

# Identificação de Parâmetros Dinâmicos de Máquinas Síncronas de Polos Salientes de Pequena Potência Através de Ensaios de Resposta em Frequência

Raul Erd Pivetta, Lucas Giuliani Scherer, Robinson  
Figueiredo de Camargo

Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM  
Santa Maria, Brasil

Felipe Bovolini Grigoletto

Laboratório de Processamento de Energia e Controle –  
LAPEC  
Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA  
Alegrete, Brasil

**Abstract** — O objetivo deste artigo é apresentar a modelagem e a identificação de parâmetros dinâmicos de máquinas síncronas de pequena potência, tal como aquelas empregadas em nano e pico-aproveitamentos hidrelétricos. Inicialmente, no domínio do tempo, o comportamento dinâmico do Gerador Síncrono (GS) é analisado de forma a obter um modelo baseado em coordenadas  $dq0$ . Uma vez definido o circuito equivalente da máquina, é realizada uma análise no domínio da frequência para se obter o modelo de pequenos sinais que serve de base para o teste de resposta em frequência com rotor em repouso (SSFR, do inglês *Standstill Frequency Response*). Assim, é relatada uma aplicação do teste em um GS de 5 kVA, propondo uma abordagem onde são medidas apenas duas funções de transferência do modelo de pequenos sinais e fazendo uso dos testes clássicos de máquinas síncronas para melhorar os resultados. Os parâmetros obtidos são simulados e comparados com a máquina real.

**Keywords** — Geradores síncronos, modelagem, resposta em frequência.

## I. INTRODUÇÃO

Geradores síncronos são largamente utilizados em aproveitamentos hídricos e térmicos, sendo um dos elementos mais importantes em sistemas elétricos de potência (SEP). Suas características construtivas são apreciadas por garantir o controle da potência reativa despachada através do sistema de excitação, melhorando a confiabilidade do SEP. Porém, um dos problemas relacionados aos GS são suas dinâmicas complexas de operação sob regime transitório, comportamento este que deve ser modelado corretamente de forma a evitar falhas no sistema. Em [1] é discutida a importância da aplicação de um modelo preciso no monitoramento de SEP como forma de antecipar falhas e melhorar seu desempenho.

Os parâmetros que constituem estes modelos e descrevem corretamente o comportamento do gerador, muitas vezes já são conhecidos e informados pelo fabricante, porém, ao longo da vida útil da máquina, esta pode passar por reformas ou repotencializações que venham a alterar as características originais do equipamento, fazendo-se necessária uma nova aferição de suas características elétricas, que podem ser determinadas através de ensaios tais quais os descritos em [2]. Testes clássicos como a Característica de Circuito Aberto (CCA) e Característica de Curto-circuito (CCC) são os principais testes utilizados para determinar parâmetros de

regime permanente, porém, para descrever o comportamento dinâmico do GS são necessários ensaios mais sofisticados.

Entre os principais ensaios, o SSFR é um procedimento normatizado pela IEEE [4], utilizado principalmente no levantamento de parâmetros de grandes unidades geradoras. Esse ensaio apresenta vantagens sobre outros métodos de caracterização dinâmica, uma vez que não submete a máquina a altos estresses eletromecânicos como o teste de curto-circuito abrupto e não necessita instrumentação especial, podendo ser realizado com baixo custo [3]. O SSFR é baseado em um modelo de pequenos sinais do GS em um sistema de eixos  $dq0$  centrados no rotor. O procedimento é realizado por meio da aplicação de pequenas excitações senoidais numa faixa de frequência de 0,001 a 1000 Hz nos enrolamentos de estator e rotor, medindo amplitude e a fase desses sinais de forma a caracterizar as funções de transferência (FT) do modelo de pequenos sinais. As medidas são tomadas em duas diferentes condições: com o rotor alinhado ao eixo magnético do estator e em quadratura a este eixo. O alinhamento correto do rotor e desconsideração dos efeitos da saturação são alguns dos problemas do procedimento [4], [5].

Uma vez que a aplicação do SSFR é altamente consolidada em grandes máquinas, especialmente em GS de rotor cilíndrico [6] e [7], este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do teste em GS de polos salientes de pequena potência. A abordagem proposta tem como objetivo a realização do teste com equipamentos comuns disponíveis em laboratórios de engenharia elétrica. Na presente aplicação, foram levadas em conta algumas simplificações para otimizar os resultados do teste, como a exclusão de medidas abaixo de 0,01 Hz [2], que exigem tempo elevado para serem efetuadas e estão sujeitas a muito ruído. Ainda, especialmente em GS de polos salientes, as medidas em baixa frequência necessitam de cuidado especial em relação à precisão [5] e [8], uma vez que um erro de até 0,1 graus na medida da fase pode resultar em uma grande incerteza no cálculo dos parâmetros.

