

Estimação On-Line de Parâmetros da Máquina Síncrona usando Medição Sincronizada de Fasores e Simulação Dinâmica Híbrida

V. Zimmer e I. C. Decker

LabPlan

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, Brasil

valmor.zimmer@posgrad.ufsc.br, ildemar.decker@ufsc.br

A.S. e Silva

Labspot

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, Brasil

aguinaldo.s.silva@ufsc.br

Resumo— Neste trabalho é proposta uma metodologia de estimação *on-line* de parâmetros de modelos dinâmicos de máquinas síncronas. Utilizam-se dados de medição sincronizada de fasores e simulação dinâmica híbrida para obter os desvios das trajetórias causados por erros nos parâmetros dos modelos. A estimação de parâmetros é pseudo-acoplada pois, os parâmetros mecânicos são estimados em uma primeira etapa desacoplada das equações elétricas, e os parâmetros elétricos são estimados em outra etapa, cujas equações são acopladas às equações mecânicas. São utilizados dados de duas PMUs, uma ligada aos terminais da máquina, e outra que fornece o sinal de referência angular. O ajuste de parâmetros baseia-se no uso de funções de sensibilidade da trajetória e mínimos quadrados não-linear. São estimados os parâmetros e os valores iniciais das variáveis internas da máquina. A metodologia foi aplicada em um modelo simplificado, onde foram obtidos resultados satisfatórios e promissores para a aplicação em modelos mais detalhados.

Palavras chave— estimação de parâmetros, máquinas síncronas.

I. INTRODUÇÃO

Modelos de simulação compõem a base do planejamento e operação de sistemas de energia elétrica (SEE), sendo fundamental garantir a coerência de tais modelos, haja vista que grandes perturbações ocorreram comprovadamente devido as discrepâncias existentes entre simulações realizadas no planejamento da operação e medidas obtidas de sistemas elétricos [1].

Dentre os modelos dinâmicos dos SEE o modelo de máquinas síncronas é de extrema importância, pois o desempenho dos SEE é fortemente ligado ao comportamento dessas máquinas, sendo recomendado validar seus modelos periodicamente [2]. A validação *on-line*, ou seja, usando as perturbações que ocorrem naturalmente no sistema elétrico é uma excelente alternativa, pois não requer a submissão de ensaios, que exigem a retirada de operação da máquina.

Entretanto, existem dificuldades associadas à estimação *on-line* de parâmetros, dentre elas destacam-se: a obtenção de medidas que permitam estimar parâmetros dinâmicos; a

definição da condição inicial de operação da máquina, que depende de parâmetros que podem estar errados; e a baixa identificabilidade de parâmetros.

O crescimento dos SEE e consequente aumento na complexidade da operação motivaram o emprego de ferramentas que aumentam a segurança operacional desses sistemas. Uma dessas ferramentas é a Medição Sincronizada de Fasores (MSF), que permite o monitoramento dinâmico do sistema, possibilitando a estimação *on-line* de parâmetros de modelos dinâmicos de simulação.

Neste trabalho é proposta uma metodologia de estimação *on-line* de parâmetros de modelos de máquinas síncronas. São utilizados dados de MSF e Simulação Dinâmica Híbrida (SDH) para obter os desvios das trajetórias causados por erros nos parâmetros dos modelos. O processo de estimação é pseudo-acoplado pois, os parâmetros mecânicos são estimados em uma primeira etapa desacoplada das equações elétricas, e os parâmetros elétricos são estimados em outra etapa, cujas equações são acopladas às equações mecânicas. Para isso são utilizados dados de duas PMUs, uma ligada aos terminais da máquina, e outra que fornece o sinal de referência angular. O processo de ajuste de parâmetros baseia-se no uso de funções de sensibilidade da trajetória (FST) e mínimos quadrados não-linear, onde são estimados os parâmetros e os valores iniciais das variáveis internas da máquina.

O artigo está organizado da seguinte forma: Na seção II são descritos os conceitos relacionados à estimação de parâmetros dinâmicos usando FST, MSF e SDH. Nas seções III e IV são apresentados, respectivamente, a metodologia de estimação e um estudo de caso empregado no modelo clássico da máquina síncrona. Por fim, na seção V são descritas as principais conclusões do trabalho.

II. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

Um modelo pode ser definido como uma representação matemática de um sistema físico, cuja função primordial é prever seu comportamento. Modelos estáticos permitem avaliar um determinado ponto de operação, já modelos dinâmicos permitem a análise do comportamento no tempo.

Em modelos estáticos a condição de otimalidade é obtida com a minimização de uma função objetivo, por meio do cálculo de derivadas de funções algébricas não-lineares. Em modelos dinâmicos, tais derivadas são funções no tempo, as quais são definidas como funções de sensibilidade da trajetória (FST) [3], que quantificam a variação da solução de equações diferenciais com relação à variação de seus parâmetros [4].

