



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/16

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO -GDS**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS USANDO SINCRÓFASORES**

**Valmor Zimmer(\*)  
LabPlan/UFSC**

**Ildemar C. Decker  
LabPlan/UFSC**

**Aguinaldo S. e Silva  
Labspot/UFSC**

**RESUMO**

Neste informe técnico são descritos os desenvolvimentos de uma metodologia para a estimação de parâmetros de modelos de máquinas síncronas usando sincrofases. A metodologia é formada pela proposição de um modelo de estimação que considera a condição inicial das variáveis internas da máquina como parâmetros a serem estimados. A estimação pode ser realizada em duas etapas pseudoacopladas ou totalmente acoplada. Explora-se o método de mínimos quadrados não-linear por meio de funções de sensibilidade da trajetória híbridas e de otimização restrita. Os resultados demonstram que a metodologia é capaz de estimar parâmetros tanto em ambiente de simulação como em dados reais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Estimação de Parâmetros, Funções de Sensibilidade da Trajetória, Máquinas síncronas, PMU.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A Medição Sincronizada de Fasores (MSF) é um dos conceitos chave no desenvolvimento e modernização dos atuais sistemas de energia elétrica. Principalmente em sistemas que cobrem países interligados ou de dimensões continentais, como é o caso dos EUA e China, onde já existem sistemas de MSF implantados, e sendo utilizados pelos operadores. Do mesmo modo, o Brasil está na iminência da implantação de um amplo sistema projetado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), o que permitirá explorar as inúmeras aplicações que a tecnologia proporciona, dentre elas a validação de modelos dinâmicos de simulação.

A validação de modelos é tradicionalmente dividida em validação de componentes e de sistemas. A primeira refere-se a ensaios realizados em equipamentos que devem ser instrumentalizados e sujeitos a distúrbios que dificultam sua operação comercial. Já a segunda, refere-se a reprodução de grandes perturbações utilizando o caso de simulação estática obtido do estimador de estados e a sequência de eventos obtida dos agentes envolvidos na perturbação (1).

O uso da MSF na validação de componentes permite empregar o conceito de Simulação Dinâmica Híbrida (SDH), que consiste da injeção de medidas no ambiente de simulação dinâmica, tornando desnecessário o uso de ensaios, pois podem ser utilizados dados de perturbações naturais do sistema, ou da obtenção do caso base e de sequência de eventos, pois essas informações estão contidas nas medidas injetadas, trazendo grandes vantagens ao processo de validação.

Os resultados da SDH são respostas híbridas do sistema simulado, que permitem avaliar o quão discrepante estão os modelos em relação as medidas, e também possibilita avaliar o desempenho de grandezas de difícil mensuração, como é o caso das representações das tensões internas e do ângulo do rotor.

Caso as discrepâncias sejam consideráveis, torna-se necessário ainda o emprego de metodologias de calibração de modelos, que, em geral, são baseadas em processos de estimação de parâmetros. Sobre esse aspecto existem questões relativas a *identificabilidade* de parâmetros, e da *informatividade* do distúrbio utilizado, que podem dificultar o processo de estimação, pois ambas estão relacionadas a sensibilidade dos parâmetros do modelo estimado.

Tendo em vista que ao longo de um dia de operação inúmeros distúrbios ocorrem nos sistemas elétricos, e que a incorporação da MSF seja inevitável, podem ser desenvolvidas rotinas de validação continuada dos sistemas elétricos, melhorando significativamente os modelos utilizados. Entretanto, existem dificuldades impostas pela MSF, tais como a taxa de envio de sincrofasores, a presença de ruído nos sinais e a presença de erros no processo de estimação de sincrofasores pela PMU.

No presente trabalho são descritos os resultados do desenvolvimento de uma metodologia para a estimação de parâmetros de modelos de máquinas síncronas usando sincrofasores. A metodologia é formada pela proposição de um modelo de estimação que considera a condição inicial das variáveis internas da máquina como parâmetros a serem estimados. O processo de estimação pode ser realizado em uma etapa, ou dividido em duas etapas relativas aos parâmetros mecânicos e elétricos. Exploram-se o uso do método de mínimos quadrados não-linear por meio de funções de sensibilidade da trajetória híbridas e de otimização restrita solucionada pelo método Primal-Dual de Pontos Interiores.

Os resultados obtidos demonstram que a metodologia é capaz de estimar os parâmetros de máquinas síncronas, tanto em ambiente de simulação (controlado) como em dados reais. No ambiente de simulação são explorados diversos distúrbios e a presença de ruído. Já no caso real exploram-se os problemas relativos a MSF que estão presentes de modo descontrolado e que tendem a degradar os resultados da estimação, como a baixa taxa de envio de sincrofasores. O artigo está estruturado da seguinte forma. Na seção 2 discorre-se sobre a Medição Sincronizada de Fasores. Na seção 3 descreve-se o modelo da máquina síncrona. Na seção 4 apresenta-se o processo de estimação. E, por fim, nas seções 5 e 6 são apresentados os resultados e descritas as principais conclusões.

## 2.0 - MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES

A Medição Sincronizada de Fasores (MSF), caracterizada de forma sistêmica pelos Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF), é uma tecnologia em pleno desenvolvimento, tanto no que se refere aos equipamentos, quanto a normatização e consolidação de aplicações. Isso é evidenciado quando verificamos a quantidade de pesquisas associadas ao tema, envolvendo praticamente todas as aplicações de monitoramento, controle e proteção de sistemas de energia elétrica.

As vantagens da MSF sobre os atuais sistemas de monitoramento são a alta taxa de transmissão e a obtenção sincronizada de medidas sob a forma de fasores, ou seja, módulos e ângulos, cuja viabilidade de obtenção com precisão só foi possível com a utilização de tecnologias de sincronização por meio de satélites, em especial o uso do GPS (*Global Positioning System*).