## II. MODELAGEM DA MÁQUINA SÍNCRONA

De acordo com [1] e [9], a modelagem da máquina síncrona segue algumas simplificações: o efeito da histerese é desconsiderado; os enrolamentos do estator são distribuídos senoidalmente ao longo do estator e as ranhuras do estator não

causam variação nas indutâncias do rotor conforme a posição de que este varia.

### A. Modelo no domínio do tempo

Devido a dinâmica de entreferro variável em máquinas síncronas de polos salientes, é comum representar a máquina em um sistema de eixos girantes centrados no rotor, chamados eixos  $dq$  [10]. Essa transformação elimina a dinâmica de indutâncias variáveis causada pelo movimento relativo entre as partes físicas. O eixo direto, ou eixo  $d$ , é alinhado ao eixo magnético do rotor, enquanto o eixo em quadratura, ou eixo  $q$ , é posicionado 90 graus elétricos adiantado [1]. Os eixos são considerados desacoplados, isto é, correntes em um dos eixos produzem fluxo apenas naquele eixo. O circuito equivalente da máquina síncrona é mostrado na Fig. 1.

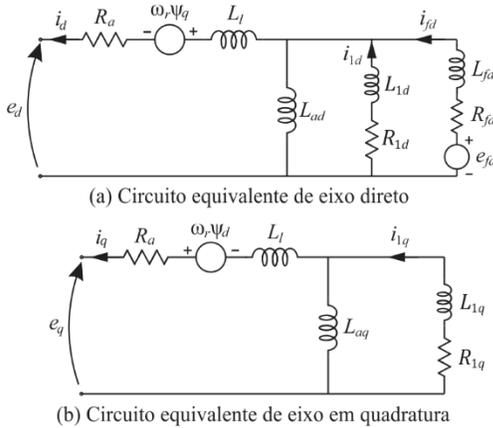


Fig. 1. Circuito equivalente do GS: (a) eixo direto; (b) eixo em quadratura.

Na Fig. 1,  $R_a$  é a resistência de armadura por fase,  $L_l$  é a indutância de dispersão do estator,  $L_{ad}$  e  $L_{aq}$  são as indutâncias mútuas de eixo  $d$  e  $q$ , respectivamente,  $e_d$  e  $e_q$  são as tensões de eixo direto e eixo em quadratura, respectivamente, enquanto  $i_d$  e  $i_q$  são as correntes equivalentes. É comum expressar as indutâncias de eixo  $d$  e  $q$  como (1) e (2) [11].

$$L_d = L_{ad} + L_l \quad (1)$$

$$L_q = L_{aq} + L_l \quad (2)$$

Neste modelo, o circuito de eixo direto possui uma estrutura de segunda ordem que compreende o enrolamento de campo (subscrito “ $fd$ ”) e um ramo equivalente ao enrolamento amortecedor (subscrito “ $1d$ ”). No eixo em quadratura, o enrolamento de campo não exerce nenhuma influência e existe apenas o ramo correspondente ao circuito amortecedor, subscrito (“ $1q$ ”). De acordo com a literatura, a estrutura da Fig. 1 é o modelo mais adequado para representar GS de polos salientes [11].

### B. Modelo de pequenos sinais

Uma vez definido o circuito equivalente do GS em coordenadas  $dq$ , é importante analisar o comportamento do gerador frente a pequenos distúrbios. As equações (3) e (4) descrevem o modelo de pequenos sinais do GS [9].

$$\Delta\psi_d(s) = G(s)\Delta e_{fd}(s) - L_d(s)\Delta i_d(s) \quad (3)$$

$$\Delta\psi_q(s) = -L_q(s)\Delta i_q(s) \quad (4)$$

Onde

$\Delta$  é uma pequena perturbação;

$\psi_d$  e  $\psi_q$  são os fluxos concatenados de eixo direto e eixo em quadratura;

$i_d$  e  $i_q$  são as correntes no estator;

$e_{fd}$  é a tensão de campo da máquina;

$s$  é o operador de Laplace,  $s = j\omega = j2\pi f$  rad/s.

O sistema pode ser analisado como um modelo de duas estruturas independentes, como mostrado no diagrama da Fig. 2, com duas portas para o eixo  $d$  e uma para o eixo  $q$ .

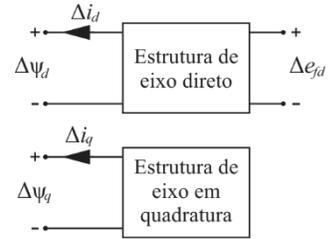


Fig. 2. Modelo de pequenos sinais da máquina síncrona.