A. Funções de Sensibilidade da Trajetória

A teoria de análise de sensibilidade da trajetória em sistemas dinâmicos tem sido amplamente estudada na engenharia, pois a influência de erros em parâmetros de modelos pode causar problemas em sistemas de controle. Assim, os erros devem ser analisados de modo que os controles sejam capazes de mitigar os efeitos causados pelas variações de parâmetros do sistema real em relação ao modelo utilizado.

Aplicações de FST tiveram início empregando funções de sensibilidade no domínio da frequência [5]. Em [6] foi introduzida a teoria de análise de sensibilidade da trajetória no domínio do tempo, a qual pode ser empregada em sistemas lineares, não-lineares, invariantes e variantes no tempo, conforme apresentado a seguir.

Considere um sistema não-linear representado por:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, p, u) \\ y &= h(x, p, u) \end{aligned} \quad (1)$$

onde x é o vetor de variáveis de estado, y é o vetor variáveis de saída, u é o vetor variáveis de entrada e p é o vetor de parâmetros do modelo a ser estimado. As funções f e h são não-lineares, contínuas e *Lipschitzianas* em p e u . As sensibilidades da trajetória podem ser obtidas derivando as soluções (x) e a saída (y) em relação aos parâmetros (p_i), $i = 1, \dots, \text{número de parâmetros}$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} &= \frac{\partial f(x, p, u)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p_i} + \frac{\partial f(x, p, u)}{\partial p_i} \\ \frac{\partial y}{\partial p_i} &= \frac{\partial h(x, p, u)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p_i} + \frac{\partial h(x, p, u)}{\partial p_i} \end{aligned} \quad (2)$$

As FST podem ser calculadas como subproduto da solução numérica das EDOs [4][7], forma utilizada neste trabalho, ou, de modo aproximado, por simulações subsequentes utilizando parâmetros acrescidos de uma pequena diferença de seu valor original [8][9][10]. Utiliza-se na sequência do texto a seguinte simbologia para deixar mais claras e sucintas as equações:

$$\frac{\partial x}{\partial p_i} = \lambda_x^{p_i}$$

B. Mínimos Quadrados em Modelos Dinâmicos

A teoria de mínimos quadrados e FST têm sido amplamente utilizadas na estimação de parâmetros em aplicações de sistemas elétricos [7][10][11][12]. O algoritmo de ajuste de parâmetros é formulado como um problema de otimização, isto é, minimiza-se o funcional J ;

$$J(p) = \frac{1}{2} \int_0^{T_0} (y_{med} - y_{sim})^T \cdot (y_{med} - y_{sim}) dt \quad (3)$$

onde y_{med} é o vetor de variáveis de saída do sistema real (valor medido) e y_{sim} é o vetor de variáveis de saída do modelo simulado.

A condição de otimalidade $\frac{\partial J(p)}{\partial p} = 0$ é dada por:

$$G(p) = \frac{\partial J(p)}{\partial p} = - \int_0^{T_0} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)^T (y_{med} - y_{sim}) dt = 0 \quad (4)$$

onde $G(p)$ é a matriz *Jacobiana*. O método de Newton-Raphson pode ser usado para resolver a equação não-linear (4). Partindo do vetor inicial $p = p_0$, o ajuste dos parâmetros da k -ésima iteração é dado por:

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} - \Gamma(p)^{-1} G(p)|_{p=p^{(k)}} \quad (5)$$

onde $\Gamma(p)$ é a matriz *Hessiana* obtida derivando-se $G(p)$ em relação ao vetor de parâmetros p :

$$\Gamma(p) = - \int_0^{T_0} \frac{\partial^2 y^T}{\partial p^2} (y_{med} - y) dt + \int_0^{T_0} \frac{\partial y^T}{\partial p} \frac{\partial y}{\partial p} dt|_{p=p^{(k)}} \quad (6)$$

Desprezando os termos de segunda ordem $\Gamma(p)$ pode ser aproximada por,

$$\Gamma(p) \approx \int_0^{T_0} \frac{\partial y^T}{\partial p} \frac{\partial y}{\partial p} dt|_{p=p^{(k)}} \quad (7)$$

onde $\frac{\partial y}{\partial p}$ é a matriz de sensibilidades.

O processo de estimação é realizado iterativamente de modo que o funcional (3) (soma quadrática dos resíduos) atinja um valor previamente definido. Entretanto, nem sempre esse processo é convergente. Na seção seguinte são tratados os fatores que dificultam a convergência deste processo.

