



## GRUPO II

### GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS- GPT

#### MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CARGA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS LISOS PELO MÉTODO DA REJEIÇÃO DE CARGA

Mateus Giesbrecht\*  
UNICAMP

## RESUMO

Neste artigo, um método para determinar as condições de carga para as quais os ensaios de rejeição de carga em máquinas síncronas de polos lisos permitem a determinação de parâmetros de eixo em quadratura é introduzido. O método permite que se simplifique os ensaios para obtenção de parâmetros de eixo em quadratura, uma vez que, com sua aplicação, não é necessário realizar medições de ângulo de carga ou o procedimento de tentativa e erro recomendado pelos idealizadores do ensaio. Para validar o método foram realizadas simulações, cujos resultados demonstram que as condições desejadas foram obtidas.

## PALAVRAS-CHAVE

Ensaio de rejeição de carga, Modelagem de máquinas Síncronas de Polos Lisos, Turbogeneradores, Circuitos equivalentes

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Para a modelagem do comportamento de sistemas elétricos de potência, é crucial que se determine os parâmetros das máquinas elétricas a elas conectadas. Em alguns sistemas de potência, a geração de energia em usinas termelétricas é relevante. Nesse tipo de usina são utilizados turbogeradores, que são máquinas síncronas de polos lisos. Sendo assim, é importante que se conheça o comportamento, os modelos matemáticos e os parâmetros desse tipo de máquina.

O comportamento de máquinas síncronas de polos lisos varia em função dos enrolamentos que estão sob uma variação significativa do fluxo magnético. Nas condições de regime permanente, a máquina é influenciada pelo fluxo magnético dos polos, de reação de armadura e disperso nos polos, podendo ser modelada simplesmente por uma fonte de tensão induzida e uma reatância indutiva (1) (2). Em condições transitórias, os enrolamentos de campo e amortecedor estão sujeitos à variação de fluxo magnético e o modelo é mais complexo que o de regime permanente. Os modelos paramétricos para regime permanente e condições transitórias são bem definidos e geralmente são capazes de reproduzir o comportamento de qualquer máquina construída dentro de uma determinada configuração (3).

Para uma máquina específica, os parâmetros de regime permanente, transitórios e subtransitórios podem ser determinados através de ensaios como curto-circuitos bruscos (4), rejeições de carga (5), resposta em frequência e testes de decaimento DC (6), (7), (8). Esses ensaios são amplamente descritos na literatura e também fazem parte de normas (9), (10). Dos ensaios existentes, os de rejeição de carga apresentam características muito interessantes para os operadores da usina, uma vez que não requerem a instalação de equipamentos especiais e não produzem esforços muito grandes nas estruturas e elementos de fixação da máquina, que poderiam ser prejudiciais (5). Para determinar os parâmetros do eixo em quadratura (eixo q) a partir desse ensaio, a máquina

deve estar em uma condição de carga tal que a corrente de armadura esteja alinhada com o eixo q do rotor. Essa condição corresponde àquela em que os ângulos entre a corrente e a tensão de armadura, definido como ângulo de fator de potência e denotado pela letra  $\Phi$ , e entre tensão interna e tensão de armadura, definido como ângulo de carga e denotado pela letra  $\delta$ , são iguais. Se não houver nenhum sensor capaz de medir o ângulo de carga, essa condição deve ser obtida através de tentativa e erro (5). Em usinas termelétricas com grandes unidades geradoras, a instalação de um dispositivo para medição do ângulo de carga ou a execução do ensaio por tentativa e erro são alternativas custosas se o tempo de indisponibilidade de máquina for levado em conta.

Neste trabalho, um método para determinar a condição tal que a corrente de armadura de máquinas síncronas de polos lisos está alinhada com o eixo q do rotor é apresentado. Esse método é uma extensão do método já desenvolvido pelo autor para máquinas síncronas de polos salientes (11) e é baseado no diagrama fasorial das máquinas síncronas de polos lisos. Como resultado, é possível determinar a potência ativa e a tensão interna tais que a condição de carga é satisfeita. Essas variáveis foram escolhidas como resultados do método pois podem ser facilmente controladas pelos operadores da planta através de ajustes no regulador de velocidade e no regulador de tensão. Com o uso desse método não é necessária a instalação de sensores de ângulo de carga e a necessidade de repetição dos testes por várias vezes é minimizada, reduzindo os custos da determinação dos parâmetros de eixo q da máquina de polos lisos.