No que se refere ao emprego da MSF na estimação de parâmetros de modelos dinâmicos de máquinas síncronas podem-se destacar como vantagens:

- Emprego de medidas fasoriais, grandezas que estão na mesma dimensão de programas de análise de estabilidade transitória;
- Uso de perturbações naturais do sistema possibilitando a criação de rotinas de validação mediante a ocorrência de perturbações, sem a necessidade de realizar ensaios que demandam a parada da máquina;
- Utilização de Simulação Dinâmica Híbrida (SDH) permitindo isolar o sistema de interesse, o que será tratado na seção 4.1.

Entretanto, existem algumas desvantagens associadas as medidas fasoriais como:

- Erros inerentes ao processo de estimação de fasores;
- Presença de ruído de medição;
- Baixa taxa, tradicionalmente de 16,667ms, quando comparadas com variáveis simuladas em programas de análise de estabilidade transitória, aproximadamente 0,01ms a 0,1ms.

Mas cabe aqui ressaltar que embora existam problemas associados, a MSF está fornecendo medidas de um sistema real, livre de aproximações de modelagem, o que não ocorre em simulações, onde modelos sempre serão sujeitos a aproximações necessárias para sua obtenção. Além disso, a MSF está sujeita a normas de desempenho que estão sob revisão de organizações internacionais (2), que constantemente impõem índices de desempenho que permitem avaliar a qualidade das medidas fasoriais.

## 3.0 - MODELO DA MÁQUINA SÍNCRONA

A maior parte da energia que alimenta os sistemas elétricos é proveniente de usinas que empregam máquinas síncronas. Consequentemente é de grande importância a representação fiel dos fenômenos dinâmicos associados a essas máquinas. Para isso, deve-se utilizar modelos e parâmetros adequados.

A modelagem dinâmica da máquina síncrona é estudada desde o início do século XX, onde, tanto a modelagem quanto as ferramentas de análise evoluíram. O modelo cuja representação básica da máquina síncrona se dá em razão de suas características construtivas foi proposto ao longo do seu desenvolvimento, não tendo uma referência base definida. Essa modelagem representa fielmente os fenômenos associados a máquina, entretanto as equações que descrevem o comportamento da máquina síncrona possuem variáveis dependentes da posição do rotor em relação ao estator, o que dificulta a análise de problemas relacionados a máquinas.

Esse modelo evoluiu com a introdução do conceito de duplo-eixo (eixos direto e em quadratura) proposto inicialmente para máquinas de pólos salientes. Essa modelagem foi estendida e consolidada, sendo expandida para máquinas síncronas, assíncronas, e diferentes tipos de construção, fato que tornou conhecida a transformação do modelo de componentes de fase para modelo de duplo-eixo como Transformação de Park ou Transformação dq0.

O trabalho de (3) classificou as reatâncias da máquina de acordo com os principais fenômenos observados em estudos de estabilidade, classificando as reatâncias em sequência positiva, negativa ou zero, de regime permanente,

transitório ou subtransitório e de eixo direto ou em quadratura. Entretanto, existem diferentes modelos que empregam essas considerações. Uma análise detalhada dos diferentes modelos de máquinas síncronas é apresentado em (4). O modelo de máquina síncrona empregado nesse trabalho baseia-se no modelo 4 de (5), que é apropriado para representar máquinas síncronas de polos salientes. Esse modelo é de quinta ordem, com duas equações diferenciais para as equações mecânicas:

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e - D(\omega - \omega_0)) \quad (3.1)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (3.2)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular e  $\delta$  é o ângulo do rotor da máquina, ambos em pu,  $H$  é a constante de inércia em s,  $\omega_0$  é a velocidade angular base (nominal) do sistema em rad./s,  $P_m$  é a potência mecânica do eixo da máquina e  $D$  é o coeficiente de amortecimento em pu de potência.s/rad, utilizado para simbolizar o efeito de enrolamentos amortecedores do rotor e outros efeitos.

E três equações diferenciais para as equações elétricas, que buscam representar o comportamento da máquina sob ponto de vista de seus parâmetros elétricos, constituídos basicamente pelas impedâncias e constantes de tempo relativas aos eixos direto e em quadratura e aos regimes permanente, transitório e subtransitório.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d)I_d] \quad (3.3)$$

$$\dot{E}''_q = \frac{1}{T''_{do}} [E'_q - E''_q + (x'_d - x''_d)I_d] \quad (3.4)$$

$$\dot{E}''_d = \frac{1}{T''_{q0}} [-E''_d - (x_q - x''_q)I_q] \quad (3.5)$$

Além das equações diferenciais, as equações algébricas do estator são dadas por:

$$V_q = E'_q - r_a I_q + x'_d I_d \quad (3.6)$$

$$V_d = E''_d - r_a I_d - x''_q I_q \quad (3.7)$$

E as potências ativa e reativa podem ser calculadas por:

$$P_e = E''_q I_q + E''_d I_d + (x''_d - x''_q) I_d I_q - r_a |I|^2 \quad (3.8)$$

$$Q_e = E''_d I_q - E''_q I_d - x''_d I_d^2 - x''_q I_q^2 \quad (3.9)$$

onde:

#### Variáveis

$E'_q, E''_q$	Tensões internas transitória e subtransitórias de eixo em quadratura
$E''_d, E_{fd}$	Tensão interna subtransitória de eixo direto e tensão de campo
$P_e, Q_e$	Potências terminais ativa e reativa
$I_d, I_q, V_d, V_q$	Correntes e tensões terminais de eixo direto e em quadratura

#### Parâmetros

$x_d, x'_d, x''_d$	Reatâncias de regime, transitória e subtransitória de eixo direto
$x_q, x'_q, x''_q$	Reatâncias de regime e subtransitória de eixo em quadratura
$T'_{do}, T''_{do}$	Constantes de tempo transitória e subtransitória de eixo direto com estator em aberto
$T''_{q0}$	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura com estator em aberto
$r_a$	Resistência de armadura