C. Dificuldades na Estimação e Estratégias de Contorno

Dentre as dificuldades encontradas para empregar o método de estimação destacam-se:

1) Reprodutividade de Distúrbios

Um dos problemas encontrados na estimação de parâmetros dinâmicos é a reprodutividade dos distúrbios de modo a validar o modelo, ou seja, a dificuldade em representar as condições externas do modelo a ser estimado. Uma alternativa encontrada para contornar isso é o uso de SDH [13] por meio MSF.

a) Medição Sincronizada de Fasores (MSF)

A MSF foi concebida na década de 1980 [14], consistindo basicamente de equipamentos que medem tensões e correntes sob a forma de fasores em altas taxas de envio. Esses fasores são sincronizados no tempo via sinal de GPS e enviados a uma base de dados comum, que organiza os dados sincronizados e disponibiliza para aplicações [15]. Os fasores estimados pela MSF tem melhorado significativamente devido as evoluções tecnológica e normativa, onde se destaca a última versão da norma IEEE C37.118 – 2011 que define requisitos de desempenho para o regime dinâmico, ou seja, durante perturbações. Na Figura 1 é ilustrada a estrutura básica de um Sistema de Medição Sincronizada de Fasores.

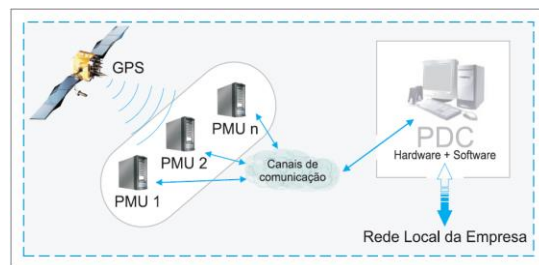


Figura 1. Estrutura básica da MSF.

b) Simulação Dinâmica Híbrida (SDH)

Associado a MSF foi desenvolvido o conceito de Simulação Dinâmica Híbrida (SDH), que baseia-se na simulação dinâmica de sistemas de pequeno porte, como uma central geradora, sem a necessidade de simular os distúrbios e o sistema elétrico como um todo, mas utilizando sinais medidos durante distúrbios para injetar nos processos de simulação [13]. Tal conceito tem sido utilizado na estimação de parâmetros, de forma semelhante, denominado por “sincronização” [16].

A SDH consiste na injeção de dados de grandezas elétricas, obtidas via medição de sistemas reais, em programas de simulação dinâmica de sistemas de energia elétrica. Ela pode ser interpretada como uma interface entre sistemas reais e simulações convencionais, podendo trazer para o ambiente de simulação, eventos ocorridos nos sistemas físicos. A SDH pode ser empregada na validação de modelos dinâmicos, pois permite a comparação entre grandezas medidas e simuladas [13].

2) Identificabilidade e Informatividade

A equação (5), que define os ajustes no vetor de parâmetros ao longo do processo de minimização, exige a inversão da matriz $\Gamma(p)$, ou seja, tal matriz deve ter *posto* completo (matriz não-singular). A invertibilidade da matriz *Hessiana* está diretamente relacionada a *identificabilidade* do modelo [17]. Esta matriz é calculada a cada iteração e, conseqüentemente, tem seus valores alterados ao longo do processo iterativo.

Caso a matriz $\Gamma(p)$ possua *posto* incompleto, existem parâmetros não identificáveis e, conseqüentemente, não é possível inverter a matriz *Hessiana*, inviabilizando o processo de estimação. Tal característica torna necessária a utilização de algum tratamento prévio do problema [7][18].

Comumente a matriz *Hessiana* é não-singular, mas está na vizinhança da singularidade, isso ocorre quando há mal-condicionamento numérico da matriz (*cond*). Os valores de *cond* variam da unidade a valores extremamente altos, quanto mais próximo da unidade melhor é o condicionamento da matriz.

Outro aspecto que influencia o condicionamento numérico de $\Gamma(p)$ é o tipo de perturbação que afeta o sistema. Pois existem parâmetros que não influenciam significativamente as trajetórias em determinados distúrbios, mas em outros sim. Esse aspecto é pouco abordado neste tipo de análise, sendo citado em alguns trabalhos como em [8], porém não formalizado nos trabalhos que envolvem estimação de parâmetros usando FST.

Um conceito existente que pode ser associado a este aspecto é o da *informatividade*, relatado em [19][20], cuja abordagem visa avaliar a qualidade da estimação de preditores de modelos distintos, no qual associa-se a *identificabilidade* à estrutura do modelo, e a *informatividade* ao sinal de entrada.