Este artigo é estruturado da seguinte maneira: Na próxima seção os modelos da máquina síncrona de polos lisos são introduzidos. Em seguida, os ensaios para determinação dos parâmetros dos modelos são discutidos e se apresenta a vantagem e a desvantagem de cada um deles. Na quarta seção os ensaios de rejeição de carga, que são vantajosos para obtenção de parâmetros de máquinas de polos lisos, são detalhados, e a necessidade de um método para determinação das condições de carga para determinação dos parâmetros de eixo q é destacada. Na seção 5.0 o método proposto neste artigo é apresentado. Na seção 6.0 são apresentados os resultados das simulações realizadas que comprovam a eficácia do método e na seção 7.0 as conclusões do artigo são apresentadas e possíveis trabalhos futuros são indicados.

## 2.0 - MODELOS DA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS

O comportamento dinâmico das máquinas síncronas de polos lisos pode ser reproduzido por modelos matemáticos que modelam os fenômenos mecânicos e eletromagnéticos que ocorrem na máquina. Esses modelos matemáticos são paramétricos, ou seja, uma estrutura geral de equações foi desenvolvida tendo em vista as leis da mecânica e do eletromagnetismo que regem os fenômenos que ocorrem com máquinas de polos lisos e os parâmetros dessas equações dependem das dimensões de cada uma das máquinas.

Neste trabalho, o modelo de dois eixos desenvolvido por Park (12) é considerado. Neste modelo, as grandezas eletromagnéticas do estator são decompostas em componentes alinhados com o eixo direto (eixo d) e o eixo q do rotor. Em cada um dos eixos é feita a análise de fluxos, tensões e correntes a partir das leis do eletromagnetismo e se chega a um comportamento resultante que pode ser verificado experimentalmente na máquina.

Se a máquina de polos lisos for estudada em regime permanente e se as tensões e correntes nos enrolamentos do estator forem supostas balanceadas, o componente mais significativo do fluxo girante gerado pelo rotor é seguido na mesma velocidade pelo fluxo girante do estator, de maneira que os enrolamentos do rotor não estão sujeitos à variação de fluxo magnético significativa. Para essa condição, apenas os enrolamentos do estator estarão sujeitos ao fluxo variante, e a máquina pode ser modelada com uma fonte de tensão induzida, denominada tensão interna e denotada pela sigla  $E_{int}$ , uma reatância que engloba os efeitos de fluxo disperso e de reação de armadura, denominada reatância síncrona e denotada por  $X_s$ , e a resistência da armadura, denotada por  $R_a$ . Em máquinas de grande porte essa resistência é muito pequena e pode ser desprezada. A tensão nos terminais da máquina é denotada por  $E_a$  e pode ser determinada através de  $E_{int}$  subtraída da queda de tensão na reatância síncrona  $X_s$  devida à corrente de armadura, que por sua vez é denotada por  $I_a$ . Isso resulta no diagrama fasorial típico apresentado na Figura 1.

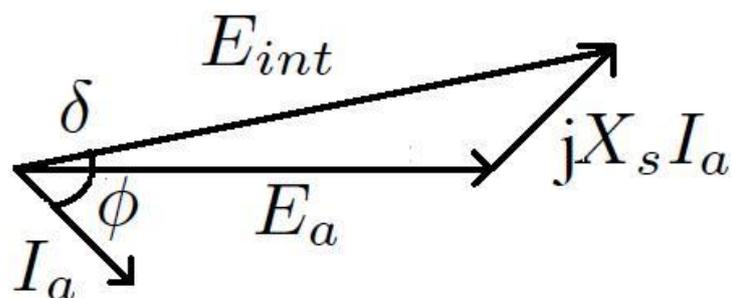


FIGURA 1 – Diagrama fasorial típico de uma máquina síncrona de polos lisos em regime permanente

Na Figura 1 deve-se notar que os ângulos de fator de potência  $\Phi$  e o ângulo de carga  $\delta$  citados na introdução são representados entre os fasores que os definem.