No modelo considerado neste trabalho despreza-se a resistência de armadura ( $r_a$ ) e os efeitos da saturação magnética no estator e no rotor, dessa forma as equações (3.6) e (3.7) podem ser reescritas por.

$$I_d = \frac{V_t \cos(\delta - \theta) - E''_q}{x''_d} \quad (3.10)$$

$$I_q = \frac{V_t \sin(\delta - \theta) + E''_d}{x''_q} \quad (3.11)$$

E as equações de potência ativa e reativa podem ser reescritas como

$$P_e = \left( \frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x''_d} \right) \frac{V_t^2}{2} \sin 2(\delta - \theta) + \frac{E''_d V_t}{x''_q} \cos(\delta - \theta) + \frac{E''_q V_t}{x''_d} \sin(\delta - \theta) \quad (3.12)$$

$$Q_e = -\frac{V_t^2 \cos^2(\delta - \theta)}{x''_d} - \frac{V_t^2 \sin^2(\delta - \theta)}{x''_q} + \frac{E''_q V_t}{x''_d} \cos(\delta - \theta) - \frac{E''_d V_t}{x''_q} \sin(\delta - \theta) \quad (3.13)$$

Que são utilizadas nas SDH de modo a explorar os erros dos parâmetros e a injeção de medidas.

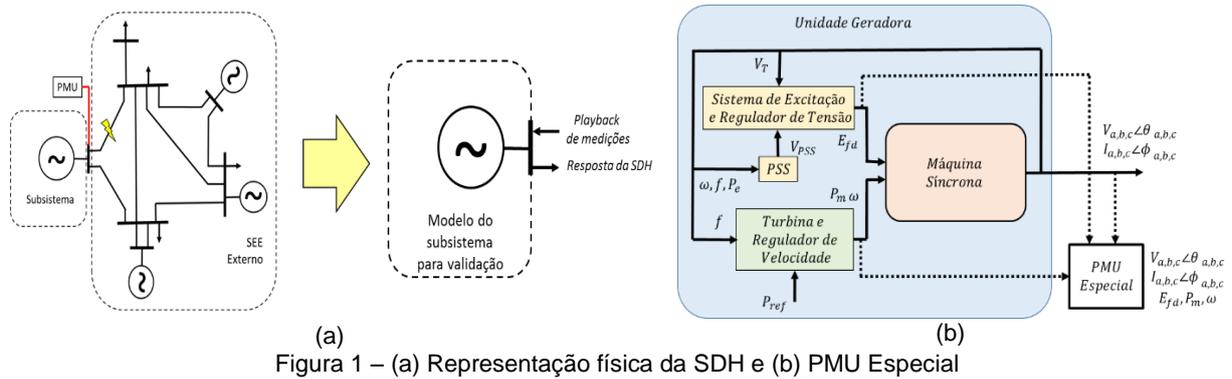
## 4.0 - ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

O processo de estimação de parâmetros é dividido basicamente em duas etapas:

- Obtenção da discrepância entre registro (resposta do sistema real) e simulação;
- Obtenção de parâmetros corrigidos visando a minimização da discrepância.

### 4.1 Obtenção de Discrepâncias

O processo de obtenção de discrepâncias entre registro e simulação é obtido por meio de Simulação Dinâmica Híbrida (SDH), onde são injetadas medidas no processo de simulação. Em geral, a SDH simplifica o processo de simulação, pois não é necessário definir a sequência e os instantes de eventos, pois as variáveis injetadas devem representar as perturbações no sistema elétrico. A representação física da SDH é apresentada na Figura 1 (a).



Matematicamente a SDH significa a injeção de variáveis medidas no processo de simulação, desta forma o sistema de equações algébrico-diferencial original sofre modificações, como apresentado nas equações abaixo.

*Simulação Dinâmica*

$$\dot{x} = f(x, z, u, p)$$

$$0 = g(x, z, u, p)$$

$$y = h(x, z, u, p)$$

*Simulação Dinâmica Híbrida*

$$\dot{x} = f(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)$$

$$0 = g(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)$$

$$y = h(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)$$

onde,

$x', x^*$  – vetor de variáveis de estados diferenciais sem variáveis conhecidas e conhecidas

$z', z^*$  – vetor de variáveis de estados algébricos sem variáveis conhecidas e conhecidas

$u', u^*$  – vetor de entradas sem variáveis conhecidas e conhecidas

$p, y$  – vetor de parâmetros e de saídas

Entretanto, existem dificuldades inerentes a esse processo, as quais estão associadas principalmente a disponibilidade de medidas a serem injetadas, onde é necessário obter medidas de difícil mensuração para simular apenas a máquina síncrona, como ilustrado na Figura 1 (b), a qualidade dessas medidas, que podem estar contaminadas por ruído, efeito de filtros dos medidores, erros no processo de estimação de fasores na PMU, e a intensidade das perturbações avaliadas, que devem ter intensidade suficiente para garantir a estimação.

Existem trabalhos que empregam a SDH da unidade geradora completa, onde são simulados, além da máquina síncrona, os sistemas de excitação, estabilizador (PSS), turbina e regulador de velocidade, como é o caso do (6), onde inclusive tenta-se estimar parâmetros do regulador de tensão, nesse caso são necessárias apenas medidas terminais da máquina. Porém, essa estratégia dificulta muito o processo de estimação de parâmetros, em virtude da correlação existente entre parâmetros da máquina e parâmetros do sistema de controle, de tal forma que os erros existentes em parâmetros da máquina afetam a estimação de parâmetros dos controladores, isso de forma recíproca, dificultando a estimação dos parâmetros. Uma das estratégias utilizada neste trabalho, proposta por (7), emprega o uso de PMUs especiais, que registrem medidas fasoriais (módulos e ângulos de tensões e correntes) e medidas não fasoriais ( $E_{fd}$ ,  $P_m$  e  $\omega$ ). Essa estratégia permite simular cada equipamento de forma isolada e por meio disso estimar os parâmetros dos modelos dinâmicos de cada elemento da unidade geradora.