De modo análogo, tal conceito pode ser empregado na estimação de parâmetros usando FST, sendo avaliada a *informatividade* da perturbação aplicada no sistema. Ou seja, uma perturbação deve ser suficientemente informativa de modo que possa sensibilizar as FST de todos os parâmetros do modelo. Esses conceitos nos remetem as seguintes observações: O modelo deve permitir a *identificabilidade* de todos os parâmetros e a perturbação deve ter *informatividade*

suficiente para sensibilizar todos parâmetros, de modo que isso se reflita nas FST e nas medidas do sistema.

Parâmetros não identificáveis e perturbações pouco informativas degeneram o condicionamento numérico da matriz jacobiana, levando-a quase à singularidade, dificultando a inversão dessa matriz. Para contornar esse problema, são propostas na literatura algumas soluções como:

a) Desacoplamento do problema

O desacoplamento visa estimar os parâmetros mecânicos (D e H) em uma etapa e os parâmetros elétricos (reatâncias e constantes de tempo associadas) em outra etapa [7]. Tal estratégia reduz o tamanho do problema e evita que parâmetros mecânicos, em geral muito sensíveis, afetem o processo de estimação de parâmetros elétricos.

b) Tamanho do Passo

O controle do tamanho do passo visa evitar que o incremento errôneo de um parâmetro leve o processo de estimação a divergência [18]. Essa estratégia emprega, em geral, o critério da direção com maior decaimento no erro.

3) Definição de valores iniciais

Antes de realizar a simulação dinâmica de máquinas síncronas é necessário conhecer a condição inicial das variáveis internas da máquina. Essas são calculadas usando as equações da máquina, que estão sujeitas a parâmetros errôneos. Em [7] as condições iniciais da máquina são consideradas parâmetros a serem estimados, mas o ângulo do rotor é estimado adicionando uma equação algébrica que o relaciona com as correntes elétricas. Todavia, na metodologia apresentada neste trabalho, considera-se o ângulo do rotor como um parâmetro normal a ser estimado, cuja descrição é apresentada em sequência.

III. METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO EMPREGADA NO MODELO CLÁSSICO DA MÁQUINA SÍNCRONA

A proposta deste trabalho visa o emprego de FST, MSF e SDH em um processo pseudo-acoplado de estimação de parâmetros da máquina síncrona. Nesse processo inicialmente são estimados os parâmetros mecânicos utilizando apenas as equações mecânicas da máquina, em sequência são estimados os parâmetros elétricos e variáveis internas iniciais da máquina síncrona considerando as equações mecânicas e elétricas. Deste modo, a tensão interna e o ângulo do rotor no instante inicial passam a fazer parte do conjunto de parâmetros a ser estimado.

Na Figura 2 é ilustrada a metodologia proposta neste trabalho. O uso de duas PMUs permite o emprego de um ângulo de referência distante da perturbação, que pode ser considerado como uma referência síncrona as perturbações próximas à máquina em estudo. Por meio dessas medidas é obtido o sinal injetado na SDH e os sinais medidos e simulados utilizados na avaliação. Ambos os sinais são utilizados no processo de estimação de parâmetros, que realimenta o modelo utilizado na SDH com parâmetros ajustados.

A utilização da SDH facilita a reprodução da perturbação e aumenta a área de convergência do processo de estimação, pois a injeção de medidas na simulação faz com que a SDH, mesmo sujeita a um modelo com parâmetros errados que levariam o sistema a instabilidade, permanece estável devido à injeção de medidas de um sistema estável. Na seção seguinte é detalhada a aplicação da metodologia.

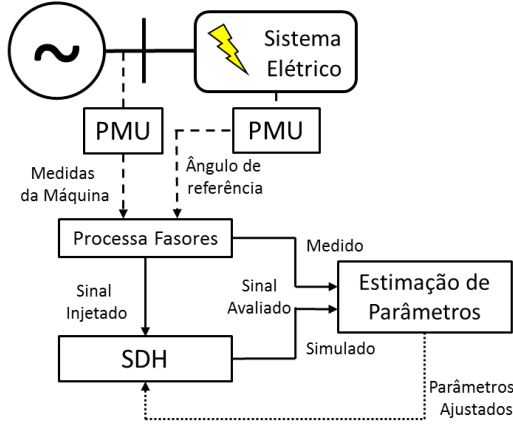


Figura 2. Esquema utilizado na estimação de parâmetros usando MSF e SDH.