Caso a máquina esteja em uma condição transitória, os enrolamentos de campo, os enrolamentos amortecedores e o aço do eixo são sujeitos a significativas variações de fluxo magnético, implicando na indução de tensões e na produção de correntes elétricas e conseqüentes forças magnetomotrizes. Sendo assim, esses componentes passam a interferir no comportamento eletromagnético da máquina e devem ser modelados. Devido a características construtivas, o aço do rotor e os enrolamentos amortecedores têm constantes de tempo menores que as do enrolamento de campo. Sendo assim, no caso da ocorrência de um fenômeno transitório, nos primeiros instantes o comportamento da máquina será regido pelo eixo e pelos enrolamentos amortecedores, de campo e de estator. Esse período é definido como subtransitório. Passados alguns instantes, o eixo e os enrolamentos amortecedores entram em regime, ficando apenas a influência do enrolamento de campo e de estator. Esse período é definido como transitório. Por fim, quando o transitório do enrolamento de campo passar, a máquina volta ao comportamento síncrono, sendo afetada unicamente pelos enrolamentos do estator.

Devido a este comportamento, a máquina síncrona de polos lisos é modelada por vários circuitos diferentes, sendo um deles o de regime, conforme discutido anteriormente, outros dois para modelar o eixo direto e o eixo em quadratura no transitório e mais dois para modelar os eixos direto e em quadratura no período subtransitório. A diferença entre os circuitos é que as impedâncias dos enrolamentos sob variação de fluxo são arranjadas em paralelo. Com isso, no circuito que modela a máquina no regime há apenas o laço envolvendo a impedância do estator, nos circuitos que modelam a máquina no transitório são adicionados ramos em paralelo contendo as impedâncias do enrolamento de campo e nos circuitos que modelam a máquina no subtransitório são adicionados ramos em paralelo com a impedância equivalente dos enrolamentos amortecedores e do eixo da máquina, tanto no eixo direto quanto no eixo em quadratura. Maiores detalhes a respeito desses circuitos podem ser encontrados na referência (13).

As reatâncias equivalentes dos circuitos podem ser calculadas em função das reatâncias de seus ramos. Os resultados finais são os parâmetros do modelo paramétrico, que incluem a já citada reatância síncrona de eixo direto  $X_s$ , a reatância transitória de eixo direto  $X'_d$ , a reatância transitória de eixo em quadratura  $X'_q$ , a reatância subtransitória de eixo direto  $X''_d$  e a reatância subtransitória de eixo em quadratura  $X''_q$ . As influências das resistências de cada um dos ramos são parametrizadas em função das constantes de tempo, que são determinadas a partir delas e das reatâncias citadas. As constantes de tempo tradicionalmente utilizadas para modelar a máquina síncrona de polos lisos são a constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto  $T'_{do}$ , a constante de tempo transitória de curto circuito de eixo direto  $T'_d$ , a constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura  $T'_{qo}$ , a constante de tempo transitória de curto circuito de eixo em quadratura  $T'_q$ , a constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto  $T''_{do}$ , a constante de tempo subtransitória de curto circuito de eixo direto  $T''_d$ , a constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo em quadratura  $T''_{qo}$  e finalmente a constante de tempo subtransitória de curto circuito de eixo em quadratura  $T''_q$ . Apesar de o número de parâmetros do modelo ser grande, ele é muito menor que o que seria necessário determinar caso as simplificações introduzidas por Park em sua teoria dos dois eixos não fosse utilizada. Para maiores detalhes a respeito dos parâmetros da máquina síncrona de polos lisos operando no transitório se recomenda o estudo das referências (3) e (13).

Para a determinação dos parâmetros do modelo da máquina síncrona de polos lisos é possível adotar pelo menos duas abordagens. Na primeira, todas as reatâncias da máquina são determinadas a partir de cálculos analíticos baseados nas leis da teoria eletromagnética e em relações empíricas ou a partir da aplicação do método dos elementos finitos. Com as reatâncias se calcula as reatâncias de cada um dos ramos dos circuitos e, aplicando as relações de circuito equivalente, se chega aos parâmetros de uma determinada máquina. Essa abordagem exige um conhecimento detalhado de todas as dimensões da máquina e normalmente é utilizada pelos fabricantes dos equipamentos para prever seu comportamento e atender aos requisitos do usuário da máquina. A segunda abordagem consiste na aplicação de testes que excitam as dinâmicas da máquina e que, com isso, permitam que se calculem os parâmetros do circuito equivalente. Em geral esse tipo de abordagem é o único possível para os usuários finais da máquina, uma vez que na grande maioria dos casos os desenhos de detalhes das peças da máquina e o conhecimento de algumas relações empíricas utilizadas pelos fabricantes não estão disponíveis. Na seção a seguir alguns desses ensaios são apresentados e suas vantagens e desvantagens são comparadas.

