

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DE TRANSFORMADORES
REGULADORES DE TENSÃO COM ESTIMAÇÃO DE
TAPS NO ESTIMADOR DE ESTADO BASEADO NA
MATRIZ DE ADMITÂNCIA NODAL**

ELIS REGINA ZOCHE

FOZ DO IGUAÇU
2020

Elis Regina Zoche

**Modelagem de transformadores reguladores de tensão com
estimação de taps no estimador de estado baseado na matriz de
admitância nodal**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Elétricos e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Manuel Carreño Franco

Foz do Iguaçu
2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Zoche , Elis Regina

Modelagem de transformadores reguladores de tensão com estimação de taps no estimador de estados baseado na matriz de admitância nodal : - / Elis Regina Zoche ; orientador(a), Edgar Manuel Carreño Franco, 2020.
71 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2020.

1. Engenharia Elétrica. 2. Estimação de Estados. 3. Transformadores Reguladores de Tensão. 4. Estimação de taps . I. Franco, Edgar Manuel Carreño. II. Título.

Modelagem de transformadores reguladores de tensão com estimação de taps no estimador de estado baseado na matriz de admitância nodal

Elis Regina Zoche

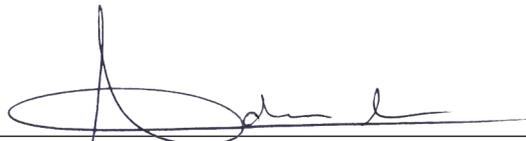
Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:
Data da defesa: 22/04/2020.



Prof. Dr. **Edgar Manuel Carreño Franco**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná



Prof. Dr. **Madson Cortes de Almeida**
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. **Adriano Batista de Almeida**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Resumo

Neste trabalho é apresentada a modelagem de transformadores reguladores de tensão para possibilitar a inserção da posição dos taps como variáveis de estado no método de Estimação de Estado baseado na Matriz de Admitância Nodal. A representação dos reguladores de tensão aprimora o modelo da rede melhorando a qualidade da estimação de estado. O método baseado na Matriz de Admitância Nodal utiliza equações de correntes complexas como base de sua formulação, e tensões complexas como variáveis de estado. O método é apto a lidar com redes radiais e malhadas e utiliza como processo de solução a análise nodal clássica. Os taps são implementados como variáveis de estado contínuas, levando a um incremento do vetor de estados e conseqüentemente ao aumento da matriz Jacobiana do sistema. O algoritmo adotado divide-se em três etapas: inicialização das variáveis, estimação de estado e discretização dos taps. Utilizou-se os sistemas teste IEEE 34 e 123 barras para analisar a eficácia do método com a implementação dos transformadores reguladores de tensão. Realizou-se análises referentes a estimação de estado com taps atribuídos como parâmetros e como variáveis de estado, em que verificou-se que o erro de estimação de estado diminui significativamente quando os taps são modelados como variáveis de estado quando comparado com a modelagem dos taps como parâmetros. Verificou-se também que o estado inicial dos taps, os tipos de medidas e a redundância adotada interfere na quantidade de iterações que o algoritmo necessita para atingir a convergência, além da qualidade da estimação de estado. Notou-se que o método possui vantagens ao lidar com medidas de módulo de tensão quando comparadas as medidas de corrente, que correspondem as equações principais do método, sendo assim, este é um método com ampla capacidade de aplicação em sistemas de distribuição reais, onde a maioria das medições disponíveis são desta natureza.

Palavras-chave: estimação de estado, taps e reguladores de tensão.

Abstract

This work presents the modeling of voltage regulator to enable the insertion of the tap positions as state variables in the Admittance Matrix based State Estimation method. The representation of the voltage regulators improves the network model and the quality of the state estimation. The Admittance Matrix based state estimation uses rectangular current equations on the formulation and rectangular voltage as state variables. This method can deal with radial and meshed grids and uses the classical nodal analysis for the solution process. The taps are implemented as continuous state variables increasing the state vector and the Jacobian matrix of the system. The adopted algorithm present three steps: initialization of the variables; state estimation and discretization of the taps. IEEE 34 and 123 node test feeders were used to analyze the performance of the method with the implementation of the voltage regulators. Analyzes were performed with the regulator tap positions as parameter and as state variables. It was verified that the error decreases significantly with the taps as state variables when is compared with the taps as parameters. It was also verified that the initial state of the taps, the different kinds of measurements and the redundancy adopted affect the number of iterations that the process needs to achieve the convergence, in addition to the quality of the estimation. It was noted that the method has advantages when dealing with absolute voltage measurements when compared to rectangular current measurements, which correspond to the main equations of the method. Therefore, this is a method with large application capacity in real distribution systems, as most of the available measurements are absolute voltage measurements.

Keyword: state estimation, taps and voltage regulators

"Seu nível de sucesso raramente excederá seu nível de desenvolvimento pessoal, pois o sucesso é algo que você atrai pela pessoa em quem se torna."
Jim Rohn

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família por proporcionar o apoio psicológico necessário para a realização desta dissertação. Agradeço pelo incentivo para continuar estudando, pela companhia e por todo o amor que foi concedido.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Edgar Manuel Carreño Franco, por me receber como orientanda de mestrado. Obrigada pela dedicação, pelos ensinamentos, pela compreensão, pela paciência, pelas comidas e, principalmente pela coragem de enfrentar desafios.

Agradeço aos Professores Dr. Eduardo Nobuhiro Asada e Dr. Adriano Batista de Almeida pelo auxílio, pelas contribuições e pelos ensinamentos que se fizeram necessários durante a construção desse trabalho.

Agradeço a UNIOESTE e ao PGEEC pela oportunidade de cursar este programa de mestrado e pela dedicação que foi proporcionada para tornar este um programa de qualidade. Agradeço também a todos os professores do programa, por me proporcionarem o conhecimento científico necessário para a realização deste trabalho e pelos ensinamentos não científicos.

Agradeço a Fundação CAPES pelo apoio financeiro que foi concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu namorado, que ao longo desses anos vem incentivando em todas as minhas decisões e tornando minha vida mais leve.

Agradeço aos meus amigos de São Miguel do Iguaçu, Medianeira e Foz do Iguaçu, que contribuíram para tornar meus finais de semanas mais felizes durante este trajeto.

Agradeço aos integrantes Laboratório de Geração de Ideias pela empatia que foi fornecida nos momentos bons e ruins.

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Símbolos	14
1 Introdução	17
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Geral	20
1.1.2 Específicos	20
2 Referencial Teórico	21
2.1 Introdução	21
2.2 Medidas críticas, observabilidade e redundância.....	21
2.3 Processo de Estimação de Estado	22
2.4 Estimadores de Estado para Sistemas de Distribuição	23
2.5 Tratamento das medidas de módulo de tensão	24
2.6 Estimadores de estado com transformadores reguladores de tensão	25
3 Estimador de Estado baseado na Matriz de Admitância Nodal	27
3.1 Introdução	27
3.2 Estimador de Estado Baseado no Método Mínimos Quadrados Ponderados	27
3.2.1 Matriz de pesos W e matriz de ganho $G(x)$	29
3.3 Modelo Matemático do Estimador de Estado Baseado na Matriz de Admitância Nodal.....	29
3.3.1 Modelo dos transformadores de distribuição	30
3.3.2 Modelo dos reguladores de tensão	32
3.3.3 Medidas de Entrada $z(x)$	33
3.3.4 Funções não lineares hx	35
3.3.5 Matriz Jacobiana $H(x)$	36
3.3.6 Matriz Jacobiana $Ha(x)$ aumentada	39
3.4 Algoritmo	40
3.4.1 Problemas de convergência do método	42