Outro problema relativo a SDH é a inicialização das variáveis internas da máquina síncrona, as quais são inicializadas por meio das equações do modelo da máquina em um determinado ponto de operação, essas equações estão sujeitas aos erros das estimativas iniciais dos parâmetros, e portanto, a estimativa inicial dessas variáveis será errada, o que tende a dificultar o processo de estimação de parâmetros.

Um exemplo de SDH empregando diferentes níveis de erro é apresentada na Figura 2 e Figura 3. As respostas em vermelho representam o sistema de referência, ou seja, a resposta do sistema utilizado como base. As outras respostas em preto tracejado, rosa e azul são o resultado da SDH do modelo utilizando com variáveis injetadas o fasor de tensão terminal da máquina, a potência mecânica e a tensão de campo sob diferentes níveis de erro nos parâmetros, sendo eles 0%, +20% e -20% respectivamente.

As discrepâncias são avaliadas em variáveis que possam ser simuladas e medidas, que é o caso das potências ativa e reativa e eventualmente, no caso de uma PMU especial da velocidade angular.

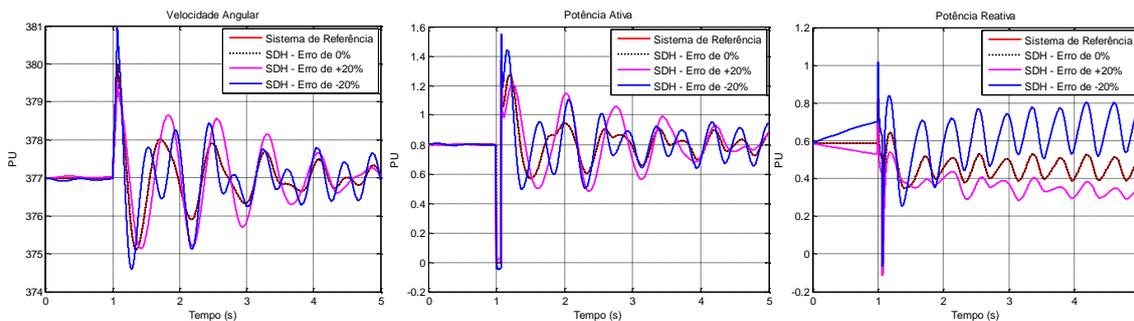


Figura 2 – Desempenho das variáveis  $\omega$ ,  $P_e$  e  $Q_e$  utilizando SDH com diferentes níveis de erro.

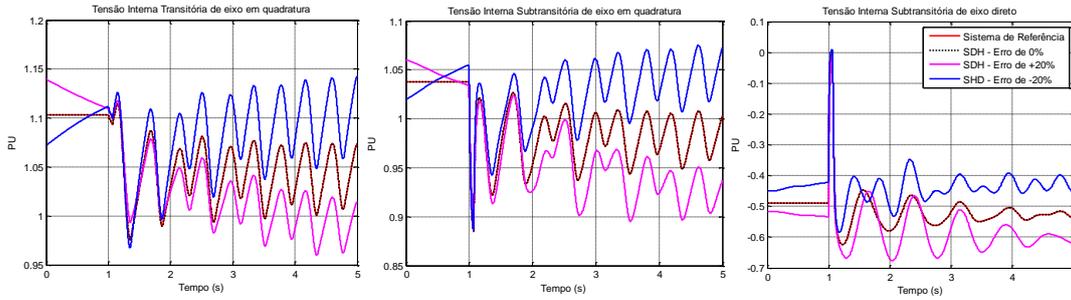


Figura 3 – Desempenho das variáveis internas  $E'_q, E''_q$  e  $E''_d$  utilizando SDH com diferentes níveis de erro.

4.2 Processo de Estimação

O processo de estimação de parâmetros utilizado neste trabalho consiste do uso de mínimos quadrados não-linear, entretanto, algumas características inovadoras foram introduzidas nesse processo, que está diretamente ligado ao processo de obtenção de discrepâncias e, conseqüentemente, das medidas disponíveis. Essas características são: Divisão do Processo de Estimação: estimar todos os parâmetros da máquina ao mesmo tempo é um processo difícil e diversos trabalhos propõem a divisão desse processo, (8). Neste trabalho, caso a PMU permita medir a velocidade angular da máquina, pode-se dividir o processo em estimação de parâmetros mecânicos e parâmetros elétricos.

Tabela 1 – Diferenças nas abordagens acoplada e pseudoacoplada

<b>Estimação Acoplada</b>		Medidas Injetadas	$V_t, \theta_t, E_{fd}, P_m$
		Variáveis Híbridas Injetadas	$E'_q, E''_q, E''_d, \omega$
		Variáveis Avaliadas	$P_e, Q_e$
		Parâmetros Estimados	$E'_{q0}, E''_{q0}, E''_{d0}, H, D, x_d, x'_d, x''_d, x_q, x''_q, T'_{d0}, T''_{d0}, T''_{q0}$
<b>Estimação Pseudoacoplada</b>	Parâmetros Mecânicos	Medidas Injetadas	$P_e, P_m$
		Variáveis Híbridas Injetadas	$\omega$
		Variáveis Avaliadas	$\omega$
		Parâmetros Estimados	$H, D$
	Parâmetros Elétricos	Medidas Injetadas	$V_t, \theta_t, E_{fd}, P_m$
		Variáveis Híbridas Injetadas	$E'_q, E''_q, E''_d, \omega$
		Variáveis Avaliadas	$P_e, Q_e$
		Parâmetros Estimados	$E'_{q0}, E''_{q0}, E''_{d0}, x_d, x'_d, x''_d, x_q, x''_q, T'_{d0}, T''_{d0}, T''_{q0}$