Neste modelo, descrito por (3) e (4),  $L_d(s)$  e  $L_q(s)$  são as indutâncias operacionais,  $G(s)$  é chamada FT do fluxo de armadura para o enrolamento de campo. Estes são os chamados parâmetros operacionais do GS, que descrevem o comportamento dos parâmetros da máquina vistos de seus terminais. Estas FT e sua relação com as variáveis da máquina síncrona são detalhadas na seção III. Assim, ao assumir um número finito de circuitos do rotor em ambos os eixos, os parâmetros operacionais de (3) e (4) podem ser deduzidos como uma razão entre polinômios em  $s$  [9]. A ordem do numerador e denominador dos polinômios que formam  $L_d(s)$  e  $L_q(s)$  é a mesma do número de circuitos assumidos em cada um dos respectivos eixos.

Estes parâmetros operacionais podem ser deduzidos substituindo as equações de fluxo do GS da Fig. 1 em (3) e (4), o que resulta em uma série de razões  $L/R$ , que podem ser reduzidas em constantes de tempo ( $T$ ), dadas em segundos. Assim, os parâmetros operacionais do GS podem ser escritos em função destas constantes de tempo como (5)-(7), como desenvolvido em [9] e [11].

$$L_d(s) = L_d \frac{(1+sT'_d)(1+sT''_d)}{(1+sT'_{do})(1+sT''_{do})} \quad (5)$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1+sT_{kd})}{(1+sT'_{do})(1+sT''_{do})} \quad (6)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{(1+sT''_q)}{(1+sT'_{qo})} \quad (7)$$

Após a ocorrência de um distúrbio, como por exemplo, a conexão de cargas, ou curto-circuito nos terminais da máquina, correntes parasitas são induzidas no rotor da máquina [9]. Algumas dessas correntes decaem mais rápido do que outras, com tempo de decaimento relacionado às constantes de tempo da máquina, ou seja, os polos e zeros das FT dadas por (5-7). Os parâmetros da máquina relacionados a estas correntes de decaimento rápido são chamados subtransitórios (denotados por  $L''$  e  $T''$ ), enquanto aqueles relacionados às componentes de decaimento lento são chamados parâmetros transitórios

(denotados por  $L'$  e  $T'$ ). Os parâmetros relacionados à operação em regime permanente são chamados parâmetros síncronos.

Estas constantes de tempo e os respectivos valores assumidos pela indutância operacional em função da frequência ( $L_d$ ,  $L'_d$ ,  $L''_d$ ,  $L_q$ ,  $L''_q$ ) são chamados parâmetros padrão. Um exemplo da indutância operacional  $L_d(s)$  onde são discriminados os parâmetros padrão pode ser observado na Fig. 3.

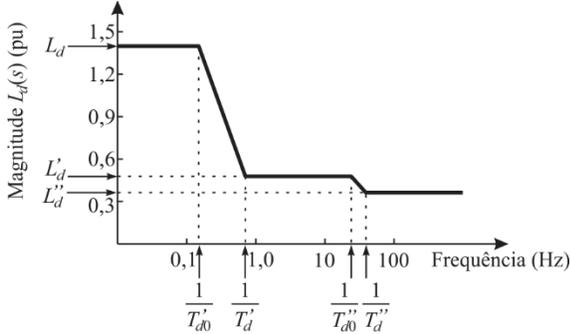


Fig. 3. Exemplo de uma função  $L_d(s)$ .

Em GS de polos salientes com rotor laminado, os parâmetros operacionais associados aos circuitos de eixo  $q$  apresentam apenas componentes de natureza subtransitória (mais rápidas) [9], uma vez que o entreferro é maior ao longo do eixo  $q$  devido à construção do rotor, como observado na Fig. 4, onde  $\theta_e$  representa  $90^\circ$  elétricos. Desta forma, os parâmetros transitórios de eixo  $q$  podem ser desconsiderados. De acordo com [9], os parâmetros padrão podem ser calculados conforme (8-11).

$$L_d = L_d(s = 0) \quad (8)$$

$$L'_d = L_d \frac{T'_d}{T'_{d0}} \quad (9)$$

$$L''_d = L_d \frac{T'_d T''_d}{T'_{d0} T''_{d0}} \quad (10)$$

$$L''_q = L_q \frac{T''_q}{T''_{q0}} \quad (11)$$

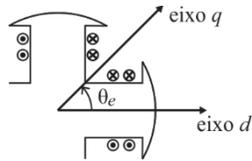


Fig. 4. Exemplo de rotor de polos salientes.

Determinando as indutâncias operacionais através do ensaio SSFR, os parâmetros padrão da máquina podem ser obtidos.

### III. STANDSTILL FREQUENCY RESPONSE

O SSFR e vários outros ensaios são detalhados em [3]. Esta seção tem por objetivo discutir o procedimento padrão de aplicação do teste. O objetivo do ensaio é medir amplitude e fase de quatro FT, incluindo aquelas de (5-7).