4	Resultados	45
4.1	Introdução.....	45
4.2	Geração dos dados, avaliação do algoritmo e sistemas testes	45
4.3	Validação da formulação	47
4.3.1	Sistema IEEE 34 barras sem reguladores de tensão	47
4.3.2	Sistema IEEE 34 barras com reguladores de tensão: taps iniciais nominais.....	48
4.3.3	Sistema IEEE 34 barras: inicialização não nominal dos taps	51
4.4	Medidas com ruídos e redundância	53
4.4.1	Qualidade da estimação de estado em função dos tipos de medidas	53
4.4.2	Estimação de estado com taps atribuídos como parâmetros e como variáveis de estado no sistema IEEE 34 barras: medidas com ruídos e redundância	56
4.4.3	Estimação de Estado para um único estado operativo do sistema IEEE 123 barras.....	58
4.4.4	Estimação de estado com taps atribuídos como parâmetros e como variáveis de estado no sistema IEEE 123 barras: medidas com ruídos e redundância	59
4.4.5	Pesos limites	61
5	Conclusões	63
5.1	Trabalhos futuros.....	64
5.2	Publicação	64
	Referências Bibliográficas	65
	Apêndice A	69

Lista de Figuras

Figura 5.1 – Modelo π equivalente das linhas trifásicas com parâmetros concentrados	29
Figura 5.2 – Representação geral dos transformadores reguladores	32
Figura 5.3 – Circuito π equivalente de um regulador de tensão	32
Figura 6.1 – Sistema IEEE 34 barras.....	46
Figura 6.2 – Sistema IEEE 123 barras	46
Figura 6.3 – Curva de carga e erros máximos de estimação de estado para os 96 estados operativos estimados em um intervalo de 24 horas, com o sistema sem reguladores de tensão	48
Figura 6.4 – Erros máximos de estimação de estado considerando os taps dos reguladores de tensão como parâmetros e como variáveis de estado para 96 estados operativos em um intervalo de 24 horas.....	49
Figura 6.5 – Erros máximos de estimação de estado considerando os taps dos reguladores de tensão como parâmetros e como variáveis de estado para 96 estados operativos em um intervalo de 24 horas.....	50
Figura 6.6 - Erros máximos de estimação considerando os taps dos reguladores de tensão: como parâmetros e como variáveis de estado; com os taps iniciais iguais aos seus valores nominais e com os taps iniciais iguais a zero.....	52
Figura 6.7 – Sistema IEEE 34 barras com 20% das barras com medidas de corrente, 20% das barras com medidas de tensão e 100% das barras com medidas de potência	55
Figura 6.8 – Erros máximos de estimação considerando medidas com erros gaussianos e redundância e sem erros gaussianos e redundância, considerando os taps como parâmetros e como variáveis e estado.....	57
Figura 6.9 - Estimação de estado do sistema IEEE 123 barras: perfil de tensão do ramo 150 – 33	58
Figura 6.10 – Erros máximos de estimação de estado com as modelagens com os taps como parâmetros e taps como variáveis de estado para o sistema teste IEEE 123 barras	59

Lista de Símbolos

y_t	Admitância de dispersão em p.u. do transformador
y_p^{abc}	Admitância própria do primário do transformador
y_s^{abc}	Admitância própria do secundário do transformador
y_{ps}^{abc} e y_{sp}^{abc}	Admitâncias mútuas do transformador
abc	Fases a , b e c
h	Funções não lineares
Z_{km}^{ab} e Z_{km}^{ba}	Impedância mútua entre as fases a e b do circuito entre as barras k e m
Z_{km}^{ac} e Z_{km}^{ca}	Impedância mútua entre as fases a e c do circuito entre as barras k e m
Z_{km}^{bc} e Z_{km}^{cb}	Impedância mútua entre as fases b e c do circuito entre as barras k e m
Z_{km}^{aa}	Impedância própria da fase a , entre as barras k e m
Z_{km}^{bb}	Impedância própria da fase b , entre as barras k e m
Z_{km}^{cc}	Impedância própria da fase c , entre as barras k e m
G	Matriz de ganho
W	Matriz de pesos
H	Matriz jacobiana
I_{ik}^{eq}	Medida de entrada: parte imaginária da corrente equivalente injetada na barra k
I_{ik}^{med}	Medida de entrada: parte imaginária da corrente injetada na barra k
V_{ik}^{eq}	Medida de entrada: parte imaginária equivalente da tensão na barra k
I_{rk}^{eq}	Medida de entrada: parte real da corrente equivalente injetada na barra k
I_{rk}^{med}	Medida de entrada: parte real da corrente injetada na barra k
V_{rk}^{eq}	Medida de entrada: parte real equivalente da tensão na barra k
P_k^{med}	Medida de entrada: potência ativa injetada na barra k
Q_k^{med}	Medida de entrada: potência reativa injetada na barra k

z	Medidas de entrada
$V_m^{cont_abc}$	Módulo da tensão fixada na barra controlada pelo regulador de tensão
V_k^{med}	Módulo da tensão medida na barra k
$V_m^{calc_abc}$	Módulo da tensão nodal calculada para a barra m
I_{ik}^{calc}	Parte imaginária da injeção de corrente calculada para a barra k
V_{ik}^{abc}	Parte imaginária da tensão nodal na barra k
I_{rk}^{calc}	Parte real da injeção de corrente calculada para a barra k
V_{rk}^{abc}	Parte real da tensão nodal da barra k
a_{km}^{abc}	Posição dos taps do regulador de tensão conectado entre as barras k e m .
r	Resíduos das medidas
$b_{sh_{km}}^{aa}$	Susceptância capacitiva da fase a do circuito entre entre as barras k e m
$b_{sh_{km}}^{bb}$	Susceptância capacitiva da fase b do circuito entre entre as barras k e m
$b_{sh_{km}}^{cc}$	Susceptância capacitiva da fase c do circuito entre entre as barras k e m
$b_{sh_{km}}^{ab}$ e $b_{sh_{km}}^{ba}$	Susceptância capacitiva mútua entre as fases a e b e as barras k e m
$b_{sh_{km}}^{ac}$ e $b_{sh_{km}}^{ca}$	Susceptância capacitiva mútua entre as fases a e c e as barras k e m
$b_{sh_{km}}^{bc}$ e $b_{sh_{km}}^{cb}$	Susceptância capacitiva mútua entre as fases b e c e as barras k e m
V_p	Tensão no nó p
V_k	Tensão nodal na barra k
σ	Variância dos erros de medição
x	Variáveis de estado

Capítulo 1

Introdução

O aumento do número de geradores distribuídos principalmente provindos de fontes de energia renováveis trouxe vantagens econômicas, sociais e ambientais em relação às usinas geradoras tradicionais, tais como: menor investimento inicial; menor espaço físico; curto período de construção; baixo impacto ambiental; fomento da economia local; aumento do número de empregos, entre outros. Porém alguns desafios podem ser associados a inserção desordenada desses geradores e sua dependência com condições meteorológicas, destacando-se a diminuição do nível de confiabilidade dos sistemas elétricos, problemas de controle de tensão e potência reativa, descoordenação dos sistemas de proteção, geração de ondas harmônicas, entre outros (Arritt & Dugan, 2011).

Os Sistemas de Distribuição (SD) de energia foram inicialmente projetados para operar além da demanda calculada, incrementando seus níveis de segurança e garantindo uma longa vida útil. Essa prática viabilizava o capital investido ao longo dos anos facilitando a operação de forma passiva, sem a necessidade de esquemas específicos para o monitoramento da rede. No entanto, a grande quantidade de elementos ativos que vem sendo instalados nas redes de distribuição faz com que seja necessária a mudança dessa abordagem.