### 3.0 - ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Para determinar os parâmetros do modelo de máquinas síncronas através de ensaios é necessário medir a resposta da máquina a diferentes fenômenos transitórios controlados e correlacionar os sinais de resposta aos parâmetros a serem determinados. Alguns fenômenos transitórios que podem ser aplicados à máquina são curto circuitos bruscos (4) e rejeições de carga (5). Também é possível analisar a resposta em frequência da máquina e levantar funções de transferência a partir de ensaios de resposta ao degrau DC ou de aplicação direta de frequências variáveis aos enrolamentos (6), (7) e (8). Os métodos e determinação de parâmetros podem ser

desenvolvidos nos domínios da frequência ou do tempo e o cálculo pode ser feito com a aplicação de algoritmos de otimização clássicos (14), (15) ou de técnicas de inteligência artificial (16).

Dos ensaios no domínio no tempo, o mais popular é o de curto circuito brusco (4), (9). Nesse ensaio, a máquina é colocada na condição de operação em vazio com tensão terminal plena ou parcial. Uma vez atingido o regime, é aplicado um curto-circuito entre as fases do estator através do fechamento de uma chave trifásica especial que deve ser dimensionada para garantir o curto das três fases de maneira praticamente imediata. Com o curto, a tensão entre os terminais da máquina vai do valor em que estava para zero, o que representa uma função degrau aplicada à tensão. As correntes nos terminais do estator devem ser medidas através de transdutores especiais, em geral bobinas de Rogowsky, uma vez que o tempo de resposta dos transformadores de corrente normalmente instalados na máquina não permite captar os fenômenos subtransitórios que ocorrem. A partir dos envelopes das formas de onda das correntes é possível determinar os parâmetros de eixo direto  $X_s$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $T'_d$  e  $T''_d$ . Neste ensaio não é possível determinar as constantes de tempo de circuito aberto de eixo direto e os parâmetros de eixo em quadratura. Quando o curto circuito brusco é aplicado, as correntes de estator vão a valores altos de maneira muito rápida, o que causa aquecimento repentino do cobre dos enrolamentos, gerando uma tensão mecânica no isolamento que o deteriora. Além disso, as altas correntes resultam em altos conjugados, que são transmitidos aos elementos de fixação do núcleo do estator à carcaça e aos elementos de fixação da carcaça ao concreto da casa de força. Por esse motivo é recomendado que se faça uma inspeção desses elementos após a execução do ensaio para garantir que não foram introduzidos danos que possam evoluir e comprometer o funcionamento da máquina.

Para executar os ensaios de resposta em frequência é necessário utilizar um gerador de funções, um amplificador de sinais e um analisador de espectro. A máquina é mantida parada com o eixo do enrolamento de uma das fases da armadura alinhado com o eixo q ou o eixo d do rotor. Os sinais de frequência variável são injetados em um dos enrolamentos e a amplitude e a fase da resposta são verificadas em terminais de outro enrolamento. Repetindo o procedimento para várias frequências é possível traçar os diagramas de resposta em frequência da máquina e com isso obter as funções de transferência  $X_d(s)$  e  $X_q(s)$ . A partir dos modelos paramétricos se determina a forma analítica das funções de transferência esperadas em função dos parâmetros tradicionais da máquina e em seguida se encontra os parâmetros através de algum procedimento de minimização de erro. Esse tipo de ensaio apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de um aparato especial para sua realização, a necessidade do alinhamento entre rotor e estator em determinadas posições, o que é difícil de executar para máquinas de grande porte, e a não consideração dos termos de indução dinâmicos que fazem parte do modelo da máquina síncrona. A vantagem é que é possível determinar tanto os parâmetros do eixo d quanto os do eixo q.

