[gustavo.garbelini@gmail.com](mailto:gustavo.garbelini@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Thiago de Paula Machado Bazzo  
[thiagobazzo@utfpr.edu.br](mailto:thiagobazzo@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Este trabalho apresenta um procedimento para a criação de uma rede de relutâncias que estima o fluxo criado pelo enrolamento de campo de geradores síncronos de polos salientes. O valor de fluxo gerado no pescoço do polo saliente de um gerador é essencial para o projeto de geradores síncronos, já que é por meio deste que se obtém a tensão induzida no enrolamento de armadura do gerador. Existem dois modos de se calcular este fluxo, a simulação por elementos finitos, que requer grande tempo de processamento, e o método analítico, que fornece um resultado de baixa precisão para máquinas com geometrias complexas. As redes de relutâncias surgem como alternativa viável, minimizando as desvantagens dos métodos anteriores e combinando suas vantagens. A rede de relutâncias deste documento foi obtida com o procedimento proposto, sendo somente um primeiro passo para a criação de uma rede robusta e precisa, que deve representar outras máquinas com dimensões distintas e fornecer resultados adequados. Os resultados foram validados através de simulação eletromagnética com software de elementos finitos.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerador síncrono. Polos salientes. Rede de relutâncias.

### ABSTRACT

This paper presents a procedure to create a reluctance network that estimates the flux created by the field windings of salient pole synchronous generators. The flux value generated in the neck of the salient pole of a generator is essential for the design of synchronous generators, since it is through this that the induced voltage in the armature winding of the generator is obtained. There are two ways to calculate this flux, a finite element simulation, which requires a long processing time, and the analytical method, which offers a low precision result for machines with complex geometries. Reluctance networks emerge as a feasible alternative, minimizing the disadvantages of the previous methods and combining their advantages. The reluctance network of this document was obtained with the proposed procedure, being only a first step towards the creation of a robust and precise network, which should represent other machines with different dimensions and provide adequate results. The results are validated through electromagnetic simulation with finite element software.

**KEYWORDS:** Synchronous generator. Salient poles. Reluctance network.



## INTRODUÇÃO

A energia elétrica se tornou uns dos bens de consumo mais fundamentais para as sociedades modernas. Depende-se de eletricidade para produzir, se locomover, ter segurança e muitos outros fatores associados à qualidade de vida, o que conseqüentemente faz a demanda de energia elétrica crescer todos os anos no Brasil. Por isto, a capacidade instalada de geração de eletricidade no Brasil foi expandida em 3,6% no período entre 2017 e 2018, com a contribuição majoritária da geração hidráulica, segundo o anuário estatístico de energia elétrica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018).

Nas usinas hidrelétricas o responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica é, invariavelmente, uma máquina elétrica, ou, mais especificamente; um gerador síncrono. Geradores síncronos são máquinas complexas, em seu funcionamento e em sua concepção. Projetar um gerador é um trabalho exigente e extensivo, além da geometria detalhada e completa, o projeto envolve etapas que mesmo individualmente são trabalhosas (CHAPMAN, 2013).

O cálculo da tensão interna induzida nos enrolamentos de armadura gerada pela máquina é uma dessas etapas e tem como elemento mais importante o valor de fluxo gerado no rotor. Para geradores de polos salientes, obter este valor através de cálculos analíticos resultam em um valor de fluxo impreciso, pois simplificam desmedidamente a geometria do gerador e geralmente desprezam a saturação do material ferromagnético. É possível também obter este valor por meio de simulações com softwares de elementos finitos, que fornecem um valor preciso, mas em um demorado período de tempo.

Uma maneira alternativa a estes métodos, consiste na construção de um circuito magnético, uma rede de relutâncias. Esta rede, ao se basear na geometria e no comportamento do material componente, é capaz de entregar um valor de fluxo apurado e, por fim, um valor de tensão correto (PYHÖNEN, 2008). Este relatório tem como objetivo apresentar um procedimento para concepção de uma rede de relutâncias robusta, podendo ser aplicada a máquinas de dimensões diferentes, que estime o fluxo criado pelo enrolamento de campo de geradores síncronos de polos salientes.

## METODOLOGIA

Após estudos com livros e artigos, para compreender o funcionamento e os aspectos construtivos dos geradores síncronos, nota-se que para o cálculo da tensão terminal à vazio da máquina, é necessário o valor de fluxo visto pelos enrolamentos de armadura, que é gerado pelos enrolamentos de campo, localizados no rotor (BOLDEA, 2006). Este valor pode ser estimado por uma rede de relutâncias.