Para realizar o monitoramento e operação de maneira ativa, deve-se utilizar informações confiáveis a respeito do estado operativo do sistema em tempo real. O estado operativo do sistema corresponde a um conjunto de variáveis de estado que são capazes de representar o comportamento da rede, ou seja, a partir dessas variáveis é possível calcular o fluxo de potência e corrente nas linhas, injeções de potência e de corrente em barras, carregamento das linhas, etc. A determinação do estado operativo do sistema é realizada a partir da modelagem matemática dos diferentes dispositivos, topologias, características e parâmetros do sistema. Cada sistema possui um estado operativo particular, que geralmente corresponde as tensões complexas dos barramentos do sistema. Além de representar o comportamento da rede, o estado operativo do sistema é o ponto de partida para diferentes tipos de análises, destacando-se: controle e segurança, planejamento, monitoramento, operação econômica, regulação de tensão, análise de contingências, entre outras (Monticelli, 1983).

As ferramentas desenvolvidas para a determinação do estado operativo do sistema são o estimador de estado e o fluxo de carga. As principais diferenças entre as duas teorias são suas finalidades e seus dados de entrada. Ambos algoritmos determinam o estado operativo do

sistema, porém as informações processadas pelo fluxo de carga geralmente são providas de dados históricos estimados ao longo de um determinado tempo, enquanto as informações processadas pelo estimador de estado podem ser providas de dados históricos ou de equipamentos de medição espalhados pelo sistema elétrico. Portanto, considera-se que os algoritmos de fluxo de carga são voltados para o planejamento, análise e expansão de sistemas elétricos, enquanto os estimadores de estado são apropriados para o monitoramento do sistema em tempo real.

A estimação de estado foi introduzida por Schweppe e Wildes no início dos anos 70 como uma alternativa de segurança para uma série de blecautes que ocorreram nos Estados Unidos entre os anos 60 e 70. Na época os esquemas de controle e monitoramento constituíam-se basicamente de sistemas que controlavam o estado dos disjuntores nas subestações, geração e despacho econômico. A partir de então, começou a se pensar na criação de novos centros de controle. No entanto, os únicos dados que eram disponíveis para os operadores em tempo real eram os estados dos interruptores, a frequência do sistema e um conjunto de medidas de potência necessárias para o controle da geração (Zarco & Expósito, 1999). Com isso, aumentou-se a quantidade de medidores no sistema de transmissão, e passou-se a utilizar o sistema de supervisão, otimização, controle e gerenciamento de sistemas chamado de SCADA (em inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*). Porém, as informações provenientes do sistema SCADA não puderam ser utilizadas diretamente para determinar o estado operativo do sistema, uma vez que estas medidas estavam sujeitas a erros de medição e comunicação (Abur & Expósito, 2004). Diante disso, Schweppe e Wildes formularam uma solução para a determinação do estado operativo do sistema em tempo real fundindo a teoria de fluxo de carga com a teoria de estimação estatística que, após alguns anos, consolidou-se como a teoria de estimação de estado (Monticelli, 1999), (Abur & Expósito, 2004). Desde então, a estimação de estado tornou-se uma ferramenta de extrema importância nos centros de controle, visto que o volume e a variedade de dados tem aumentado cada vez mais, tornando a utilização otimizada dessas informações um grande desafio (IBM Corporation & Software Group, 2012).

Estimadores de estado para sistemas de distribuição foram pouco explorados na literatura em relação à estimadores de estado para sistemas de transmissão. Essa característica permaneceu por muitos anos por que os esquemas de monitoramento, proteção e controle dos SD tradicionais foram projetados para lidar com redes predominantemente radiais e com fluxo de potência unidirecional, sendo relativamente fácil de lidar (Hayes & Prodanovic, 2014). No entanto, a crescente modernização das redes de distribuição está fazendo com que os sistemas de comunicação em sistemas de distribuição se torne mais acessível economicamente, contribuindo para a inserção de novos tipos de medidores e aprimoramento de antigos medidores (Popa, 2011). O aumento das funcionalidades dos medidores atuais contribui para a comunicação remota de dados e permite a aplicação da filosofia de redes inteligentes. No entanto, ainda são necessários algoritmos que processem essas informações, realizem a filtragem de dados, e que sejam capazes de determinar o estado operativo do sistema mesmo perante falta de informações, o que torna a estimação de estado em redes de distribuição uma ferramenta primordial para viabilizar a operação dessas redes.

A estimação de estados para SD possui grandes desafios, destacando-se o processamento de erros grosseiros, melhoria da eficiência computacional, sincronização de medidas providas de diferentes tipos de medidores, representação adequada de componentes e equipamentos dos SD, entre outros (Della, Pau, Pegoraro, Ponci & Sulis, S, 2014). Equipamentos como chaves, banco de capacitores controlados e reguladores de tensão são elementos de extrema importância que não devem ser negligenciados em algoritmos de estimação de estado, uma vez que atuam no controle de tensão e fluxo de potência do sistema (Nanchian, Majumdar & Pal, 2017). Entretanto, a modelagem de reguladores de tensão em estimadores de estado especificamente para SD geralmente não é considerada, como é verificado nas referências de Baran e Kelley (1995); Baran, Jung e Mcdermott, (2009); Teng (2002); Muscas et al. (2014); Noopura, Amit e Jayan (2015), ou Noopura e Jayan (2017). Apesar disso, a modelagem de reguladores de tensão contribui para aumentar a confiabilidade do estimador de estado, interferindo significativamente na acurácia do algoritmo (Houari, Kocar, Therrien & Lacroix, 2013).

Valores imprecisos atribuídos para as posições dos taps dos reguladores podem ter como consequência a degradação dos resultados fornecidos pelo estimador de estado. Estes resultados por sua vez, podem provocar o equívoco de outras aplicações como por exemplo a avaliação da segurança do sistema. Além disso, medidas corretas podem ser identificadas como dados incorretos, devido a não compatibilidade com os parâmetros da rede e perda de confiança do operador nos resultados do estimador de estado (Abur & Expósito, 2004).

De acordo com Lin e Abur (2017), dentre os diferentes tipos de parâmetros dos sistemas elétricos, a posição dos taps dos reguladores de tensão são mais susceptíveis a erros, pois os ajustes que são frequentemente realizados para a realização do controle de tensão podem não ser adequadamente reportado as centrais de controle. Além disso, o autor destaca que os resultados das diferentes análises de sistemas elétricos de potência são muito mais sensíveis aos taps dos reguladores do que outros parâmetros como resistência, reatância e capacitância em derivação.

Nesse contexto, entende-se que a obtenção de um modelo matemático da rede de distribuição que seja o mais próximo possível da rede real é de grande importância em estimação de estado. Para tanto, é necessário representar de maneira adequada seus componentes físicos, parâmetros e características do sistema. Porém, constatou-se poucos trabalhos que abordam a estimação de taps de reguladores em estimadores de estado para sistemas de distribuição. Portanto, o objetivo deste trabalho é aprimorar o processo de estimação de estado em estimadores específicos para sistemas de distribuição com a inclusão da modelagem de transformadores reguladores de tensão, a fim de possibilitar a estimação da posição dos taps. Portanto, propõe-se a inclusão dos taps dos reguladores como variáveis de estado como é realizado em Teixeira, Brammer, Rutz, Merritt e Salmonsén, (1991). A modelagem dos transformadores e reguladores de tensão será realizada como é apresentado em Chen, Chen e Chebli (1991) e, Garcia e Carneiro (2001). Nestas duas referências, abordam-se os métodos para a solução do problema de fluxo de carga, porém, este trabalho propõe a utilização dessa modelagem para a solução do problema de estimação de estado. Isso é possível pois o método adotado para a solução do processo iterativo resultante do problema de

estimação, chamado de Estimador de Estado baseado na Matriz de Admitância Nodal (do inglês, *Ybus based state estimator* – YBSE), baseia-se na análise nodal clássica.