A. Aplicação ao Modelo Clássico

A representação da máquina síncrona pelo modelo clássico consiste de um circuito elétrico com uma tensão constante (E'_q) atrás de uma reatância transitória de eixo direto (x'_d), sendo desprezadas as variações da tensão de campo e seus efeitos. Deste modo as equações elétricas são dadas apenas pelas equações algébricas do estator:

Equações Elétricas

$$V_q = E'_q + x'_d I_d \quad V_d = -x'_d I_q \quad (8)$$

$$I_d = \frac{V}{x'_d} \cos(\delta - \theta) \quad I_q = \frac{V}{x'_d} \sin(\delta - \theta) \quad (9)$$

$$P_e = E'_q I_q \quad Q_e = E'_q I_d - x'_d (I_d^2 + I_q^2) \quad (10)$$

$$P_e = \frac{E'_q V}{x'_d} \sin(\delta - \theta) \quad Q_e = -\frac{V^2}{x'_d} + \frac{E'_q V}{x'_d} \cos(\delta - \theta) \quad (11)$$

V_d, V_q : componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal do gerador (pu)

I_d, I_q : componentes de eixo direto e quadratura da corrente de estator do gerador (pu)

E'_q : tensão transitória de eixo em quadratura (pu)

x'_d : reatância transitória de eixo direto (pu)

P_e, Q_e : potência ativa e reativa de saída da máquina (pu)

δ : posição angular do rotor em relação a uma referência síncrona (rad)

V, θ : Módulo e ângulo da tensão de saída da máquina (pu, rad)

Equações mecânicas

$$\dot{\omega} = \dot{\delta} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e - D\omega) \quad \dot{\delta} = \omega \omega_0 \quad (12)$$

ω : velocidade angular (pu)

ω_0 : velocidade angular nominal (rad/s)

P_m : potência mecânica aplicada ao eixo do gerador (pu)

H : é a constante de inércia (MWS/MVA)

D : é o coeficiente de amortecimento (pu de potência.s/rad)

Visando aplicar a metodologia proposta no modelo clássico, o processo de estimação é dividido em duas partes.

1) Estimação de Parâmetros Mecânicos

Na primeira etapa estima os parâmetros mecânicos D e H , onde nesse caso o sinal injetado na SDH é a potência elétrica (P_e), e o sinal avaliado é a velocidade angular (ω) como ilustrado na Figura 3. Observa-se que além de P_e é necessário injetar a medida de ω no instante inicial do período de análise ($\omega(0)$). Nessa etapa a SDH utiliza somente a equação da velocidade angular, e o ω estimado pela SDH é injetado nas FST.

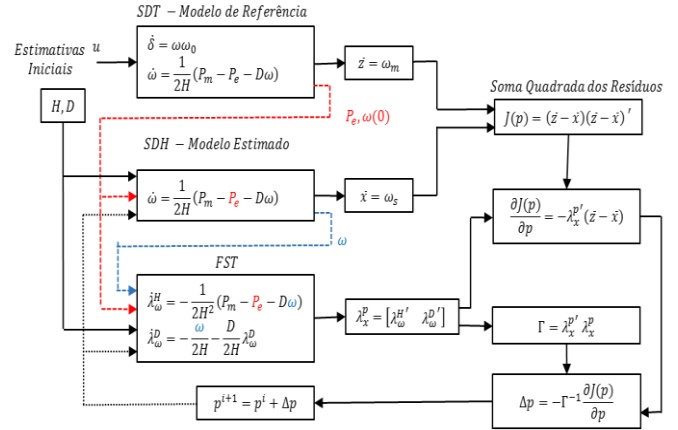


Figura 3. Esquema de estimação de parâmetros mecânicos.

Atingida a convergência na estimação dos parâmetros mecânicos, passa-se à estimação dos parâmetros elétricos.

1) Estimação de Parâmetros Elétricos

Neste caso o sinal injetado deve permitir que os erros dos parâmetros elétricos sejam verificados nos sinais avaliados. Deste modo, são injetadas as medidas de módulo e ângulo da tensão de saída da máquina (V_t e θ_t), bem como o valor de $\omega(0)$. Neste processo de estimação são estimados: a reatância transitória de eixo direto (x'_d), e os valores iniciais da tensão interna (E'_q) e do ângulo do rotor (δ). Os sinais avaliados são as potências ativa e reativa de saída da máquina, o esquema que ilustra essa etapa de estimação é apresentado na Figura 4.