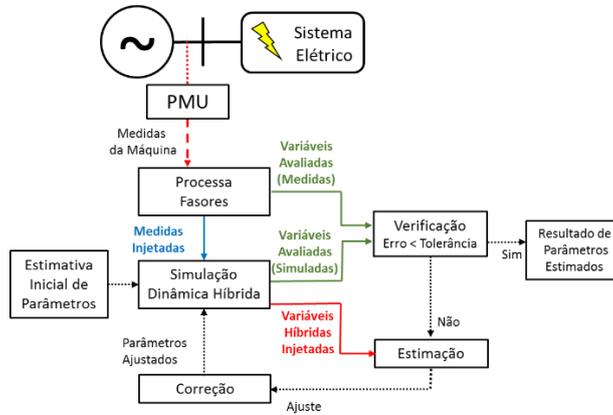


Figura 4 – Esquema da metodologia de estimação de parâmetros

Restrições: utiliza-se o método primal-dual de pontos interiores para inserir as restrições físicas dos parâmetros ao problema de minimização não-linear. São impostas restrições absolutas, impondo limites superiores e inferiores, e relacionais, que reduzem o espaço de busca.

Condição inicial das variáveis internas como parâmetros: Esta hipótese foi proposta em (8), e tende a tornar o processo de estimação mais simples, pois evita o cálculo das variáveis internas a cada iteração do processo de estimação, naquela abordagem a condição inicial do ângulo do rotor é obtida por aproximações, porém neste trabalho a condição inicial do ângulo do rotor é considerada como parâmetro;

Funções de Sensibilidade da Trajetória Híbrida: funções de sensibilidade são calculadas por meio da derivada parcial das equações que representam as variáveis avaliadas ( $\omega, P$  e  $Q$ ) em relação aos parâmetros a serem estimados ( $H, x'_d, etc.$ ), e evoluídas por meio de integração numérica. Essas FST são, portanto funções dependentes de parâmetros e variáveis, que podem ser medidas ou simuladas. A equação abaixo exemplifica as FSTH.

Funções de Sensibilidade da Trajetória

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial p} = \frac{\partial f(x, p, u)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial f(x, p, u)}{\partial p}$$

$$\frac{\partial y}{\partial p} = \frac{\partial h(x, p, u)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial h(x, p, u)}{\partial p}$$

Funções de Sensibilidade da Trajetória Híbrida

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial p} = \frac{\partial f(x', x'', z', z'', u', u'', p)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial f(x', x'', z', z'', u', u'', p)}{\partial p}$$

$$\frac{\partial y}{\partial p} = \frac{\partial h(x', x'', z', z'', u', u'', p)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial h(x', x'', z', z'', u', u'', p)}{\partial p}$$

De forma análoga ao processo de SDH, o conceito de FSTH emprega variáveis medidas, que são injetadas nas funções de sensibilidade, e do mesmo modo que a SDH representa um meio termo entre a resposta da simulação e a resposta do sistema real, o comportamento da FSTH tende a ser um meio termo entre as FST do sistema real e da simulação.

**Algoritmos de Levenberg-Marquardt:** Os Algoritmos de *Levenberg* e de *Levenberg-Marquardt* (9) são algoritmos que melhoram o condicionamento numérico do problema. Contudo, aumentam o número de iterações necessárias para atingir a convergência, atuam por meio de um fator de amortecimento, que melhora o condicionamento numérico e podem ser empregados em conjunto com o método PDPI.

## 5.0 - RESULTADOS

Esta seção visa primeiramente avaliar os resultados do processo de estimação de parâmetros sob diferentes aspectos, como por exemplo as abordagens de estimação, diferentes perturbações e a presença de ruído nas medidas. Realizadas essas análise emprega-se a metodologia em um caso real, onde tenta-se contornar as dificuldades relatadas.

### 5.1 Simulações

O caso base para as simulações consistem em um gerador (Modelo 4-Arrillaga) conectado a uma barra infinita por meio de um transformador, representado por  $x_t$  e duas linhas de transmissão (LTs) representadas por  $x_1$  e  $x_2$ , como ilustrado na Figura 5.

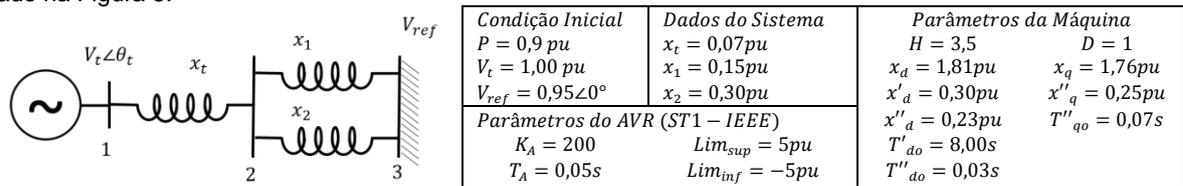


Figura 5 – Dados do sistema teste

O sistema teste é sujeito a quatro tipos de perturbações com o intuito de avaliar o processo de estimação em diferentes condições, as perturbações realizadas são: Curto-circuito na extremidade da LT1 com a barra 2 e subsequente abertura da LT1 após 70ms, removendo o curto-circuito (CC-LT1); Curto-circuito na extremidade da LT2 com a barra 2 e subsequente abertura da LT2 após 70ms, removendo o curto-circuito (CC-LT2); Abertura da LT1 (AB-LT1); e abertura da LT2 (AB-LT2). O comportamento das potências ativa e reativa nas quatro perturbações pode ser observado na Figura 6, onde verifica-se os diferentes impactos das perturbações.