O algoritmo de estimação de estado foi desenvolvido no Software MATLAB e testado nos sistemas teste IEEE 34 e 123 barras. Para analisar a viabilidade da modelagem abordada, comparou-se dois casos distintos. No primeiro caso considera-se os taps dos reguladores como parâmetros do sistema e, no segundo caso considera-se os taps dos reguladores como variáveis de estado a serem estimadas. Para os testes incluiu-se erros gaussianos no conjunto de medida e os resultados são comparados com estados operativos referência gerados através de um algoritmo de fluxo de carga.

A estrutura deste trabalho é dividida em cinco Capítulos. No Capítulo 2 abordam-se os principais conceitos relacionados a teoria de estimação de estado e um breve referencial bibliográfico. No Capítulo 3 a formulação do método proposto com a modelagem dos reguladores de tensão é explanada. Neste capítulo apresenta-se também a estrutura do algoritmo implementado para validação deste trabalho. No Capítulo 4 mostram-se as simulações e resultados obtidos e, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral desse trabalho é melhorar a representação da rede de distribuição em estimadores de estado baseados no método YBSE através da inclusão da modelagem de transformadores reguladores de tensão com a estimação dos taps.

1.1.2 Específicos

- Implementar computacionalmente a formulação trifásica do método de estimação de estado YBSE.
- Determinar e implementar todas as mudanças necessárias na formulação do YBSE para inclusão da modelagem de transformadores e reguladores de tensão utilizando a abordagem adotada em (Chen; Chen & Chebli, 1991) e (Garcia & Carneiro, 2001).
- Implementar um algoritmo para a solução do problema de estimação de estado com a inclusão dos taps dos reguladores como variáveis de estado.
- Comparar a qualidade da estimação de estado considerando reguladores com a estimação dos taps e sem a estimação dos taps.
- Verificar com quais tipos de medidas o estimador de estado abordado obtém melhores resultados.

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1 Introdução

Para realizar o monitoramento e operação de maneira ativa, são necessárias informações confiáveis a respeito do estado operativo do sistema em tempo real. O estado operativo do sistema é determinado pelo estimador de estado e corresponde a um conjunto de variáveis de estado estimadas que são capazes de representar o comportamento da rede, ou seja, a partir dessas variáveis é possível calcular o fluxo de potência e corrente nas linhas, injeções de potência e de corrente em barras, carregamento das linhas, etc. (Monticelli, 1983).

Grande parte das informações processadas pelo estimador de estado são providas de medidores instalados em pontos específicos do sistema elétrico de potência. Essas informações são enviadas para uma central de processamento, estando sujeitas a erros de medição, depreciação ou comunicação. Além dos erros mencionados, existem erros topológicos ou de definição de parâmetros que podem surgir na previsão do modelo físico da rede (Monticelli & Wu, 1985), (A. Monticelli, 1999). Portanto, além de representar adequadamente o modelo da rede, o estimador de estado tem a função de filtrar erros grosseiros e ruídos gaussianos corriqueiros. Dessa forma, a teoria de estimação de estado não se baseia apenas no algoritmo estimador de estado. A seguir, explana-se os tópicos dessa teoria que são relevantes para este trabalho.

2.2 Medidas críticas, observabilidade e redundância

A capacidade de estimar o estado do sistema depende do tipo, localização e número de medidas disponíveis. Se essas informações forem suficientes e distribuídas adequadamente, o sistema é dito observável (A. Monticelli & Wu, 1985).

O conceito de observabilidade está diretamente relacionado ao processo de estimação de estado, pois a perda de uma medida pode impossibilitar a estimação de estado, ou seja, tornar o processo não observável. Neste caso, a medida perdida é chamada medida crítica. Um conjunto de medidas sem medidas críticas, pode ser considerado redundante. Portanto, utilizar medidas redundantes aumenta a confiabilidade do processo (Abur & Expósito, 2004).

Dessa forma, grandes sistemas necessitam de grandes conjuntos de medidas disponíveis para manter a observabilidade e redundância. Quando a rede não é observável, geralmente contorna-se a situação utilizando informações de previsão de demanda, conhecidas como pseudomedidas (Monticelli & Wu, 1985).

2.3 Processo de Estimação de Estado

O algoritmo de estimação de estado clássico baseia-se no método estatístico dos Mínimos Quadrados Ponderados. Este método faz parte do processo de estimação de estado, que é dividido nas seguintes funções (A. Monticelli, 1999):

1. Configuração da rede: o configurador da rede é responsável pela determinação da topologia da rede e a correspondente configuração dos medidores. A topologia é determinada utilizando informações de chaves, disjuntores, parâmetros dos componentes, transformadores, entre outros.
2. Análise de observabilidade: o observador verifica se é possível realizar a estimação de estado com o conjunto de medidas disponíveis. Caso não existam medidas disponíveis suficientes, identifica-se as partes do sistema em que é possível realizar a estimação de estado, ou define-se pseudomedidas críticas suficientes para tornar a rede observável.
3. Estimador de estado: o estimador de estado calcula as variáveis de estado através da modelagem matemática do sistema elétrico, além de atuar como um filtro que suaviza erros gaussianos.
4. Processamento de erros: é responsável pela identificação, detecção e depuração das medidas que contém erros grosseiros.

Os possíveis erros de medição, calibração de equipamentos, comunicação, parâmetros ou topologia são classificados em duas vertentes:

Erros gaussianos: são considerados erros com distribuição gaussiana, cujos valores variam entre $\pm 3\sigma$, sendo σ o desvio padrão dos erros das medidas. Geralmente, esses erros corriqueiros são filtrados pelo próprio algoritmo de estimação de estado mencionado na Etapa 3.

Erros grosseiros: são erros fora da faixa de $\pm 3\sigma$. Estes erros são filtrados na Etapa 4, após a estimação do estado da rede.

Uma das técnicas mais populares de detecção de erros grosseiros é o teste dos resíduos normalizados. Este teste baseia-se em hipóteses de distribuição probabilística das grandezas medidas e dos resíduos (diferença entre os valores medidos e os estimados) decorrentes do processo de estimação. Portanto, busca-se determinar o estado do sistema que esteja em conformidade com as medidas realizadas de acordo com a curva de probabilidade esperada. Quando o erro grosseiro é detectado, a medida correspondente é eliminada do conjunto de

medidas e a estimação de estado é realizada novamente. Esse processo é repetido até não existirem mais erros grosseiros no conjunto de medidas. Se as medidas com erros pertencem a conjuntos críticos, o erro é detectado, mas a medida com erro não pode ser identificada, o que leva a impossibilidade da substituição. Dessa forma, a ausência de medidas e conjuntos críticos é a condição necessária para que se possa detectar, identificar e substituir as medidas contendo erros grosseiros (Clements & Davis, 1988).

Este trabalho concentra-se na terceira função referente ao processo de estimação de estado: o modelo matemático utilizado para determinar o estado da rede. O método de resolução utilizado será através do problema de otimização MQP, abordado no próximo tópico.