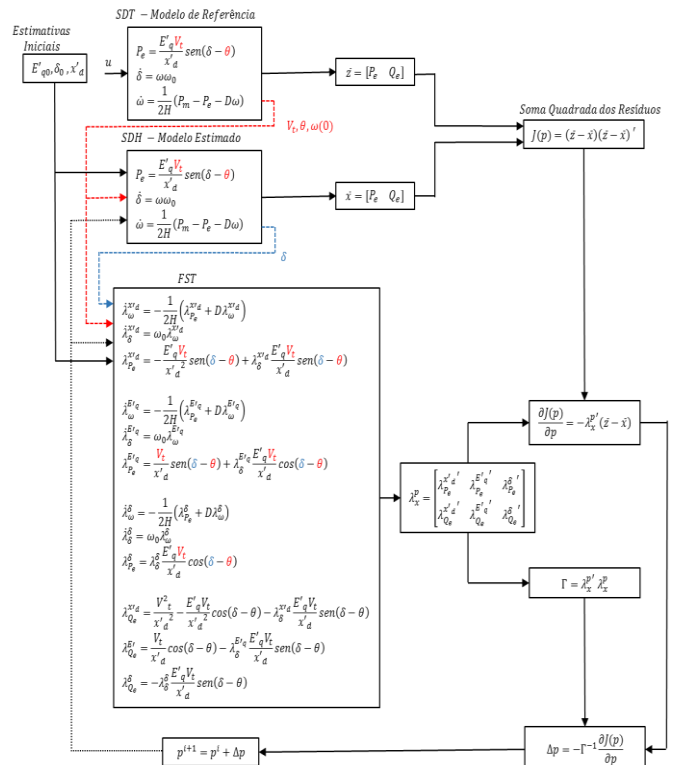


Figura 4. Esquema de estimação de parâmetros elétricos e estados do modelo clássico

IV. ESTUDO DE CASO

A. Dados do sistema

O caso de estudo baseia-se em [21] onde considera-se uma central termelétrica constituída de 4 UG de 555MW, 24kV, 60Hz suprimindo a carga de uma barra infinita através de duas LT de acordo com a Figura 5. O gerador é representado pelo modelo clássico usando os seguintes dados em pu na base 2220MVA e 24kV.

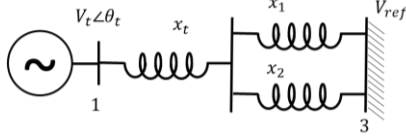


Figura 5. Diagrama unifilar do caso de estudo. Baseado em [21]

$$\begin{aligned} P &= 0,9 & Q &= 0,436 \\ V_t \angle \theta_t &= 1,0 \angle 28,34^\circ & V_{ref} \angle \theta_{ref} &= 0,90081 \angle 0^\circ \\ H &= 3,5 & D &= 0 - 10 \\ x'_d &= 0,3 & x_t &= 0,15 \\ x_1 &= 0,5 & x_2 &= 0,93 \end{aligned}$$

B. Considerações sobre as simulações

Para realizar o estudo de caso foram considerados:

Simulação Dinâmica Tradicional (SDT): foi utilizada para simular os dados medidos, ou seja, com parâmetros verdadeiros. Na SDT são simuladas as perturbações que afetam o sistema.

Simulação Dinâmica Híbrida (SDH): é utilizada para simular o modelo com parâmetros incorretos, sendo que, neste caso não é necessário simular a perturbação, pois são injetadas medidas que possuem informações sobre a perturbação. As medidas injetadas foram obtidas por meio da SDT.

Erro na Estimativa Inicial dos Parâmetros: devem ser considerados diferentes níveis de erro na estimativa inicial dos parâmetros. Tal medida é capaz de verificar a robustez do processo.

Perturbações: foram empregadas diferentes perturbações para ilustrar a *identificabilidade* do modelo e a *informatividade* da perturbação, são elas:

- *Curto-circuito na extremidade da LT2 com a barra 2 e subsequente abertura da LT2 em 70ms, removendo o curto-circuito (CC-LT2);*
 - *Abertura da LT2 (AB-LT2);*
 - *Queda de 10% de tensão na barra de referência (QT-Vref);*
- O período de análise considerado é de 5 segundos nos distúrbios AB-LT2 e QT-Vref, e 4,930 segundos no CC-LT2.

Estimativa Inicial: as estimativas iniciais das variáveis da máquina podem ser analisadas como os parâmetros, forçando um erro pré-definido na SDH. Entretanto, essas variáveis foram simuladas com estimativas iniciais fixas, sendo $E'_q = 1 \text{ pu}$ e $\delta = 25^\circ$.

C. Resultados

Inicialmente é apresentado o processo de convergência obtido na estimação de parâmetros mecânicos e elétricos usando a perturbação AB-LT2 com erro inicial de -50% nos parâmetros. Na Figura 6 é ilustrada a velocidade angular medida e simulada ao longo do processo de estimação de parâmetros mecânicos, onde pode-se observar que as trajetórias se aproximam a medida que os parâmetros vão sendo ajustados.