O teste é realizado com os terminais da máquina em aberto, desconectados do sistema de potência e de excitação, com rotor em repouso. As correntes de frequência variável aplicadas à máquina devem ter amplitude pequena o suficiente para evitar mudanças na temperatura, geralmente na faixa de 0,5% da corrente nominal do estator [2], que podem afetar o valor de

resistência dos enrolamentos. É recomendado o uso de um analisador de resposta em frequência capaz de medir frequências na faixa de 0,001 a 1 kHz [3]. É necessário o uso de um gerador de sinais que atenda a essa faixa de frequências.

Neste caso, os sinais de tensão e corrente aplicados à máquina serão medidos com um osciloscópio e processados no MATLAB®, onde serão filtrados para análise do espectro de frequências, com o objetivo de obter amplitude e fase dos sinais. Cada medida das FT tem aproximadamente 15 pontos de amplitude e fase por década. As FT que compõem o teste e suas relações com as variáveis da máquina são descritas abaixo.

#### A. Parâmetros de eixo direto

As primeiras três funções de transferência são medidas com o rotor do GS alinhado ao eixo magnético formado entre as fases  $a$  e  $b$  ligadas em série [2].

1)  $Z_d(s)$  – Impedância operacional de eixo direto: Essa FT é definida como a razão dada por (12) e é igual a  $R_a + sL_d(s)$ . Conhecendo  $R_a$ , a impedância operacional de eixo direto pode ser calculada como (13).

$$Z_d(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta e_{fd}=0} \quad (12)$$

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (13)$$

2)  $G(s)$  – FT do fluxo de armadura para o enrolamento de campo: É definida como a razão dada por (14).

$$G(s) = \frac{\Delta e_d(s)}{s \Delta e_{fd}(s)} \Big|_{\Delta i_d=0} \quad (14)$$

3)  $Z_{af0}$  – Impedância de transferência da armadura para enrolamento de campo: Definida como a razão dada por (15).

$$Z_{af0}(s) = \frac{\Delta e_{fd}(s)}{\Delta i_d(s)} \Big|_{\Delta i_{fd}=0} \quad (15)$$

#### B. Parâmetros de eixo em quadratura

A última FT do procedimento é medida com o eixo magnético do rotor à  $90^\circ$  do eixo magnético formado entre as fases  $a$  e  $b$  ligadas em série.

1)  $Z_q(s)$  – Impedância Operacional de Eixo em Quadratura: Essa função de transferência é definida como a razão dada por (16) e é igual a  $R_a + sL_q(s)$ , onde  $R_a$  é o mesmo para ambos os eixos. A indutância operacional de eixo em quadratura pode ser calculada como (17).

$$Z_q(s) = \frac{\Delta e_q(s)}{\Delta i_q(s)} \quad (16)$$

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \quad (17)$$

A norma [2] recomenda a medição das quatro FT dadas por (13), (14), (15) e (17) para caracterizar de forma completa o comportamento dinâmico da máquina.

A abordagem proposta neste artigo tem como objetivo a medição de apenas duas destas FT para obtenção dos parâmetros padrão do GS, uma vez que, seguindo a metodologia de alocação

de polos e zeros proposta, as demais funções de transferência não são necessárias. Estes parâmetros serão utilizados para simulação da máquina no MATLAB®.

#### IV. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O SSFR foi executado em um GS de 380 V, 5 kVA e quatro pares de polos salientes, disponível no laboratório do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – GEPOC da UFSM. O gerador é acionado por um motor de corrente contínua com regulação manual da velocidade através da tensão terminal aplicada. As medições foram executadas utilizando um osciloscópio Tektronix MDO3034 e um gerador de sinais Tektronix AFG3022B, além de ponteiras de tensão e corrente.

De modo a executar o teste na forma mais simples possível, apenas as medidas de  $L_d(s)$  e  $L_q(s)$  são necessárias, uma vez que, das equações (5) e (7), sabe-se que estes parâmetros operacionais contém todas as constantes de tempo do GS de polos salientes. Para obtenção destas funções, são medidas as impedâncias operacionais  $Z_d(s)$  e  $Z_q(s)$  conforme o diagrama da Fig. 5. A posição do rotor é ajustada, ora para medição em eixo direto, ora para eixo em quadratura. Durante a medição de  $Z_q(s)$ , a condição do enrolamento de campo é indiferente, podendo estar em aberto ou em curto-circuito.  $Z_{d,q}(s)$  são obtidas conforme (18), sendo  $\Delta e(s)$  e  $\Delta i(s)$  os sinais aplicados.