2.4 Estimadores de Estado para Sistemas de Distribuição

Algoritmos de estimação de estado específicos para SD começaram a ser explorados na década de 90. Em Baran e Kelley (1995), desenvolveu-se um algoritmo de estimação de estado para SD que foi amplamente explorado na literatura. O método utiliza correntes como variáveis de estado e é apto a lidar com redes radiais ou fracamente malhadas. Dessa forma, o método vai de encontro com a possibilidade dos SD se tornarem malhados (Heydt & Fellow, 2010). A formulação baseia-se no desacoplamento em três subproblemas, onde cada subproblema lida com uma fase do sistema. Porém, muitas vezes a separação não é simples, e existem dificuldades para determinar as relações entre pequenos subproblemas e grandes subproblemas, visto que suas soluções podem não coincidir (Majdoub et al., 2018). Outra dificuldade encontrada para lidar com este método é a inserção de medidas de tensão, uma vez que a relação entre essas medidas e as variáveis de estado não são diretas.

No mesmo ano, Lu, Teng e Liu (1995) apresentaram um estimador de estado para SD que não foi tão abordado na literatura, chamado de Estimador de Estado baseado na Matriz de Admitância Nodal. Este método baseia-se na análise nodal clássica, podendo ser aplicado para sistemas radiais ou malhados. Estimadores de estado tradicionalmente abordados para sistemas de transmissão também são baseados na análise nodal clássica. No entanto, as grandes diferenças entre os métodos aplicados apenas para sistemas de transmissão e o método YBSE estão nas variáveis de estado adotadas e nas funções não lineares que representam as medidas do sistema. Os métodos aplicados para transmissão geralmente utilizam tensões na forma polar como variáveis de estado, enquanto o método YBSE utiliza tensões na forma retangular como variáveis de estado. Além disso, nos métodos aplicados apenas para transmissão, as funções não lineares que representam as medidas podem ser equações de corrente, potência ou tensão, de acordo com as medidas de entrada correspondentes. Já no método YBSE, considera-se apenas equações de corrente e tensão. Portanto, na presença de medidas de potência, deve ser realizada uma conversão para medidas de corrente. Essa conversão faz com que as informações de entrada dependam das variáveis de estado.

Ao propor o método, o autor destaca que a utilização de equações de corrente para as funções não lineares simplifica a formulação, resultando em uma matriz Jacobiana constante

composta pelos elementos da matriz Y_{bus} . A dimensão da matriz Jacobiana depende do tamanho do sistema e do número de medidas de entrada. Obter uma matriz Jacobiana constante é extremamente desejável para a estimação de estado de grandes SD, uma vez que é necessário calcular a sua matriz inversa apenas uma vez. No entanto, com medidas de potência, as informações de entrada passam a ser correntes equivalentes e, conseqüentemente a matriz Jacobiana passa a depender das variáveis de estado, o que contradiz a afirmação do autor de que a matriz Jacobiana é constante e composta pelos elementos da matriz Y_{bus} . Vinte anos depois da introdução do método, em Noopura et al. (2015) um estimador de estado monofásico baseado no método YBSE é apresentado, considerando medidas de potência como dados de entrada. Neste trabalho os autores esclarecem que com medidas de potência como dado de entrada a matriz Jacobiana deve ser atualizada a cada iteração.

Em Lin e Lu, (2016) uma comparação entre estimadores baseados no método de varredura de Baran e Kelley (1995) e estimadores baseados no método de análise nodal YBSE proposto por Lu, Teng e Liu (1995) é realizada. Os autores mostram que o método baseado em YBSE possui bons resultados e apresenta performance superior quando considera-se medidas de corrente e tensão como informações de entrada. O método YBSE é baseado na análise nodal clássica, portanto, além da capacidade de lidar com sistemas radiais e malhados, o método possui vantagem na modelagem de componentes do sistema elétrico de potência, visto que muitos elementos já foram abordados em métodos clássicos da literatura em teorias de fluxo de carga para sistemas de transmissão, como é realizado em Garcia, Pereira, Carneiro, Costa e Martins (2000).

Os trabalhos apresentados nesta subseção, incluindo o método YBSE, destacam especificamente o método de estimação de estado em si, excluindo-se componentes como transformadores ou transformadores reguladores. Nesse contexto, o método de estimação de estado adotado neste trabalho será o método YBSE, pois ele não possui restrições quanto aos tipos de medidas adotadas, sejam elas medidas de corrente, potência ou tensão; e é baseado na análise nodal clássica, sendo capaz de lidar com sistemas de distribuição e/ou transmissão, possuindo vantagens em relação aos métodos de varredura na modelagem de componentes básicos do sistema elétrico.

2.5 Tratamento das medidas de módulo de tensão

As variáveis de estados especificadas no método YBSE são tensões nodais na forma complexa. As medidas de entrada adotadas neste trabalho são medidas complexas de corrente, potência e módulo de tensão. Como as medidas de tensão são dadas em módulos e as variáveis de estados estão na forma complexa, geralmente adota-se uma conversão das magnitudes de tensão para medidas equivalentes complexas (Lu, Teng, Liu & 1995), (Lin & Teng, 1996), (Guo et al., 2013). Com esta prática, as medidas de módulo de tensão tornam-se pseudomedidas complexas de tensão, fazendo com que a observabilidade do sistema seja garantida artificialmente.

Outra alternativa dada para a inclusão de medidas de módulo de tensão no método YBSE é a não utilização da parte imaginária das medidas de tensões através de uma rotação de eixos (Almeida & Ochoa, 2017). De acordo com o autor, este método evita problemas de convergência que podem ser associados a utilização de medidas artificiais complexas de tensão. No entanto, por simplicidade, neste trabalho adota-se a conversão tradicional das medidas de módulo para medidas complexas e tensão.

2.6 Estimadores de estado com transformadores reguladores de tensão

Os reguladores de tensão são constituídos por autotransformadores com comutadores automáticos de taps (Garcia & Carneiro, 2001). Seu principal objetivo é realizar o controle de tensão para mantê-la nos limites estabelecidos pelo órgão regulador. A não realização do controle de tensão pode implicar em variações de tensões que causam a queima de eletrodomésticos e a parada de máquinas e processos industriais, o que traz prejuízos econômicos consideráveis. Sendo assim, esses equipamentos são de vital importância para manter qualidade da energia fornecida ao consumidor.

Existem duas abordagens que podem ser destacadas para a modelagem de reguladores de tensão em estimadores de estado (Teixeira et al., 1991a). A primeira considera que os taps dos reguladores são parâmetros fixos, determinados antes da estimação de estado. Essa abordagem é interessante quando existe a informação da posição em que os taps dos reguladores se encontram. No entanto, esses equipamentos dificilmente são monitorados, e, quando existe o monitoramento, as informações estão propensas a erros de medição. A segunda abordagem trata-se da estimação das posições dos taps. No trabalho de Fletcher e Stadlin (1983), os taps são estimados com base nas suas sensibilidades em relação a potência reativa que flui no regulador de tensão. Dessa forma, a estimação dos taps depende da qualidade das medidas de fluxo de potência que passam nos reguladores.

Outra proposta foi discutida em Mukherjee, Hanson, Fuerst and Monroe (1984), em que a estimação dos taps dos reguladores não interferem na solução do estimador de estado. Nesta proposta, os taps são corrigidos em uma etapa pós estimação de estado, portanto, a acurácia da estimação dos taps depende da qualidade do estado estimado a priori.

Em Teixeira (1991), considerou-se uma abordagem inovadora para a inclusão dos taps no algoritmo de estimação de estado, que será a abordagem adotada neste trabalho. Esta técnica de estimação de taps incorpora a posição dos taps como variáveis contínuas e independentes no vetor de estado, requerendo linhas adicionais na matriz Jacobiana para a sua resolução. Esses elementos adicionais irão corresponder as derivadas parciais das medidas mensuradas em relação as variáveis de estado adicionais (taps). A partir de então, muitos trabalhos abordaram a inclusão dos taps dos reguladores como variáveis de estado, como em Liu e Lim (1995); Alsaç, Vempati, Stott e Monticelli (1998), Shiroie e Hosseini (2008) e Nanchian et al. (2017).