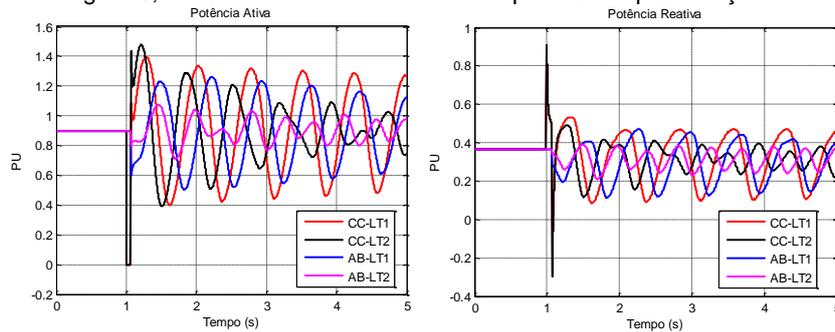


Figura 6 – Potências ativa e reativa nos quatro tipos de perturbações utilizadas

Uma forma de avaliar a sensibilidade dos parâmetros dos modelos em relação as diferentes perturbações é avaliar a magnitude dos valores singulares da matriz *Hessiana* utilizada no método de mínimos quadrados não-linear, e o condicionamento numérico dessa matriz. Na Tabela 2 são descritos tais valores, onde pode-se observar que parâmetros são mais sensíveis a diferentes perturbações.

Tabela 2 – Valores singulares relativos a cada um dos parâmetros utilizando a metodologia acoplada

Parâmetro	CC - LT1		CC - LT2		AB - LT1		AB - LT2	
	Class.	SVD	Class.	SVD	Class.	SVD	Class.	SVD
$E'_q$	8	$4,45 \cdot 10^4$	8	$2,69 \cdot 10^4$	8	$3,31 \cdot 10^4$	7	$1,95 \cdot 10^4$
$E''_d$	9	$1,10 \cdot 10^4$	9	$9,90 \cdot 10^3$	9	$1,19 \cdot 10^4$	8	$1,08 \cdot 10^4$
$E''_q$	11	$2,44 \cdot 10^3$	11	$2,07 \cdot 10^3$	10	$4,32 \cdot 10^3$	10	$3,60 \cdot 10^3$
$\delta$	5	$2,28 \cdot 10^5$	6	$1,39 \cdot 10^5$	4	$2,85 \cdot 10^5$	5	$1,27 \cdot 10^5$
$H$	13	$1,13 \cdot 10^2$	13	$8,82 \cdot 10^1$	13	9,16	14	0,32
$D$	3	$7,31 \cdot 10^5$	5	$3,10 \cdot 10^5$	3	$4,25 \cdot 10^5$	6	$3,03 \cdot 10^4$
$x_d$	10	$6,03 \cdot 10^3$	10	$4,98 \cdot 10^3$	11	$1,30 \cdot 10^3$	11	$2,21 \cdot 10^2$
$x_q$	12	$3,98 \cdot 10^2$	12	$3,11 \cdot 10^2$	12	$4,30 \cdot 10^1$	13	3,41
$x'_d$	7	$7,43 \cdot 10^4$	7	$5,91 \cdot 10^4$	7	$6,28 \cdot 10^4$	4	$1,68 \cdot 10^5$
$x''_d$	4	$5,75 \cdot 10^5$	4	$4,90 \cdot 10^5$	2	$1,08 \cdot 10^6$	3	$7,33 \cdot 10^5$
$x''_q$	1	$8,38 \cdot 10^6$	1	$8,55 \cdot 10^6$	1	$8,65 \cdot 10^6$	1	$8,74 \cdot 10^6$
$T'_{do}$	14	0,785	14	1,71	14	1,88	12	11,8
$T''_{do}$	6	$1,74 \cdot 10^5$	3	$9,80 \cdot 10^5$	5	$1,36 \cdot 10^5$	2	$4,21 \cdot 10^6$
$T''_{qo}$	2	$2,33 \cdot 10^6$	2	$3,45 \cdot 10^6$	6	$1,05 \cdot 10^5$	9	$3,92 \cdot 10^3$
Cond	$1,06 \cdot 10^6$		$5,00 \cdot 10^5$		$4,59 \cdot 10^6$		$2,72 \cdot 10^7$	

A metodologia proposta tem como intuito ser empregada de modo acoplado (estimação conjunta de parâmetros elétricos e mecânicos), caso não se tenha disponibilidade de medidas da velocidade angular, ou de modo pseudoacoplado se existe tal medida. Entretanto, foram realizados testes usando ambas as abordagens e verificou-se que processo de estimação torna-se extremamente complexo usando a metodologia acoplada, dificultando a estimação de parâmetros com erros menores que 5%. Já a abordagem pseudoacoplada consegue minimizar a discrepância, os resultados dessa abordagem aplicada na quatro perturbações com erro inicial de 10% nos parâmetros é apresentada na Tabela 3.

Observa-se que as perturbações que envolveram transitórios bruscos (curtos-circuitos) apresentaram pior desempenho na estimação de parâmetros mecânicos, e alguns parâmetros tiveram resultados piores do que o erro inicial, que são os casos de  $x_q$  e  $x''_q$ , para todos os casos e de  $T''_{do}$  e  $T''_{qo}$  para a AB-LT2.

Tabela 3 – Resultados da estimação pseudoacoplada

	Par. Mecânicos		Parâmetros Elétricos								Iterações Mec/Elet
	H	D	$x_d$	$x_q$	$x'_d$	$x''_d$	$x'_q$	$T'_{do}$	$T''_{do}$	$T''_{qo}$	
Real	3,500	1,0000	1,8100	1,7600	0,3000	0,2300	0,2500	8,0000	0,0300	0,0700	---
Inicial	3,850	1,1000	1,9901	1,9360	0,3300	0,2530	0,2750	8,8000	0,0330	0,0770	---
CC – LT1	3,4996	0,9431	1,8290	1,9852	0,3142	0,2364	0,2787	7,6711	0,0297	0,0730	6/270
CC – LT2	3,4996	0,9398	1,8205	1,9704	0,3130	0,2283	0,2766	7,7112	0,0317	0,0728	6/502
AB – LT1	3,4999	1,0081	1,8171	1,9653	0,3140	0,2382	0,2775	7,5847	0,0289	0,0685	4/555
AB – LT2	3,4999	1,0071	1,8363	2,0044	0,3051	0,2316	0,2782	7,6146	0,0377	0,1000	5/191

Para simplificar o problema pode-se desprezar o parâmetro  $D$  tanto do modelo como do processo de estimação, pois esse parâmetro é considerado nulo em modelos detalhados. Utilizando essa consideração o problema pôde ser resolvido e a Tabela 4 apresenta o resultado de estimação do caso CC-LT1 desprezando o parâmetro  $D$ . Para obter tal resultado foram necessárias 530 iterações.