Nos ensaios de rejeição de carga não é necessária a utilização de nenhum equipamento especial, como a chave trifásica e as bobinas de Rogowsky necessárias ao ensaio de curto circuito brusco ou o gerador de funções, o amplificador de sinais e o analisador de espectro necessários nos ensaios de resposta em frequência. Os únicos instrumentos necessários são aqueles normalmente existentes para medir tensão e corrente de armadura e de campo e velocidade do eixo. Durante o ensaio de rejeição de carga a máquina não é sujeita a esforços mecânicos muito mais severos que os de operação normal. Por fim, através dos ensaios de rejeição de carga, é possível a determinação de parâmetros de eixo direto e em quadratura sem que seja necessário nenhum procedimento de alinhamento manual do rotor. Por esse motivo esses ensaios são vantajosos para a determinação de parâmetros de máquinas síncronas e são detalhados na próxima seção deste artigo.

#### 4.0 - ENSAIOS DE REJEIÇÃO E CARGA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Para obter os parâmetros de eixo direto e de eixo em quadratura deve-se executar rejeições em duas condições de carga. Na primeira, para determinação dos parâmetros de eixo direto, a rejeição deve ser executada com as correntes de estator alinhadas com o eixo direto do rotor. Essa condição é a de fator de potência nulo, ou seja, toda potência desenvolvida pela máquina é reativa. Para colocar a máquina nessa condição basta sincronizá-la à rede e manter o regulador de velocidade na condição de potência ativa nula. O regulador de tensão deve ser deixado em uma condição de máquina subexcitada. Uma vez atingido o regime, o disjuntor da armadura é aberto, e as formas de onda de tensão são registradas. Os parâmetros de eixo direto  $X_s$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $T'_{do}$  e  $T''_{do}$  são então obtidos através dos parâmetros da soma de exponenciais que melhor se ajusta ao decaimento de tensão observado. Para maiores detalhes ver (5).

Na segunda condição de carga, que é para a obtenção dos parâmetros de eixo em quadratura, é necessário que as correntes de armadura estejam alinhadas com o eixo em quadratura do rotor. Para isso os ângulos de fator de potência  $\Phi$  e o ângulo de carga  $\delta$  devem ser iguais, implicando no dígrama fasorial apresentado na Figura 2. Para se chegar a essa condição, teoricamente se poderia medir o ângulo de fator de potência e o ângulo de carga e ajustar os reguladores de velocidade e de tensão até que ambos se igualem. A medição do ângulo de fator de potência é simples, basta comparar os tempos de cruzamento com o zero das formas de onda da tensão e da corrente. Entretanto, a medição do ângulo de carga é mais complexa e envolve sensores de fluxo que em geral não estão disponíveis.

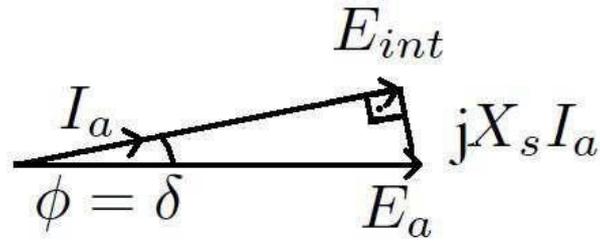


FIGURA 2 – Diagrama fasorial de uma máquina síncrona de polos lisos na condição em que a corrente de armadura está alinhada com o eixo em quadratura.

Para mitigar esse problema, no artigo em que o ensaio de rejeição de carga é proposto se sugere a aplicação de um método de tentativa e erro que consiste na execução de diversas rejeições de carga distintas até que não se verifique variação na corrente de campo (5). Quando isso ocorrer, se tem a condição de alinhamento das correntes do estator com o eixo em quadratura e portanto as formas de onda de tensão obtidas podem ser utilizadas para a determinação dos parâmetros de eixo em quadratura  $X_q$ ,  $X'_q$ ,  $X''_q$ ,  $T'_{q0}$  e  $T''_{q0}$ .

Apesar de efetivo, o método proposto para determinação da condição de carga para a qual as correntes do estator estão alinhadas com o eixo em quadratura do rotor não é muito prático e é custoso, pois aumenta o tempo de máquina indisponível para execução dos ensaios. A contribuição deste artigo é a proposta de um método analítico que permite o cálculo da potência ativa e da corrente de excitação tais a condição desejada é atingida. Utilizando o método proposto, que é descrito na seção a seguir, não é necessário utilizar o procedimento de tentativa e erro, o que reduz o custo para a determinação dos parâmetros de eixo em quadratura da máquina síncrona de polos lisos.