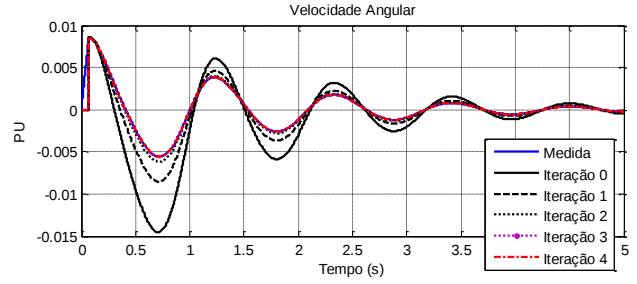


Figura 6. Velocidade Angular medida (SDT) e simulada no processo de estimação de parâmetros mecânicos

No Quadro 1 são apresentados os valores dos parâmetros mecânicos estimados e a soma dos quadrados dos resíduos ao longo do processo iterativo.

Quadro 1. Resultado do processo de estimação de parâmetros mecânicos

It	H	D	Jmec
0	1.750	5.000	0.39765599
1	2.626	7.500	0.04408874
2	3.282	9.372	0.00175158
3	3.487	9.959	0.00000590
4	3.500	10.000	0.00000000

Na Figura 7 são ilustradas as respostas da potência ativa e reativa de saída da máquina, medidas e simuladas ao longo do processo de convergência, sendo as linhas em vermelho o sinal medido e em preto os sinais simulados em cada iteração.

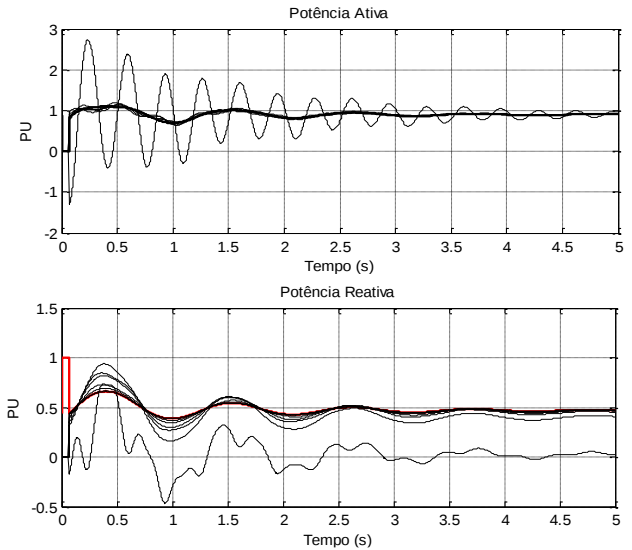


Figura 7. Respostas de sinais medidos e simulados ao longo das iterações.

No Quadro 2 são apresentados os valores dos parâmetros elétricos estimados e a soma dos quadrados dos resíduos ao longo do processo iterativo. Observe que o erro é bem maior em medidas de potência do que na medida de velocidade apresentada no Quadro 1.

Quadro 2. Resultado do processo de estimação de parâmetros elétricos

It	xld	El	d0	Jele
0	0.150	1.0000	25.000	24994.988227
1	0.162	1.0630	42.666	660.094468
2	0.198	1.0918	45.918	280.257407
3	0.214	1.1039	45.570	142.004617
4	0.258	1.1332	47.774	42.783688
5	0.280	1.1487	47.840	5.626230
6	0.299	1.1619	48.389	0.102522
7	0.300	1.1626	48.343	0.000002

Por fim, na Figura 8 são apresentados os resultados de convergência da metodologia nas três perturbações estudadas com diferentes patamares de erro inicial dos parâmetros, o qual foi variado de -90% a $+90\%$.

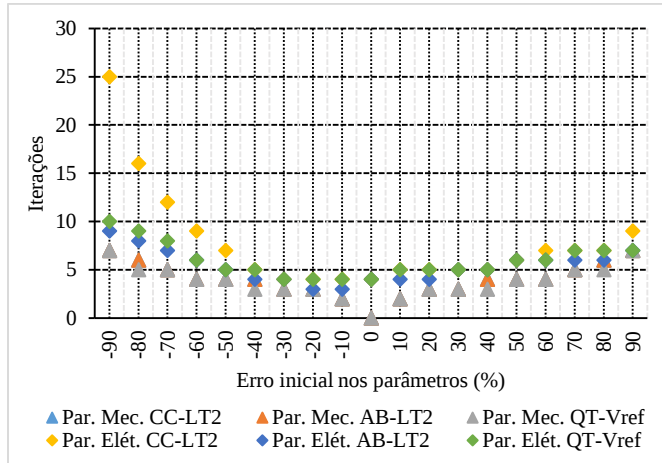


Figura 8. Número de iterações na estimação de parâmetros mecânicos e elétricos em diferentes perturbações e com níveis diferentes de erro inicial.