A rede de relutâncias é um circuito que representa uma máquina magneticamente (FITZGERALD, 2003), procurando descrever como se comportam suas linhas de fluxo. Nestes circuitos há elementos fontes e consumidores de força magnetomotriz. As fontes, chamadas de elementos ativos, representam os enrolamentos que criam fluxo e seguem os parâmetros de intensidade de corrente e número de voltas definidos no projeto da máquina.

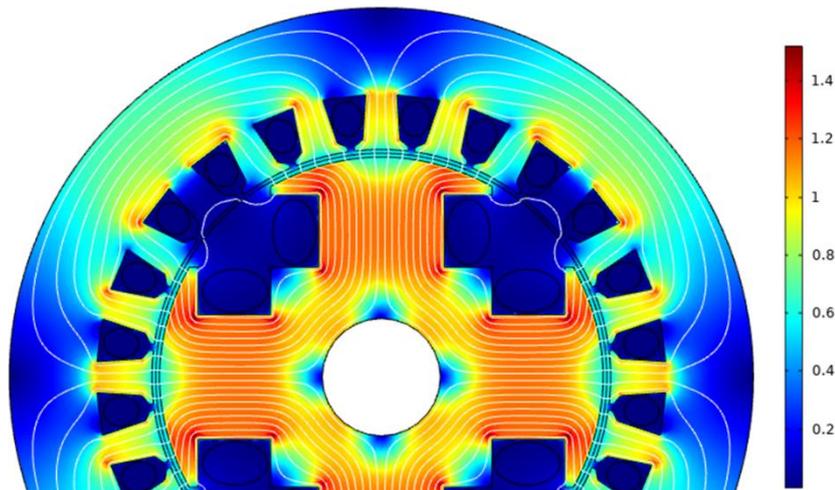
Já o rotor e o estator são divididos em relutâncias, elementos passivos pelos quais o fluxo atravessa. Além destes dois elementos de ferro, o fluxo tende também a passar pelo ar dentro da máquina e devem ser considerados pois são significativos em determinados locais. Estes elementos passivos são os mais custosos a se definir. No rotor e no estator a dificuldade está em seguir a complexa geometria da máquina. No caso das relutâncias de ar isto ocorre pelo fato das linhas de fluxo ter comportamentos mais imprevisíveis, adquirindo formas difíceis de modelar.

Para modelar as linhas de fluxo, primeiramente é necessária a simulação do gerador síncrono em um software de elementos finitos que possibilite a visualização e medição dos valores em pontos específicos. Neste estudo, o COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2019) foi utilizado para: desenhar a seção transversal da máquina, definir condições de operação, conceitos físicos envolvidos, materiais componentes, sentidos das correntes nos enrolamentos de campo e separar os enrolamentos de armadura em 3 fases.

Definida a topologia no software, um gerador qualquer foi previamente escolhido e seus parâmetros foram inseridos. O software então gera uma malha que discretiza o gerador e o simula com o rotor girando. A máquina em questão é um gerador síncrono de polos salientes trifásico de 80kW, de 220V de tensão terminal, que opera em 60Hz, com rotor de 4 polos e 24 ranhuras no estator.

A Figura 1 mostra o resultado final da simulação do gerador descrito anteriormente, cujos valores de potência e as três tensões foram conferidos. Na Figura 1 é possível ver as linhas de fluxo em branco e ainda há uma escala que demonstra a densidade de fluxo  $B$  em Tesla em todos os pontos do gerador.

Figura 1 – Simulação do gerador e suas linhas de fluxo



Fonte: Autoria própria (2020).

É através dos resultados desta simulação que se observam os caminhos de fluxo. Com o uso de ampliações e medições ponto a ponto é possível verificar os valores exatos de fluxo e avaliar quais dentre estes são mais significativos. A partir daí com o RELUCTOOL (DUPELOUX, *et al.*, 2006), que faz parte da suíte do software CADES (DELINCHANT, *et al.*, 2007), é feita a construção da rede de relutâncias, inicialmente uma rede simples que vai sendo aprimorada para gradativamente

fornecer um valor de fluxo principal, localizado no pescoço do polo saliente, mais próximo do encontrado na simulação.

A construção desta rede é um processo iterativo, no qual deve-se comparar os valores de fluxo de cada uma das relutâncias com os valores de fluxo observados na simulação por elementos finitos. Desse modo, torna-se evidente que construir uma rede precisa, que entregue um resultado próximo da simulação é um trabalho longo e custoso.