O método é dividido em duas etapas. A primeira etapa corresponde a inclusão dos taps como variáveis de estado. Dessa forma, os taps são incorporados no processo de estimação de estado como variáveis de estado contínuas, e são estimados em conjunto com as outras variáveis de estado do sistema. Na segunda etapa, após a estimação de estado ser realizada, os taps estimados são eliminados do vetor de estado, aproximados para seu valor discreto mais próximo e, convertidos para parâmetros do sistema. Esses parâmetros devem ser considerados na matriz admitância de barras Y_{bus} , uma vez que a posição dos taps dos transformadores modifica a impedância do sistema. Então, a estimação de estado é realizada novamente para o ajuste das tensões (variáveis de estado) com os taps aproximados e fixados como parâmetros.

Para manter a observabilidade do sistema, a inclusão dos taps como variáveis de estado requer medidas de entrada que correspondam as novas variáveis de estado. Essas medidas foram definidas com as medidas de módulo de tensão que é mantida nas barras controladas pelos reguladores. Além disso, é necessária uma equação que represente essas medidas de entrada para a determinação das derivadas parciais da matriz Jacobiana.

A inclusão das medidas de módulo de tensão dos reguladores de tensão como medida de entrada, a equação de controle utilizada e o aumento da matriz Jacobiana, juntamente com as relações não lineares e a consideração da posição dos taps na matriz Y_{bus} foram baseadas na teoria de fluxo de carga apresentada por Garcia e Carneiro (2001). Nessa teoria o autor aplica a estimação dos taps para o controle de tensão em um algoritmo de fluxo de carga. Esses itens serão explanados no próximo capítulo juntamente com o modelo dos transformadores reguladores para a sua inclusão na matriz Y_{bus} .

Capítulo 3

Estimador de Estado baseado na Matriz de Admitância Nodal

3.1 Introdução

A formulação do problema de estimação de estado adotada nesta dissertação se dá pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). Este é um método de otimização que visa minimizar a diferença entre as medidas de entrada provindas de medidores ou pseudomedidas e as medidas calculadas, ponderadas por determinados pesos. A função objetivo é determinada, as equações são linearizadas, e então aplica-se o método de Gauss-Newton para obter uma solução iterativa.

A resolução do processo iterativo obtida por Gauss-Newton pode ser realizada com diferentes métodos. Pode-se definir diferentes variáveis de estado (como tensões complexas, correntes complexas, tensões na forma polar, correntes na forma polar) ou diferentes métodos de resolução, como varredura e análise nodal. Neste trabalho, optou-se pela utilização do método YBSE pelos motivos apresentados na seção 2.4, que se baseia na análise nodal clássica e utiliza-se tensões complexas como variáveis de estado. A seguir, a formulação do problema MQP e do YBSE é explanada.

3.2 Estimador de Estado Baseado no Método Mínimos Quadrados Ponderados

O estimador de estado baseado no método MQP é formulado de acordo com a função objetivo $J(x)$ descrita na Equação (3.1):

$$\min J(x) = r^T W r \quad (3.1)$$

Deseja-se minimizar a soma dos quadrados dos resíduos r , ponderada pela matriz de pesos W , que é especificada na próxima subseção. Os resíduos r são definidos como variáveis aleatórias independentes com distribuição Gaussiana cuja média é zero. Sua descrição é dada

pelo modelo de medição não linear especificado na Equação (3.2):

$$r = z(x) - h(x) \quad (3.2)$$

onde $z(\cdot)$ representa o vetor de medidas de entrada com dimensão m ; x representa as variáveis de estado a serem estimadas com dimensão n e $h(\cdot)$ representa as funções não lineares que relacionam as medidas de entrada $z(\cdot)$ com as variáveis de estado x . As medidas de entrada $z(\cdot)$ podem ou não estar em função das variáveis de estado. Essa dependência irá ocorrer de acordo com o método utilizado para a resolução do problema, que será abordado posteriormente.

A solução do problema de otimização dado na Equação (3.1) corresponde aos valores estimados x . Para encontrar esses valores de forma algébrica, aplicam-se as condições de otimalidade de primeira ordem à função $J(x)$, como pode ser observado na Equação (3.3):

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x)Wr \quad (3.3)$$

onde $H(x)$ é a matriz Jacobiana das funções $z(x) - h(x)$, portanto:

$$H(x) = \left[\frac{\partial(z(x) - h(x))}{\partial x} \right] \quad (3.4)$$

Expandindo $g(x)$ em série de Taylor em torno do ponto inicial x^k tem-se a Equação (3.5):

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)\Delta x^k + \dots = 0 \quad (3.5)$$

onde,

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x)}{\partial x} = H^T(x)WH(x) \quad (3.6)$$

Em que $G(x^k)$ é a matriz de Ganho do sistema e, x é atualizado iterativamente pela Equação (3.7):

$$\Delta x = x^{k+1} - x^k \quad (3.7)$$

Desprezando os termos de ordem superior, obtém-se a equação iterativa do método de Gauss-Newton dada pela Equação (3.8):

$$x^{k+1} = x^k + G(x^k)^{-1}H^T(x^k)W(z(x^k) - h(x^k)) \quad (3.8)$$

As variáveis de estado selecionadas para resolver o problema são as tensões na forma retangular e as equações que compõem o vetor de medidas calculadas $h(x)$ são equações de corrente. A seguir, os elementos da Equação (3.8) são detalhados, em conjunto com o método de resolução que é aplicado.

3.2.1 Matriz de pesos W e matriz de ganho $G(x)$

A matriz de pesos W é uma cujos elementos são as ponderações de cada medida. As ponderações representam a precisão de cada medida de entrada, que geralmente são determinadas pelos inversos das variâncias de cada erro de medição, como pode ser observado na Equação (3.9):

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_1^{-2} & & & \\ & \sigma_2^{-2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^{-2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Já a matriz de ganho $G(x)$ é uma matriz simétrica, esparsa e deve ser não singular para que o sistema de equações (3.8) tenha solução.

3.3 Modelo Matemático do Estimador de Estado Baseado na Matriz de Admitância Nodal

Nesta seção apresenta-se o modelo matemático do estimador de estados YBSE que contempla a representação das linhas, transformadores, reguladores de tensão e medidas. Apresenta-se também como os taps dos reguladores são inseridos como variáveis de estados no processos iterativo.

As linhas trifásicas são representadas pelo modelo π equivalente exemplificado na Figura 3.1. A impedância série e a admitância *shunt* são dadas pelas matrizes 3×3 das Equações (3.10) e (3.11).