Conforme [10] e [13], as medidas em frequências abaixo de 0,01 Hz podem ser eliminadas do teste tomando-se uma medição precisa de  $R_a$ . O valor CC da resistência por fase do estator deve ser igual a aquele calculado conforme o procedimento sugerido na norma [2] usando estas medidas em baixas frequências. Essa simplificação elimina os sinais mais poluídos por ruído do teste e reduz o tempo total do ensaio, já que estes sinais de baixa frequência possuem grandes períodos. Sendo assim, as medidas foram executadas em uma faixa de frequências de 0,01 a 300 Hz. O valor CC de  $R_a$  medido foi de 1,87  $\Omega$ .

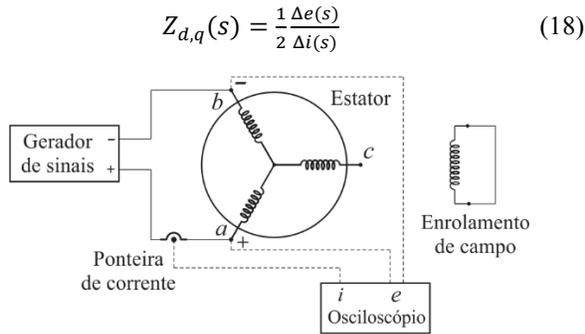


Fig. 5. Diagrama de medição das indutâncias operacionais.

##### A. Procedimento experimental

O arranjo do teste montado em laboratório pode ser visualizado na Fig. 6.

1) *Medidas de eixo direto*: Com o enrolamento de campo curto-circuitado e o rotor alinhado ao eixo magnético formado pelas fases  $a$  e  $b$ , a impedância operacional de eixo direto da Fig. 7 foi obtida. Em baixas frequências, o valor de  $Z_d(s)$  se aproxima da medida CC do valor de  $R_a = 1,87 \Omega$ , se mostrando uma simplificação razoável, uma vez que, quando  $s$  se aproxima de zero  $Z_d(s) = R_a$ . A indutância operacional  $L_d(s)$  é obtida através de (13) e mostrada na Fig. 8.

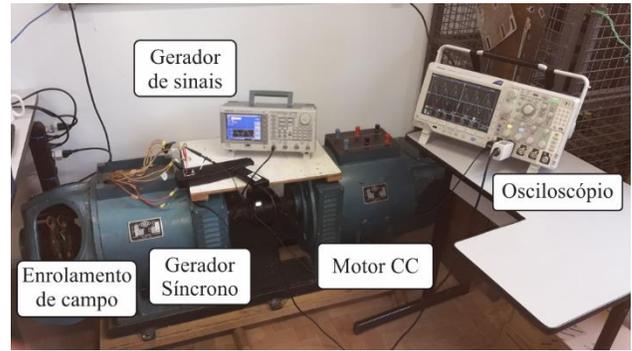


Fig. 6. Arranjo físico do procedimento.

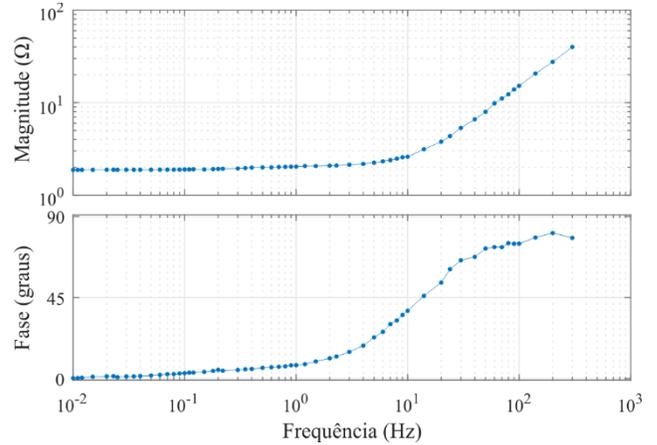


Fig. 7. Resultado experimental: Impedância operacional de eixo direto medida.

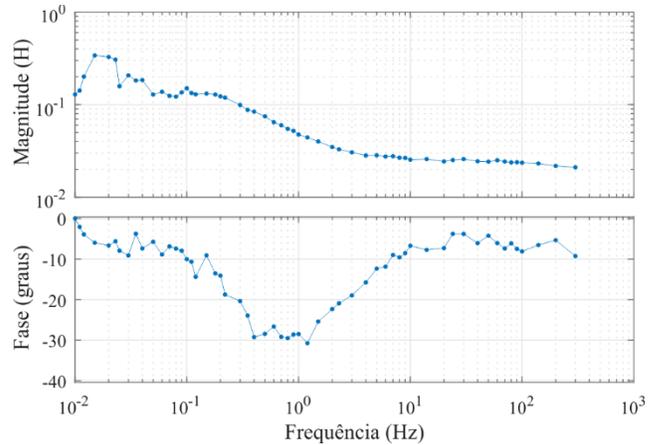


Fig. 8. Resultado experimental: Indutância operacional de eixo direto calculada.