Observe que no caso de erro inicial igual a zero a estimação de parâmetros mecânicos não ocorre, mas a etapa de estimação de parâmetros elétricos é necessária para estimar os valores iniciais de E'_q e δ . Além disso, observa-se que há um aumento no número de iterações com o aumento, em módulo, no erro inicial dos parâmetros, mas em todos casos a metodologia conseguiu estimar os parâmetros da máquina.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de estimação on-line de parâmetros de máquinas síncronas empregando MSF, SDH e FST, sendo necessário obter medidas de duas PMUs, uma instalada nos terminais da máquina sob estudo e outra distante dessa máquina. O processo de estimação é realizado em duas etapas. A primeira (desacoplada) estima os parâmetros mecânicos utilizando somente as equações mecânicas. A segunda (acoplada) estima os parâmetros elétricos e as variáveis internas da máquina no início do período de análise, para isso utiliza as equações mecânicas e elétricas, formando uma metodologia pseudo-acoplada. Os resultados obtidos aplicando a metodologia no modelo clássico demonstram a robustez da estimação, pois a metodologia conseguiu estimar os parâmetros corretamente com erros de $\pm 90\%$ de erro inicial dos parâmetros.

REFERÊNCIAS

- [1] D. N. Kosterev, C. W. Taylor, and W. A. Mittelstadt, "Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 967–979, Aug. 1999.
- [2] Western Systems Coordinating Council, "WECC Test Guidelines for Synchronous Unit Dynamic Testing and Model Validation." 1997.

- [3] E. P. T. Cari, "Metodologia de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos não-lineares com aplicação em geradores síncronos," text, Universidade de São Paulo, 2009.
- [4] J. B. Cruz, *Feedback systems*. McGraw-Hill, 1971.
- [5] Hendrik W. Bode, *Network Analysis & Feedback Amplifier Design*.
- [6] F. J. Murray and K. S. Miller, *Existence Theorems for Ordinary Differential Equations*. Courier Corporation, 2013.
- [7] E. P. T. Cari, L. F. C. Alberto, and N. G. Bretas, "Metodologia prática para estimação de parâmetros de geradores síncronos a partir de medidas de perturbações," *Sba Controle Autom. Soc. Bras. Autom.*, vol. 23, no. 4, pp. 453–464, Aug. 2012.
- [8] J. Rose and I. A. Hiskens, "Estimating wind turbine parameters and quantifying their effects on dynamic behavior," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–7.
- [9] F. Trevisan, I. C. Decker, M. N. Agostini, and J. L. J. e Silva, "Validação de Parâmetros de Unidades Geradoras usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada e Simulação Dinâmica Híbrida," in *Anais do XXI SNPTTEE*, Florianópolis - SC - Brasil, 2011.
- [10] J. E. Gómez and I. C. Decker, "A novel model validation methodology using synchrophasor measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 207–217, Feb. 2015.
- [11] J. J. Sanchez-Gasca, C. J. Bridenbaugh, C. E. J. Bowler, and J. S. Edmonds, "Trajectory sensitivity based identification of synchronous generator and excitation system parameters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 1814–1822, Nov. 1988.
- [12] I. A. Hiskens and A. Koeman, "Parameter estimation from power system disturbance measurements," in *1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98*, 1998, vol. 2, pp. 667–672 vol.2.
- [13] Z. Huang, R. T. Guttromson, and J. F. Hauer, "Large-scale hybrid dynamic simulation employing field measurements," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, 2004*, pp. 1570–1576 Vol.2.
- [14] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [15] I. C. Decker, M. N. Agostini, D. Dota, M. R. Bastos, and S. L. Zimath, "Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada no Sistema de Transmissão de 440kV da CTEEP," in *Anais do SNPTTEE*, Florianópolis - SC - Brasil, 2011.
- [16] E. P. T. Cari, E. A. R. Theodoro, A. P. Mijolaro, N. G. Bretas, L. F. C. Alberto, E. P. T. Cari, E. A. R. Theodoro, A. P. Mijolaro, N. G. Bretas, and L. F. C. Alberto, "Trajectory Sensitivity Method and Master-Slave Synchronization to Estimate Parameters of Nonlinear Systems, Trajectory Sensitivity Method and Master-Slave Synchronization to Estimate Parameters of Nonlinear Systems," *Math. Probl. Eng. Math. Probl. Eng.*, vol. 2009, 2009, p. e387317, Sep. 2009.
- [17] I. A. Hiskens, "Identifiability of hybrid system models," in *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications, 2000, 2000*, pp. 133–137.
- [18] M. Burth, G. C. Verghese, and M. Velez-Reyes, "Subset selection for improved parameter estimation in on-line identification of a synchronous generator," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 218–225, Feb. 1999.
- [19] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. Pearson Education, 1998.
- [20] M. Gevers, A. S. Bazanella, X. Bombois, and L. Miskovic, "Identification and the Information Matrix: How to Get Just Sufficiently Rich?," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 12, pp. 2828–2840, Dec. 2009.
- [21] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 1994.