## 5.0 - MÉTODO PROPOSTO PARA OBTENÇÃO DA CONDIÇÃO DE CARGA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EIXO EM QUADRATURA

O método proposto neste artigo para a obtenção da condição de carga para determinação dos parâmetros de eixo em quadratura de uma máquina síncrona de polos lisos é baseado nas grandezas envolvidas no diagrama fasorial de funcionamento da máquina em regime permanente. Da Figura 1 nota-se que cada ponto de operação é definido pelas grandezas  $E_{int}$ ,  $E_a$ ,  $I_a$ ,  $\Phi$  e  $\delta$ . Se três dessas variáveis forem definidas, as outras duas podem ser determinadas. Partindo do pressuposto que a máquina síncrona está conectada à barra infinita, o que é uma hipótese razoável para centrais termelétricas, a tensão terminal  $E_a$  é fixa, e é possível controlar apenas as outras quatro variáveis. Sendo assim, a ideia principal do método é determinar valores de  $E_{int}$  e  $I_a$  tais que, para um dado valor de  $E_a$  definido pela barra infinita, os ângulos  $\Phi$  e  $\delta$  sejam iguais, configurando a condição em que a corrente de armadura está no eixo em quadratura.

A partir do diagrama da condição de carga para rejeição de eixo em quadratura apresentado na Figura 2, nota-se que, se  $\Phi = \delta$ , a seguinte relação é válida:

$$|E_a|^2 = (X_s |I_a|)^2 + |E_{int}|^2 \quad (1)$$

Em que  $|*|$  denota o módulo do fasor  $*$ .

Isolando o módulo da corrente de armadura na equação (1) se tem:

$$|I_a| = \frac{\sqrt{|E_a|^2 - |E_{int}|^2}}{X_s} \quad (2)$$

A partir do diagrama fasorial também se tem que:

$$\cos \delta = \cos \Phi = \frac{|E_{int}|}{|E_a|} \quad (3)$$

A potência ativa é definida como (1), (2):

$$P = |E_a| |I_a| \cos \phi \quad (4)$$

A partir das equações 2, 3 e 4, a potência ativa pode ser escrita em função de  $E_a$ ,  $E_{int}$  e  $X_s$  da seguinte maneira:

$$P = \frac{|E_{int}|}{X_s} \sqrt{|E_a|^2 - |E_{int}|^2} \quad (5)$$

Como  $E_a$  é definido pela barra infinita e pode ser facilmente medido e como  $X_s$  pode ser facilmente determinado a partir das características de circuito aberto e curto circuito da máquina (1), (2), para cada tensão interna  $E_{int}$  é possível calcular uma potência ativa  $P$  que satisfaz a equação (5), que também satisfaz a condição  $\Phi = \delta$  e que, portanto, implica em uma condição de carga para a qual a corrente de armadura está alinhada com o eixo em quadratura do rotor. Se o regulador de velocidade for configurado para fornecer a potência ativa  $P$  e o regulador de tensão para fornecer a tensão interna  $E_{int}$  satisfazendo as relações acima, a máquina estará com uma carga que, se rejeitada, fornecerá curvas que permitem a obtenção dos parâmetros de eixo em quadratura da máquina.

## 6.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para validação do método proposto neste artigo, o modelo apresentado na Figura 3 foi implementado no software Simulink para simular ensaios de rejeição de carga. O bloco "Synchronous Machines pu Standard" implementa as equações transitórias de uma máquina síncrona de polos lisos detalhadas em (3) com os parâmetros apresentados na Tabela 1. As entradas do bloco são a tensão de campo  $V_f$ , que considerando o modelo no sistema pu e o cálculo de corrente de excitação através da linha de entreferro modificada corresponde a  $E_{int}$ , e a potência ativa  $P$ . Essas grandezas que podem ser controladas em uma usina através dos reguladores de velocidade e de tensão. O modelo foi simulado para os casos apresentados na Tabela 2, que satisfazem a equação (5) para os dados da máquina apresentada na Tabela 1.