2) *Medidas de eixo em quadratura*: Na segunda parte do teste, o rotor é posicionado em quadratura ao eixo magnético formado pelas fases  $a$  e  $b$ . A impedância operacional de eixo em quadratura  $Z_q(s)$  é medida conforme o esquema da Fig. 5.  $L_q(s)$  é calculado conforme (17) e a característica obtida é mostrada na Fig. 9.

As formas de onda obtidas estão de acordo com o esperado conforme os exemplos mostrados na norma [2]. Devido à imprecisão nas medidas em baixas frequências, como já

esperado para GS de polos salientes [4], as formas de onda de  $L_d(s)$  e  $L_q(s)$  devem ser corrigidas antes da obtenção dos parâmetros padrão.

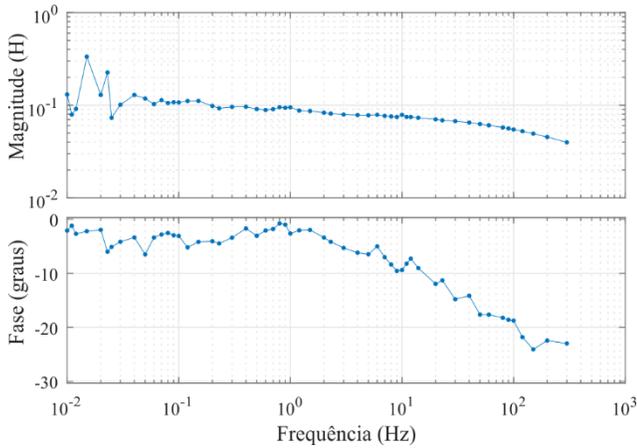


Fig. 9. Resultado experimental: Indutância operacional de eixo em quadratura calculada.

### B. Parâmetros de regime permanente

Os pontos em baixas frequências nas duas indutâncias operacionais estão sujeitos à muita incerteza causada por ruído ou dificuldade na aferição do ângulo da impedância. Como a parte resistiva é muito maior que a parte indutiva dessa impedância, o ângulo de atraso entre os sinais de tensão e corrente é muito pequeno, tornando-se difícil de ser medido com precisão. Conforme a frequência aumenta, a parte indutiva da impedância aumenta e o ângulo torna-se mais fácil de ser medido.

Como  $s = 0$  representa a condição de regime permanente dos parâmetros, os pontos em baixas frequências se aproximam dos valores de regime permanente não-saturados (uma vez que o ensaio é executado com níveis muito baixos de tensão e corrente) e podem ser ajustados por estes valores. Estes parâmetros podem ser obtidos através dos ensaios CCA e CCC, que são executados com a máquina girando à velocidade síncrona e variando-se a corrente de campo do GS. A descrição detalhada dos ensaios pode ser encontrada em [2]. A Fig. 10 apresenta estas características juntamente com a linha de entreferro para o GS ensaiado.

A indutância síncrona não saturada  $L_{du}$  pode ser calculada a partir da tensão na linha de entreferro e corrente na CCC para uma mesma corrente de campo. A tensão de campo correspondente à tensão nominal da máquina na CCA é 0,85 A. Para uma mesma excitação, a corrente de curto-circuito é de 4,76 A e a tensão na linha de entreferro é de 396,92 V. Assim, a reatância síncrona não saturada pode ser calculada como (19) e a indutância correspondente para uma frequência de 60 Hz é calculada como (20).

$$X_{du} = \frac{(396,92 \text{ V})/\sqrt{3}}{4,76 \text{ A}} = 48,10 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (19)$$

$$L_{du} = \frac{48,10 \text{ } \Omega}{2\pi(60 \text{ Hz})} = 127,60 \text{ mH}/\text{fase} \quad (20)$$

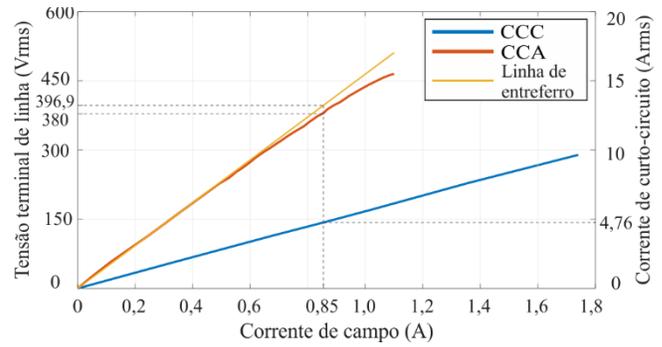


Fig. 10. Resultados experimentais de ensaios em regime permanente.