Vale ressaltar que as linhas de fluxo de um polo do rotor são simétricas nos demais polos. Assim, não é preciso criar uma rede que englobe todos os caminhos de fluxo, mas sim uma que modele um caminho fechado. Este caminho é denominado laço e compreende um quarto da máquina, começando na metade de um polo e terminando na metade dos polos adjacentes.

A fontes seguem a equação:

$$f_{mmc} = N \cdot I \quad (1)$$

Na qual  $N$  é número de voltas do enrolamento de campo e  $I$  a corrente aplicada nos mesmos (CHAPMAN, 2013). As relutâncias de ferro e de ar seguem a equação:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (2)$$

A relutância  $\mathfrak{R}$  é uma função que depende do comprimento  $l$  (m), da área  $S$  (m<sup>2</sup>) e da permeabilidade do material  $\mu$  (CHAPMAN, 2013). Esta área é o produto da largura da seção por onde o fluxo passa  $L$  (m) com o comprimento axial da máquina  $C_{ax}$ , que por sua vez é igual para todas as relutâncias.

O software calcula o valor de fluxo que passa por determinada relutância por meio da equação:

$$\varphi = f_{mmc} / \mathfrak{R} \quad (3)$$

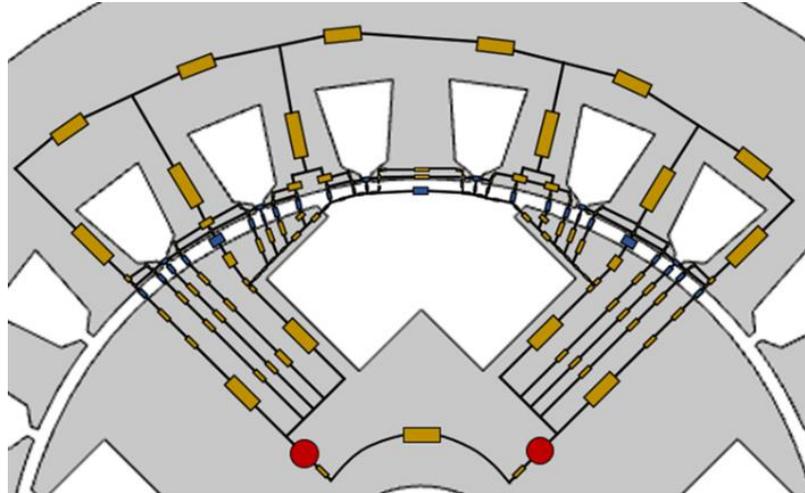
A qual enuncia que o fluxo  $\varphi$  é igual a divisão da força magnetomotriz  $f_{mmc}$  sobre a relutância do elemento em questão (CHAPMAN, 2013). Nas relutâncias que modelam caminhos de fluxo que passam pelo ar, a permeabilidade relativa é igual a 1. Já as relutâncias que representam o material ferromagnético seguem sua curva de saturação, uma curva da densidade de fluxo magnético em função do campo magnético aplicado, curva  $B(H)$ .

A validação dos resultados consiste em comparar, primeiramente ponto a ponto, os valores de fluxo obtidos na simulação com os valores de fluxo de redes de relutâncias, e posteriormente o valor de fluxo principal, localizado no pescoço do polo saliente. Obtém-se assim um percentual que representa o quanto a rede é precisa em representar um gerador síncrono. Por fim ainda são comparadas as tensões geradas com os valores de fluxo obtido pela simulação e pela rede.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo estas premissas, uma rede foi desenvolvida para o gerador apresentado na Figura 1. Para facilitar sua visualização, ela foi sobreposta à imagem da seção transversal do gerador, conforme mostra a Figura 2.

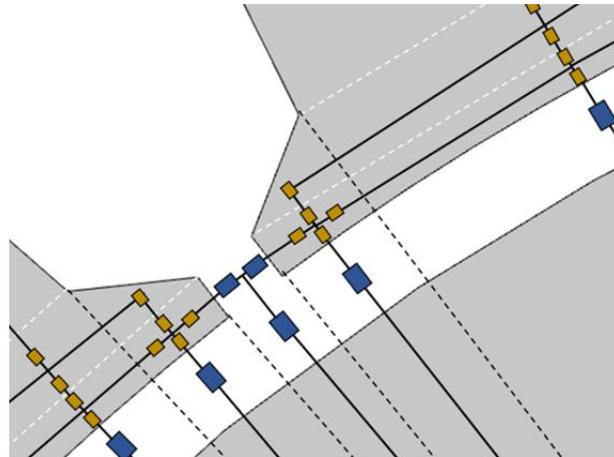
Figura 2 – Rede de relutâncias sobreposta no gerador sem os enrolamentos.