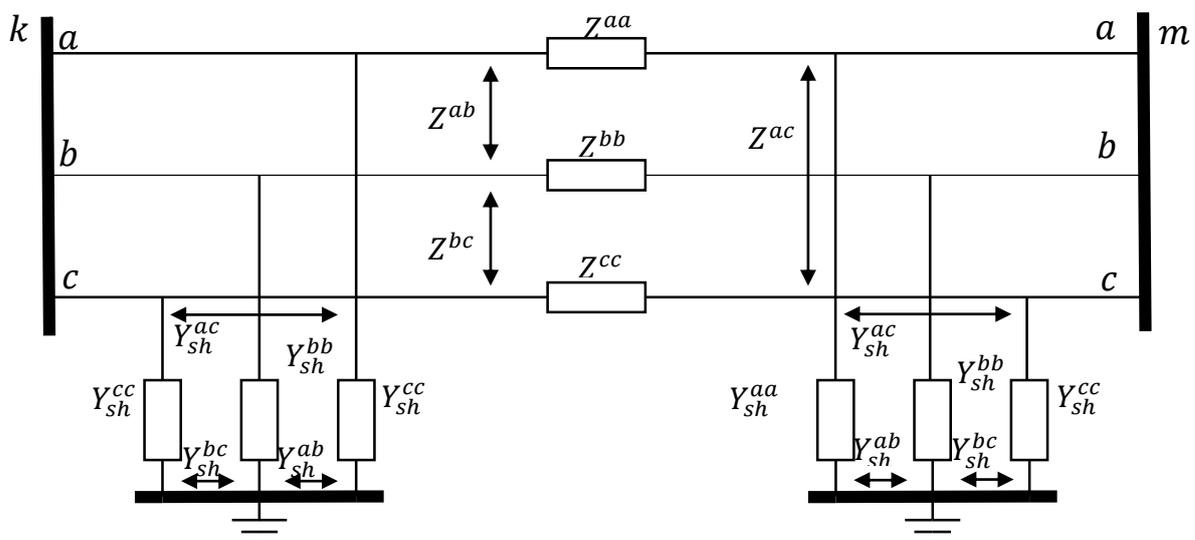


Figura 3.1 – Modelo π equivalente das linhas trifásicas com parâmetros concentrados
Fonte: Adaptado de Almeida, 2015.

$$Z_{km}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_{km}^{aa} & Z_{km}^{ab} & Z_{km}^{ac} \\ Z_{km}^{ba} & Z_{km}^{bb} & Z_{km}^{bc} \\ Z_{km}^{ca} & Z_{km}^{cb} & Z_{km}^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{km}^{aa} & r_{km}^{ab} & r_{km}^{ac} \\ r_{km}^{ba} & r_{km}^{bb} & r_{km}^{bc} \\ r_{km}^{ca} & r_{km}^{cb} & r_{km}^{cc} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} x_{km}^{aa} & x_{km}^{ab} & x_{km}^{ac} \\ x_{km}^{ba} & x_{km}^{bb} & x_{km}^{bc} \\ x_{km}^{ca} & x_{km}^{cb} & x_{km}^{cc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$Y_{sh_{km}}^{abc} = \begin{bmatrix} b_{sh_{km}}^{aa} & b_{sh_{km}}^{ab} & b_{sh_{km}}^{ac} \\ b_{sh_{km}}^{ba} & b_{sh_{km}}^{bb} & b_{sh_{km}}^{bc} \\ b_{sh_{km}}^{ca} & b_{sh_{km}}^{cb} & b_{sh_{km}}^{cc} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Sendo:

Z_{km}^{aa} , Z_{km}^{bb} , e Z_{km}^{cc} : impedância própria das fases A, B e C, respectivamente, do circuito entre as barras k e m .

Z_{km}^{ab} e Z_{km}^{ba} : impedância mútua entre as fases A e B do circuito entre as barras k e m .

Z_{km}^{bc} e Z_{km}^{cb} : impedância mútua entre as fases B e C do circuito entre as barras k e m .

Z_{km}^{ac} e Z_{km}^{ca} : impedância mútua entre as fases A e C do circuito entre as barras k e m .

$b_{sh_{km}}^{aa}$, $b_{sh_{km}}^{bb}$ e $b_{sh_{km}}^{cc}$: susceptância capacitiva das fases A, B e C, respectivamente, do circuito entre as barras k e m .

$b_{sh_{km}}^{ab}$ e $b_{sh_{km}}^{ba}$: susceptância capacitiva mútua entre as fases A e B do circuito entre as barras k e m .

$b_{sh_{km}}^{bc}$ e $b_{sh_{km}}^{cb}$: susceptância capacitiva mútua entre as fases B e C do circuito entre as barras k e m .

$b_{sh_{km}}^{ac}$ e $b_{sh_{km}}^{ca}$: susceptância capacitiva mútua entre as fases A e C do circuito entre as barras k e m .

A representação das derivações monofásicas e bifásicas é realizada considerando-se na fase inexistente uma impedância infinita. Esses elementos são representados matematicamente substituindo-se a impedância própria inexistente por um número de valor elevado (10^{12}), como é realizado em (Almeida, 2015).

A seguir, os componentes dos vetores apresentados na Seção 3.2 deste capítulo serão abordados detalhadamente. Os índices “ abc ” indicam que a formulação é estendida para as fases A, B e C.

3.3.1 Modelo dos transformadores de distribuição

Os transformadores de distribuição são modelados pelas suas matrizes de admitâncias equivalentes cuja dedução pode ser encontrada em Chen, Chen e Chebli (1991).

Na Equação (3.12) apresenta-se a matriz de admitância equivalente para um

transformador de potência trifásico:

$$Y = \begin{bmatrix} y_p^{abc} & y_{ps}^{abc} \\ y_{sp}^{abc} & y_s^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

As submatrizes y_p^{abc} e y_s^{abc} são, respectivamente, as admitâncias próprias do primário e do secundário. Já y_{ps}^{abc} e y_{sp}^{abc} representam as admitâncias mútuas. Os valores para as diferentes conexões são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Conexões dos transformadores de potência

Conexão do transformador		Admitâncias próprias		Admitâncias mútuas	
Primário	Secundário	y_p^{abc}	y_s^{abc}	y_{ps}^{abc}	y_{sp}^{abc}
Y aterrado	Y aterrado	Y_I	Y_I	$-Y_I$	$-Y_I$
Y aterrado	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y aterrado	Δ	Y_I	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^t
Y	Y aterrado	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y	Δ	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^t
Δ	Y aterrado	Y_{II}	Y_I	Y_{III}^t	Y_{III}
Δ	Y	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}^t	Y_{III}
Δ	Δ	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$

onde,

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$Y_{II} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$Y_{III} = \begin{bmatrix} -y_t & y_t & 0 \\ 0 & -y_t & y_t \\ -y_t & 0 & -y_t \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

e y_t é a admitância de dispersão em p.u. do transformador.

3.3.2 Modelo dos reguladores de tensão

O modelo adotado para a representação dos transformadores reguladores de tensão pode ser encontrado com mais detalhe em Monticelli (1983). Consiste basicamente em uma admitância série y_{km} e um autotransformador ideal com relação de transformação $1:t$, conectado entre as barras k e m de determinado sistema, como é ilustrado na Figura 3.2.

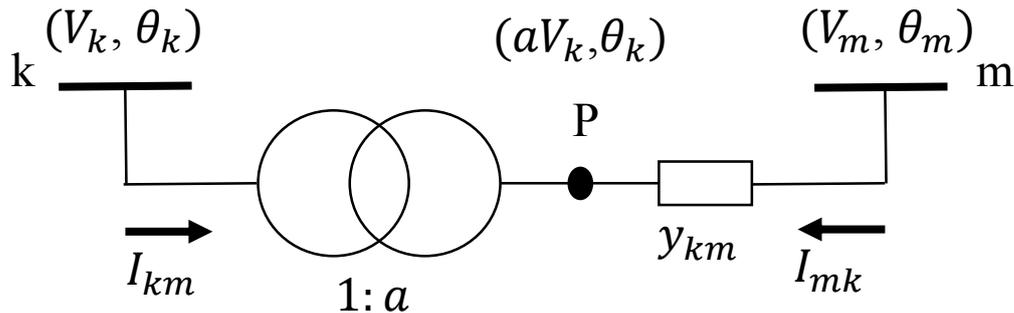


Figura 3.2 – Representação geral dos transformadores reguladores

Fonte: Adaptado de Monticelli, 1983

Como pode ser observado na Figura 3.2, determina-se uma barra fictícia p entre as barras em que o transformador regulador está conectado. A relação entre as magnitudes das tensões nos nós terminais k e p do transformador é dada por:

$$\frac{V_p}{V_k} = a \quad (3.16)$$

A representação trifásica do circuito equivalente do transformador regulador se dá por três unidades monofásicas conectadas em Y (Garcia & Carneiro, 2001). Cada unidade é modelada como uma impedância em série com um transformador ideal com taps no secundário. A Figura 3.3 representa o circuito π equivalente do regulador de tensão.