Tabela 4 – Resultado da estimação acoplada desprezando o parâmetro  $D$

	H	$x_d$	$x_q$	$x'_d$	$x''_d$	$x'_q$	$T'_{do}$	$T''_{do}$	$T''_{qo}$
Final	3,56	1,8306	1,9530	0,3016	0,2221	0,2743	8,0689	0,0303	0,0777

## 5.2 Presença de Ruído

Um aspecto importante que deve ser analisado em processos de estimação de parâmetros é presença de ruído nas medidas, no caso deste trabalho, nos sinais obtidos pela MSF. Entretanto, nesta análise preliminar manteve-se os valores de passo de integração da SDT (0,0001), valores muito menores do que os valores obtidos com a MSF. A análise consiste do distúrbio CC-LT2 no sistema 2, utilizando o modelo Arrilaga 3, que despreza os parâmetros transitórios. Adiciona-se ruído com SNR de 50dB nas medidas da máquina ( $V, \theta, I, \phi, E_{fd}, \omega$ ). Define-se o erro inicial nos parâmetros em 20% e emprega-se a metodologia de estimação.

Foram gerados 20 casos com sementes diferentes de ruído, os quais foram utilizados no processo de estimação. Os resultados da adição de ruído nas medidas são ilustrados na Figura 7. Onde observa-se que o ruído evidencia-se na potência reativa.

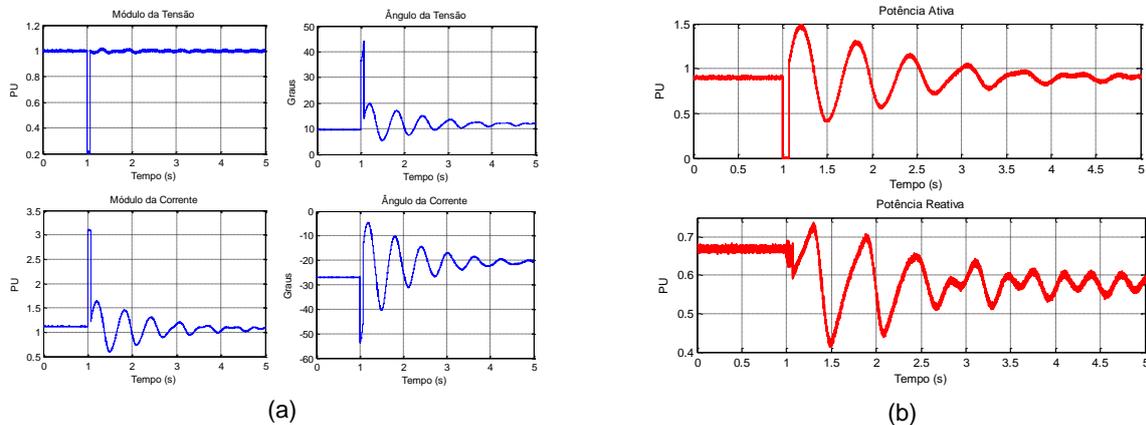


Figura 7 – (a) variáveis com adição de ruído, consideradas como medidas, (b) potências ativa e reativa provenientes das variáveis com ruído

Os resultados da estimação são apresentados na Tabela 5, onde observa-se que os maiores erros relativos foram encontrados nos parâmetros  $T'_{do}$  com 4,8483% e no  $x'_d$  com 2,8550% de erro.

Tabela 5 – Resultados da estimação de parâmetros com a presença de ruído nas variáveis medidas

Par.	H	D	$E'_{qo}$	$E'_{do}$	$\delta_0$	$x_d$	$x_q$	$x'_d$	$x'_q$	$T'_{do}$	$T''_{qo}$
Real	3,5000	10,0000	1,1294	-0,3713	45,6833	1,8100	1,7600	0,3000	0,6500	8,0000	1,0000
Média	3,4999	10,0306	1,1393	-0,3704	45,6037	1,8089	1,7539	0,3086	0,6447	7,6121	0,9814
Desvio Padrão	0,0004	0,07146	0,0022	0,0005	0,0302	0,0003	0,0032	0,003	0,003	0,003	0,003
Erro Absoluto	0,0001	-0,0305	-0,0099	-0,0009	0,0796	0,0011	0,0061	-0,0086	0,0053	0,3879	0,0186
Erro Rel. (%)	0,0029	0,3055	0,8788	0,2478	0,1743	0,0602	0,3440	2,8550	0,8146	4,8483	1,8625

### 5.3 Caso Real

O caso real baseia-se em uma perturbação ocorrida na UHE Itaipu. A perturbação consiste do desligamento de 4 unidades geradoras devido a ocorrência de um curto-circuito entre o disjuntor e a seccionadora da UG10, esse evento acarretou a atuação de proteções e conseqüentemente o desligamento das unidades UG12, UG13, UG14 e UG18A. A UHE possui uma PMU monitorando as UG14 e UG15, o que permitiu a análise do evento utilizando as medidas da UG15. As variáveis medidas são os fasores trifásicos da tensão e corrente (que são devidamente transformados em valores de sequência positiva) e a tensão de campo. A potência mecânica é obtida por meio de SDH usando o *software* ANATEM, que reproduz a resposta do regulador de velocidade e da turbina (10). Utilizando como variáveis injetadas o fasor de tensão, a tensão de campo e a potência mecânica (simulada), temos a seguinte resposta da SDH, representada pelas variáveis avaliadas P e Q na Figura 8.