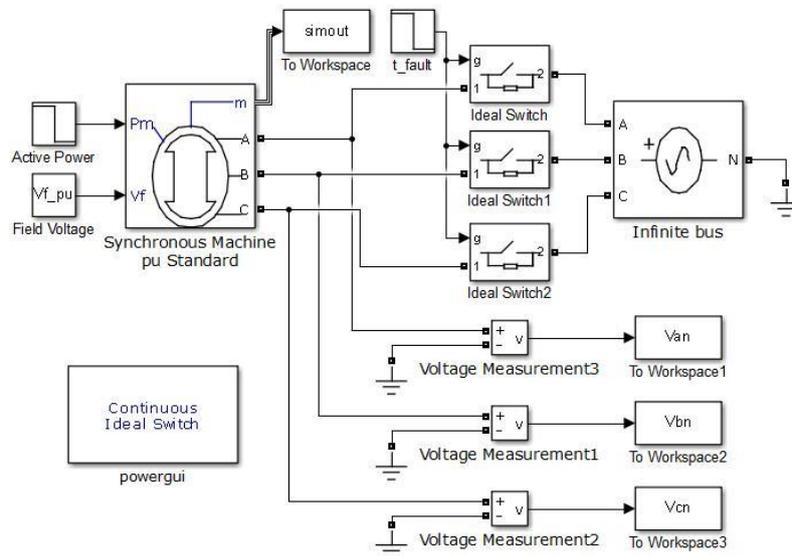


FIGURA 3 – Diagrama de blocos do sistema implementado para simulação.

Tabela 1 – Parâmetros do circuito equivalente da máquina simulada

$X_s$	$X'_d$	$X''_d$	$X_a$	$X'_a$	$X''_a$	$T'_{do}$	$T''_{do}$	$T'_a$	$T''_a$	$R_a$
1.81 pu	0.3 pu	0.23 pu	1.81 pu	0.65 pu	0.25 pu	8s	0.03s	0.3371s	0.0295s	0.00372 pu

Tabela 2 – Casos simulados

Caso	$ E_{int} $ [pu]	$P$ [pu]	$ E_a $ [pu]
1	0.80	0.2652	1.00
2	0.75	0.2208	0.92
3	0.75	0.3220	1.08

Na simulação, a máquina gira na velocidade nominal conectada à barra infinita com as entradas descritas na Tabela 2 e, após atingir o regime, as três chaves que ligam sua armadura à barra infinita são abertas no mesmo instante de tempo. Os ângulos  $\Phi$  e  $\delta$  são medidos no instante de tempo anterior à rejeição de carga e os resultados são apresentados na Tabela 3. Na Figura 4, o diagrama fasorial calculado com os dados medidos no modelo durante a execução do caso 1 no instante imediatamente anterior à abertura da chave é apresentado.

Tabela 3 – Ângulos medidos no modelo nos instantes imediatamente anteriores à abertura das chaves

Caso	$\delta$	$\Phi$
1	36.85°	37.00°
2	35.38°	35.53°
3	45.89°	46.06°

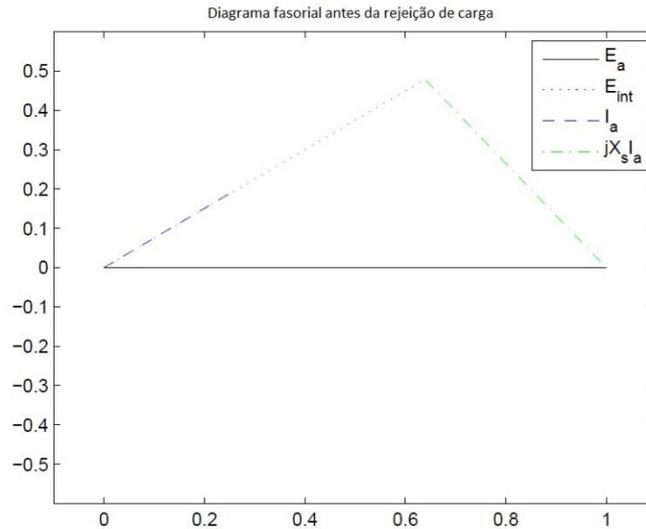


FIGURA 4 – Diagrama fasorial para o caso 1 no instante de tempo imediatamente anterior à abertura das chaves.