Fonte: Autoria própria (2020).

Há partes na Figura 2 de difícil visualização, como as pontas dos dentes do estator e o entreferro. A Figura 3 mostra as partes onde as relutâncias ficaram pequenas e onde a rede tem mais elementos.

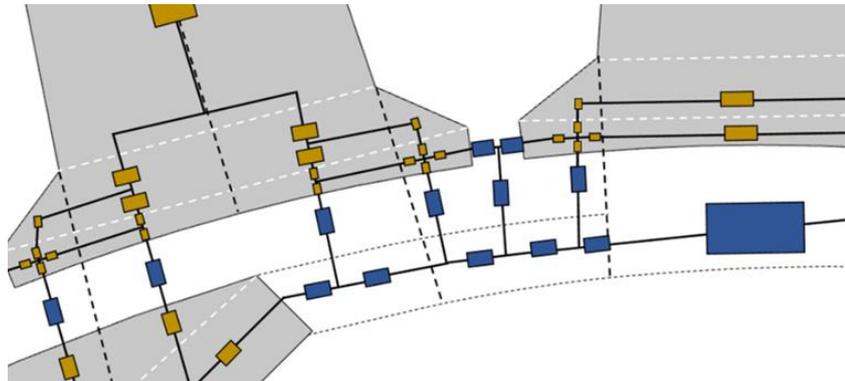
Figura 3 – Detalhe de relutâncias nos dentes do estator



Fonte: Autoria própria (2020).

Já a Figura 4 mostra as relutâncias que tentam modelar o fluxo que passa do extremo direito da sapata polar do rotor para os dentes do estator ou direto para o extremo do polo adjacente. Estas linhas de fluxo são comumente chamadas de fluxo de dispersão, pois de certa forma se dispersam da maioria das linhas e preferem passar pelo ar, caminho de relutância muito maior.

Figura 4 – Detalhe das relutâncias que modelam o fluxo de dispersão



Fonte: Autoria própria (2020).

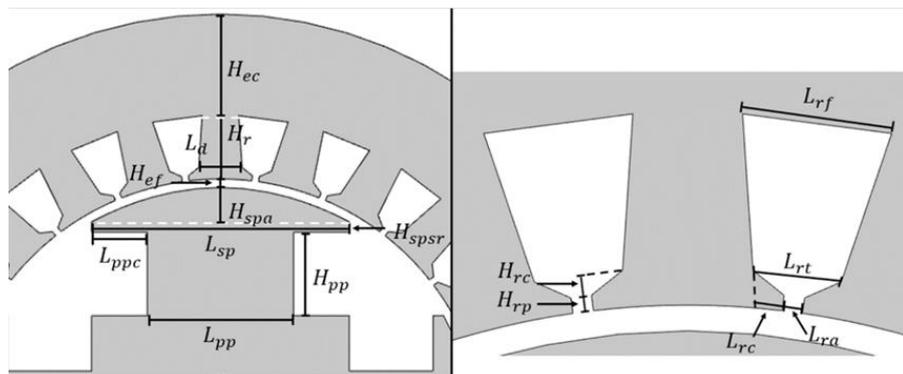
Nesta rede, a pretensão foi de representar os caminhos médios de fluxo, observados na Figura 1, da maneira mais próxima possível. Com as áreas, o cuidado é para que não haja sobreposição ou omissão entre elas. Para a explicação deste dimensionamento, algumas denominações nas medidas são necessárias. Medidas na vertical e horizontal tem um prefixo,  $H$  e  $L$ , respectivamente, e um subscrito que remete a sua localização. A Tabela 1 e a Figura 5 facilitam o entendimento destas denominações.

Tabela 1 - Medidas do gerador síncrono de polos salientes

Comprimentos	Larguras
Pescoço do polo ( $H_{pp}$ )	Pescoço polo ( $L_{pp}$ )
Seção reta da sapata polar ( $H_{spsr}$ )	Sapata polar ( $L_{sp}$ )
Arco da sapata polar ( $H_{spa}$ )	Complementar do pescoço do polo ( $L_{ppc}$ )
Entreferro ( $H_{ef}$ )	Dente ( $L_d$ )
Pescoço da ranhura ( $H_{rp}$ )	Colarinho da ranhura ( $L_{rc}$ )
Colarinho da ranhura ( $H_{rc}$ )	Abertura de ranhura ( $L_{ra}$ )
Ranhura ( $H_r$ )	Ranhura no topo ( $L_{rt}$ )
Coroa do estator ( $H_{ec}$ )	Ranhura no fundo ( $L_{rf}$ )

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 5 – Detalhe das medidas



Fonte: Autoria própria (2020).