### C. Estimação de parâmetros operacionais

A Fig. 8 mostra que a medição dos pontos abaixo de 0,05 Hz apresentou muita incerteza. Então, o valor de  $L_d$  da equação (5) é tomado como valor de  $L_{du}$ , assim,  $L_d(s=0) = 127,6 \text{ mH}$ . Baseado nesse ajuste, um método gráfico foi utilizado para localização dos polos e zeros da FT de segunda ordem de  $L_d(s)$ , gerando a função estimada da Fig. 11. A FT em função das constantes de tempo, na forma de (5), é dada por (21).

$$L_d(s)_{\text{estimada}} = 0,1276 \frac{(1+0,10101s)(1+0,00625s)}{(1+0,47619s)(1+0,00769s)} \quad (21)$$

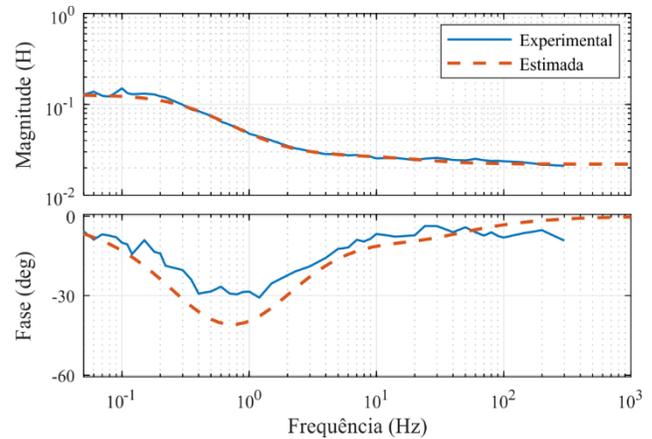


Fig. 11. Função  $L_d(s)$  experimental (azul) e estimada (laranja).

A estimação de  $L_d(s)$  apresenta melhores resultados quando se toma como prioridade o ajuste da amplitude ao invés da fase [8]. Um melhor ajuste entre as curvas pode ser obtido utilizando um método numérico para alocação dos polos e zeros. Os parâmetros calculados conforme (8-10) são:  $T'_d = 0,10101 \text{ s}$ ;  $T'_{d0} = 0,47619 \text{ s}$ ;  $T''_d = 0,00625 \text{ s}$ ;  $T''_{d0} = 0,00769 \text{ s}$ ;  $L_d = 127,60 \text{ mH}$ ;  $L'_d = 27,06 \text{ mH}$ ;  $L''_d = 21,99 \text{ mH}$ .

No caso de eixo em quadratura, torna-se mais difícil de estimar uma FT adequada, uma vez que as correntes de eixo  $q$  fluem entre os polos e parcialmente pelo ferro do rotor [14]. Ainda, para este eixo, não existiam dados em regime permanente para o ajuste dos dados do SSFR devido às limitações no acionamento da máquina primária. Assim, apenas os dados de eixo direto serão validados nesse trabalho. Os parâmetros de eixo em quadratura considerados, obtidos através das curvas da Fig. 9 são:  $T'_q = 0,38461 \text{ s}$ ;  $T''_{q0} = 0,53191 \text{ s}$ ;  $L_q = 110,07 \text{ mH}$ ;  $L''_q = 39,83 \text{ mH}$ .

#### D. Simulação

O GS foi simulado no MATLAB® utilizando os parâmetros padrão de indutâncias e constantes de tempo levantados na seção anterior. A velocidade da máquina primária é considerada constante e igual a velocidade síncrona. Um degrau na corrente de campo é aplicado com a máquina girando à velocidade nominal e com os terminais em aberto. O mesmo procedimento é realizado no arranjo experimental e os resultados são comparados na Fig. 12.

As limitações no acionamento da máquina primária não permitem a execução de um teste de curto-circuito abrupto no GS sem alterar a frequência das tensões geradas. Assim, uma vez que o enrolamento de campo faz parte do eixo direto, os parâmetros de eixo  $d$  são validados a partir da dinâmica de excitação da tensão terminal de linha  $V_l$  após um degrau na excitação, mostrado na Fig. 12(a). A Fig. 12(b) mostra a comparação entre as envoltórias da tensão terminal experimental frente à simulada. A Fig. 12(c) mostra o degrau na tensão de campo e a Fig. 12(d) apresenta a corrente de campo experimental frente à simulada.