Dos resultados apresentados na Tabela 3 nota-se que para as condições de potência ativa e de tensão interna propostas na Tabela 2 os ângulos de fator de potência e de carga são praticamente iguais, conforme esperado. Da Figura 4 nota-se também que no instante de tempo imediatamente anterior à abertura das chaves, os fasores de corrente de armadura e de tensão interna estão alinhados, o que configura a condição de carga desejada.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, um novo método para determinar as condições de carga para as quais os ensaios de rejeição de carga em máquinas síncronas de polos lisos resultam em curvas que permitem a determinação dos parâmetros de eixo em quadratura foi apresentado. O método é baseado em relações geométricas extraídas do diagrama fasorial de máquinas de polos lisos para a condição em que o ângulo do fator de potência é igual ao ângulo de carga. Com o método apresentado, o procedimento de tentativa e erro ou a medição do ângulo de carga não são mais necessários, tornando o ensaio mais simples e menos custoso. Para validar o método proposto foram realizadas simulações e o resultado demonstrou que a condição de carga desejada foi obtida.

Os próximos passos desta pesquisa serão a execução de ensaios de rejeição de carga em máquinas reais, validando em campo os resultados obtidos através da simulação.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SEN, P. C. Principles of Electric Machines and Power Electronics; John Wiley and Sons, 1996
- (2) FITZGERALD, A., KINGSLEY, C., UMANS S. Electric Machinery. McGraw- Hill Higher Education, 17 ed., 2013.
- (3) KRAUSE, P. C., WASYNCZUK O., SUDHOFF, S. D. Analysis of electric machinery and drive systems. Wiley-IEEE Press, 2nd ed., 2002.
- (4) WRIGHT S. H. "Determination of synchronous machine constants by test reactances, resistances, and time constants," American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, vol. 50, pp. 1331–1350, Dec 1931.
- (5) DE MELLO F., RIBEIRO, J. "Derivation of synchronous machine parameters from tests," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 96, pp. 1211–1218, July 1977.
- (6) KAMINOSONO H., UYEDA K., "New measurement of synchronous machine quantities," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-87, pp. 1908–1918, Nov 1968.

- (7) COULTES M., WATSON, W. "Synchronous machine models by standstill frequency response tests," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-100, pp. 1480–1489, April 1981.
- (8) CANAY I. "Determination of the model parameters of machines from the reactance operators  $x_d(p)$ ,  $x_q(p)$  (evaluation of standstill frequency response test)," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 8, pp. 272–279, Jun 1993.
- (9) IEEE "Ieee std 115-2009, ieee guide for test procedures for synchronous machines," pp. 1–219, May 2010.
- (10) IEC, IEC 60034-4: Rotating Electrical Machines - Part 4: Method for determining synchronous machines parameters from tests. IEC, 2008.
- (11) GIESBRECHT, M. Uma nova metodologia para determinação das condições de carga para obtenção dos parâmetros de eixo em quadratura de geradores síncronos através do ensaio de rejeição de carga. Encontro regional Ibero Americano do Cigré (ERIAAC), 2013.
- (12) PARK, R. "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i," American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, vol. 48, pp. 716–727, July 1929.
- (13) ADKINS, B. The general theory of electrical machines. Chapman and Hall, 1957.
- (14) BORTONI, E. C., JARDINI J. "Identification of synchronous machine parameters using load rejection test data," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 17, pp. 242–247, Jun 2002.
- (15) WAMKEUE, R., JOLETTE, C., KAIROUS D. "Estimation of synchronous generator parameters from load rejection analytical responses," in Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on, pp. 392–395, May 2010.
- (16) CALVO, M., MALIK, O. "Synchronous machine steady-state parameter estimation using neural networks," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 19, pp. 237–244, June 2004.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Prof. Dr. Mateus Giesbrecht.** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Unicamp (2006), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Unicamp (2008) e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Unicamp (2013). Trabalhou por quase 10 anos como engenheiro eletricista e coordenador de projetos de hidrogeradores na Andritz Hydro. Durante seus estudos, pesquisou a aplicação de técnicas de inteligência computacional nos problemas de identificação de sistemas e de realização de séries temporais. Desde 2015 é professor e pesquisador na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp, onde leciona disciplinas relacionadas a máquinas elétricas, tratamento de sinais multivariáveis e identificação de sistemas.