A PMU utilizada nesse processo não monitora a velocidade angular da máquina, o que inviabiliza a estimação de parâmetros em duas etapas, sendo necessário estimar os parâmetros em conjunto. Os resultados obtidos utilizando a metodologia são apresentados na Tabela 6, onde foram explorados dois tipos de interpolação, a Linear e a PCHIP. Observa-se a maior variação percentual nos parâmetros  $T''_{do}$ ,  $H$ ,  $x''_d$  e  $T'_d$ , que apresentaram valores maiores de 10%. Na Figura 8 a linha em azul apresenta o desempenho da SDH após a alteração dos parâmetros, onde as discrepâncias foram reduzidas para menos de um terço do valor inicial.

Tabela 6 – Resultado da estimação de parâmetros utilizando dados de uma perturbação real

	$H$	$x_d$	$x_q$	$x'_d$	$x''_d$	$x''_q$	$T'_d$	$T''_{do}$	$T''_{qo}$	$It.$
Placa	5,389	0,949	0,678	0,317	0,252	0,252	8,5	0,09	0,19	---
Sem interpolar (0,016)	4,502	0,9122	0,6758	0,3082	0,1948	0,2491	7,4733	0,0269	0,2056	50
Interp. Linear (0,0001)	4,3443	0,8670	0,6769	0,3157	0,2297	0,2509	7,3769	0,0360	0,2030	197
Interp. PCHIP(0,0001)	4,3466	0,8671	0,6773	0,3161	0,2291	0,2510	7,3751	0,0361	0,2040	194
Média das estimativas	4,3976	0,8821	0,6767	0,3133	0,2179	0,2503	7,4084	0,0330	0,2042	---
Desvio padrão	0,0904	0,0261	0,0008	0,0045	0,0200	0,0011	0,0562	0,0053	0,0013	---
Variação Percentual	-18,39	-7,05	-0,19	-1,15	-13,54	-0,66	-12,84	-63,33	7,47	---

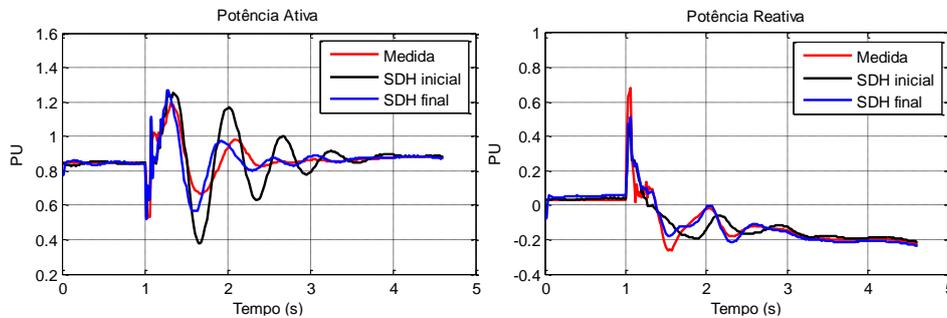


Figura 8 – Resultados da SDH utilizando parâmetros de placa (preto) e parâmetros estimados (azul)

### 6.0 - CONCLUSÃO

O presente artigo apresenta uma metodologia de estimação de parâmetros de máquinas síncronas utilizando medição sincronizada de fasores, simulação dinâmica híbrida e técnicas de otimização não-linear visando a melhoria no processo de estimação. A metodologia tem sido amplamente testada em casos de simulação visando explorar a *informatividade* das perturbações, a *identificabilidade* dos parâmetros nos diferentes modelos, a presença de ruído, demais fontes de erro em canais de instrumentação e estimação de fasores, inclusive explorando dados reais. Os resultados apresentados neste informe técnico demonstram que a metodologia é capaz de estimar parâmetros e com a expansão do parque de PMUs tem potencial para ser empregada em usinas do SIN. Além disso, a continuação deste trabalho deve-se explorar outros testes e técnicas que possam vir a melhorar seus resultados.

### 7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Itaipu Binacional pela cessão dos registros.

### 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G. A. Gavioli, "Validação de modelos de simulação de sistemas de energia elétrica utilizando dados fasoriais sincronizados," Dissertação (Mestrado), UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2013.
- (2) "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems," Revis. IEEE Std C37118-2005, pp. 1–61, Dec. 2011.
- (3) R. H. Park and B. L. Robertson, "The Reactances of Synchronous Machines," AIEET. Apr. 1928.
- (4) F. Milano, "Power System Modelling and Scripting", Springer, 2010.
- (5) J. Arrillaga, C. P. Arnold, J. Arrillaga, and C. P. Arnold, "Power System Stability-Basic Model," in Computer Analysis of Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd., 1990, pp. 155–196
- (6) 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 SNPTEE, Florianópolis - SC - Brasil, 2011.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) D. W. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," Journal of the SIAM, 1963
- (10) P. Galassi "estimação paramétrica de geradores síncronos empregando simulação híbrida", TCC, UNIOESTE, 2016.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Valmor Zimmer** é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2010). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2013). Atualmente é doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina. Participa do projeto MedFasee desde 2010 e desenvolve pesquisas na área de microrredes e de medição fasorial sincronizada.

**Ildemar Cassana Decker** é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Pelotas (1980), mestre (1984) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica (1993) pela Universidade Federal de Santa Catarina e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, respectivamente. Desde 1985 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas principais de interesse são métodos computacionais para análise e controle de sistemas de energia elétrica e o desenvolvimento e aplicação de sistemas de medição fasorial sincronizada.

**Aguinaldo Silveira e Silva** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1982) e doutorado em University of Manchester Institute of Science and Technology (1990). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Medição, Controle, Correção e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas de potência, estabilidade para pequenas perturbações, medição fasorial, projeto de controladores e programação orientada a objetos.