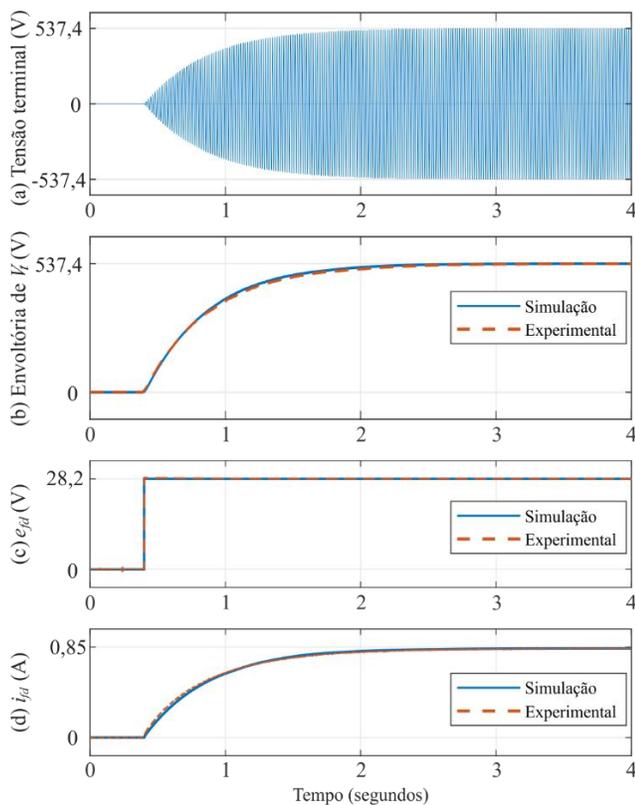


Fig. 12. Comparação dos resultados à terminais abertos.

#### V. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma nova abordagem mais simples para estimar parâmetros dinâmicos de GS de baixa potência. Através das relações que levam até (5), (6) e (7) descritas em [9] e [11], as resistências e indutâncias dos modelos da Fig. 1 podem ser encontradas. A abordagem proposta dispensa instrumentação especial, sendo realizada com instrumentos disponíveis em laboratórios como osciloscópios e gerador de sinais. A faixa de frequências foi reduzida para simplificação do procedimento. Duas funções de transferência foram

negligenciadas, uma vez que todas as informações necessárias para a modelagem proposta podem ser obtidas a partir de  $Z_d(s)$  e  $Z_q(s)$ , e testes clássicos foram realizados para ajuste dos dados obtidos através do SSFR devido a dificuldades encontradas na aplicação do teste em máquinas de pequena potência, diferente do que se observa na faixa de potências dos geradores onde esse teste geralmente é aplicado.

Os parâmetros de eixo  $d$  obtidos foram validados comparando a simulação com a máquina real através da dinâmica de excitação da máquina, que apresentaram comportamento similar.

As limitações do arranjo experimental somente permitiram a validação dos parâmetros de eixo  $d$ . O SSFR, geralmente aplicado à grandes unidades geradoras, se mostrou uma alternativa adequada no levantamento de parâmetros de máquinas síncronas de polos salientes de pequena potência.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCT-GD) e órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo 17/2551-0000517-1).

#### REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power Systems Stability Analyses, *IEEE Std.* 1110-2002.
- [2] IEEE Guide Test Procedures for Synchronous Machine, IEEE Standard 115, May. 2010.
- [3] V. Pavlicek, J. Fort, M. Pittermann and B. Skala, "Comparing the Low-Cost Measuring Devices for Standstill Frequency Response (SSFR) Testing for Electric Machines," 2020 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, 2020, pp. 1-4.
- [4] P. L. Dandeno *et al.*, "Experience with standstill frequency response (SSFR) testing and analysis of salient pole synchronous machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1209-1217, Dec. 1999.
- [5] A. Belqorchi, U. Karaagac, J. Mahseredjian and I. Kamwa, "Standstill Frequency Response Test and Validation of a Large Hydrogenerator," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2261-2269, May 2019.
- [6] P. L. Dandeno and A. T. Poray, "Development of Detailed Turbogenerator Equivalent Circuits from Standstill Frequency Response Measurements," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 4, pp. 1646-1655, April 1981.
- [7] M. E. Coultres and W. Watson, "Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 4, pp. 1480-1489, April 1981.
- [8] D. Y. Park, H. C. Karmaker, G. E. Dawson and A. R. Eastham, "Standstill frequency response testing and modeling of salient-pole synchronous machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 3, pp. 230-236, Sept. 1998.
- [9] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
- [10] S. Rakotovololona, M. Bergeron, J. Cros, P. Viarouge, "Parameter Identification from SSFR Tests and d-q Model Validation of Synchronous Generator" *Proceedings, IEMDC conf. 2015*, p. 454-460, 2016.
- [11] P. Krause, "Analysis of Electrical Machinery", New York: IEEE Press, 1995.
- [12] G. Zafarabadi, E. A. Boroujeni, "Identification of Generator Parameters From SSFR Test for Montazer-Qaem powerplant" *Universities Power Engineering Conference. UPEC. 43<sup>rd</sup> International*, 2008.
- [13] C. Danielsson and C. Sadarangani, "Experimental determination of the parameters for a salient rotor synchronous machine with and without pole screens," *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, 2008, pp. 1-6.