Nas definições das relutâncias, os comprimentos são mais fáceis de determinar, em grande parte a eles são atribuídos os  $H$ 's da Figura 5. As larguras destas relutâncias, no entanto, são mais complicadas de se determinar. Com base nas linhas da Figura 1, foram feitas parametrizações, entre a largura dos elementos do estator e as larguras do pescoço do polo ( $L_{pp}$ ) e complementar do pescoço do polo ( $L_{ppc}$ ). Relutâncias que representam o pescoço do dente são conectadas às relutâncias que representam o polo e possuem uma largura proporcionalmente maior, por entender que na realidade este elemento recebe mais linhas de fluxo que a ponta do dente e a abertura de ranhura por exemplo. Com uma largura maior, maior a área e conseqüentemente mais fluxo passa por esta relutância de acordo com (2) e (3).

Este raciocínio foi aplicado observando os valores de fluxo nestes pontos. Neste gerador, o pescoço do polo foi dividido em partes proporcionais ao arco que compreende: metade do dente localizado logo a cima do polo e o dente adjacente à direita, desconsiderando sua ponta direita. A próxima parametrização compreende esta ponta e vai até a metade do último dente que está acima do polo e se relaciona com a largura complementar do pescoço do polo ( $L_{ppc}$ ).

Tentando seguir as linhas de dispersão Figura 1, foram incluídas as relutâncias que passam da seção reta da sapata polar, de forma mais lateral, para o estator e para o polo ao lado direito, caminho constituído mais de ar. Traçando dois arcos que seguem os dentes acima, separados pelo comprimento da seção ( $H_{spsr}$ ), uma parametrização, similar a feita no pescoço do polo, foi realizada que segue até a sapata do polo adjacente com conexões no estator. Na simulação por elementos finitos o fluxo principal que está no pescoço do polo é de  $8,083 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ . Porém, no mesmo ponto da rede desenvolvida com o procedimento apresentado, o fluxo obtido local correspondente é de  $6,824 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$ , o que é 84,42% do fluxo da simulação.

## CONCLUSÕES

Este relatório apresenta um procedimento para a criação de uma rede de relutâncias que fornece o valor de fluxo principal gerado no polo de um gerador síncrono de polos salientes. A rede é uma alternativa viável às demoradas simulações por elementos finitos e aos imprecisos métodos analíticos na obtenção da tensão à vazio, gerada nos terminais da máquina.

Comparando os valores obtidos na rede proposta com a simulação por elementos finitos, como forma de validação, chegou-se numa aproximação de 84,4%. Este resultado é preliminar, de uma rede não concluída. Além disso, não é ruim, considerando a elevada complexidade geométrica de geradores síncronos de polo salientes, mas mostra que ainda há estudo e análise a serem incorporados na rede para torná-la mais robusta e precisa.

O procedimento e a rede apresentados fazem parte de um trabalho em andamento e têm grande potencial, pois tratam de uma rede difícil de ser construída e, com a modelagem de mais caminhos de fluxo em pontos significativos do gerador, este resultado pode facilmente chegar a valores muito mais apurados. A intenção é dar continuidade ao trabalho e seguir melhorando esta rede para alcançar um resultado ainda mais próximo.

## REFERÊNCIAS

BOLDEA, I. **The Electric Generators Handbook: Synchronous Generators**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 425 p. ISBN 978-0-8493-5725-1.

CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013. 698 p. ISBN 0073529540/9780073529547.

COMSOL. **Introduction to COMSOL Multiphysics**. Manual do Usuário. United States. 2019. 214p.

DELINCHANT, B., *et al.* **An optimizer using the software component paradigm for the optimization of engineering systems**, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 26, pp. 368-379, 2007, doi: 10.1108/03321640710727728.

DUPELOUX, B., *et al.* **Automatic generation of sizing static models based on reluctance networks for the optimization of electromagnetic devices**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, pp. 715-718, abril, 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.872010

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). M. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019: ano base 2018**. Rio de Janeiro. Dezembro de 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio\\_2019\\_WEB\\_alterado.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2019_WEB_alterado.pdf). Acesso em: 23 agosto 2020.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. JR.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. ed. New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 2003. 703 p. ISBN 0-07-112193-5.

PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V. **Design of rotating electrical machines**. 1. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 541 p. ISBN 978-0-470-69516-6 (H/B).