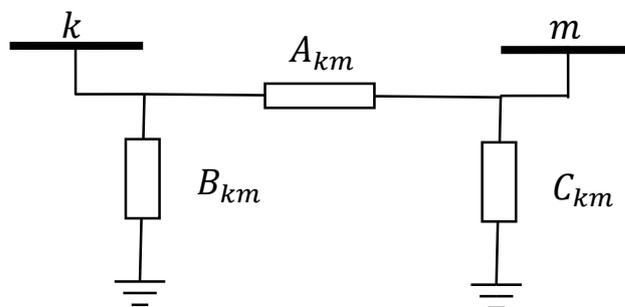


Figura 3.3 – Circuito π equivalente de um regulador de tensão

Fonte: Monticelli, 1983

A_{km} , B_{km} e C_{km} são matrizes diagonais 3×3 cujos elementos são definidos nas Equações (3.17) a (3.19).

$$A_{km} = a_{km}^{abc} y_{km}^{abc} \quad (3.17)$$

$$B_{km} = a_{km}^{abc} (a_{km}^{abc} - 1) y_{km}^{abc} \quad (3.18)$$

$$C_{km} = (1 - a_{km}^{abc}) y_{km}^{abc} \quad (3.19)$$

onde y_{km}^{abc} é a admitância série do regulador de tensão dada por $g_{km}^{abc} + b_{km}^{abc}$ e a_{km}^{abc} são as posições dos taps do regulador de tensão conectado entre as barras k e m .

Observa-se que o modelo adotado para a modelagem dos reguladores de tensão interfere na matriz Y_{bus} do sistema, fazendo com que esta dependa da posição dos taps dos reguladores. Posteriormente aborda-se como os taps serão incluídos no processo de estimação como variáveis de estado, e quais novos elementos deverão ser adicionados para isso.

3.3.3 Medidas de Entrada $z(x)$

Para garantir a observabilidade numérica do sistema, o número mínimo de medidas necessárias para realizar a estimação de estado deve ser igual ao número de variáveis de estado. Neste trabalho, considera-se medidas reais e imaginárias de injeção de corrente, injeção de potência e módulo de tensão.

Medidas de corrente

Quando as medidas de entrada são injeções de corrente o vetor $z(x)$ é dado pela Equação (3.20):

$$z(x) = [(I_{rk}^{med})^{abc} (I_{ik}^{med})^{abc}] \quad (3.20)$$

em que $(I_{rk}^{med})^{abc}$ e $(I_{ik}^{med})^{abc}$ correspondem respectivamente as partes real e imaginária da corrente injetada na barra k para as fases A, B e C.

Medidas de potência

Como as funções não lineares contidas em $h(x)$ são equações de corrente, medidas de potência devem ser convertidas para medidas de corrente equivalentes, a fim de determinar os resíduos r . Portanto, para medidas de injeção de potência na barra k , as seguintes conversões são realizadas:

$$(I_{rk}^{eq})^{abc} = \frac{(P_k^{med})^{abc} V_{rk}^{abc} + (Q_k^{med})^{abc} V_{ik}^{abc}}{(V_{rk}^{abc})^2 + (V_{ik}^{abc})^2} \quad (3.21)$$

$$(I_{ik}^{eq})^{abc} = \frac{[(P_k^{med})^{abc} V_{ik}^{abc} - (Q_k^{med})^{abc} V_{rk}^{abc}]}{(V_{rk}^{abc})^2 + (V_{ik}^{abc})^2} \quad (3.22)$$

onde,

I_{rk}^{eq} e I_{ik}^{eq} : partes real e imaginária das medidas de correntes equivalentes injetadas na barra k .

P_k^{med} e Q_k^{med} : medidas injeções de potência ativa e reativa injetadas na barra k .

V_{rk}^{abc} e V_{ik}^{abc} : partes real e imaginária da tensão nodal na barra k .

As variáveis de estado adotadas para este método são as tensões nodais na forma retangular, portanto, V_{rk}^{abc} e V_{ik}^{abc} são variáveis de estado.

Medidas de módulo de tensão

O método também permite a inclusão de medidas de módulo de tensão como informação de entrada. Porém, como a formulação adotada é na forma retangular, com medidas de módulo de tensão, as seguintes conversões devem ser adotadas:

$$(V_{rk}^{eq})^{abc} = \text{real} \left\{ |V_k^{med}|^{abc} \frac{(V_{rk}^{abc} + jV_{ik}^{abc})}{|V_{rk}^{abc} + jV_{ik}^{abc}|} \right\} \quad (3.23)$$

$$(V_{ik}^{eq})^{abc} = \text{imag} \left\{ |V_k^{med}|^{abc} \frac{(V_{rk}^{abc} + jV_{ik}^{abc})}{|V_{rk}^{abc} + jV_{ik}^{abc}|} \right\} \quad (3.24)$$

em que V_{rk}^{eq} e V_{ik}^{eq} são as partes real e imaginária das medidas equivalentes de módulo de tensão nodal da barra k e, V_k^{med} é a medida de módulo de tensão nodal mensurada da barra k .

Através da conversão realizada com as Equações 3.23 e 3.24 as medidas de tensão passam a depender das variáveis de estados, devendo ser atualizada em todas as iterações. Essa prática garante a uma observabilidade artificial no sistema.

Medidas de tensão do regulador de tensão

Para estimar os taps dos reguladores de tensão, tem-se como dado de entrada o módulo de tensão na barra controlada pelo regulador de tensão. Essa informação será tratada como uma medida, chamada de medida de tensão do regulador de tensão, ($V_m^{cont-abc}$). No entanto, as formulações associadas à esta medida não serão as mesmas utilizadas para as medidas de módulo de tensão abordadas no tópico anterior.

Neste caso, não é necessário a separação nas componentes reais e imaginárias dos módulos de tensão, como é realizado nas Equações (3.23) e (3.24). Isso acontece por que a

Equação que descreve esse controle de tensão – Equação (3.28) está em função do módulo ao quadrado da tensão. Portanto, a medida de entrada referente ao controle determinado pelo regulador de tensão é dada pela Equação (3.25):

$$z(x) = (V_m^{cont_abc})^2 \quad (3.25)$$

em que $(V_m^{cont_abc})$ é a tensão fixada na barra controlada pelo regulador de tensão.

3.3.4 Funções não lineares $h(x)$

Medidas de corrente e potência

O vetor $h(x)$ é composto pelas funções não lineares utilizadas para calcular o valor das medidas de entrada contidas em $z(x)$, com o objetivo de determinar os resíduos r – Equação (3.2). Essas funções, chamadas de medidas calculadas, são equações referentes as medidas de injeções de corrente, módulos de tensão ou tensão do regulador de tensão.

As injeções de correntes calculadas para a barra k são dadas pelas Equações (3.26) e (3.27):

$$(I_{rk}^{calc})^{abc} = \text{real} \{ [Ybus^{abc}] [V_{rk}^{abc} + jV_{ik}^{abc}] \} \quad (3.26)$$

$$(I_{ik}^{calc})^{abc} = \text{imag} \{ [Ybus^{abc}] [V_{rk}^{abc} + jV_{ik}^{abc}] \} \quad (3.27)$$

onde I_{rk}^{calc} e I_{ik}^{calc} são as partes real e imaginária das medidas de injeção de corrente calculadas para a barra k .

Medidas de módulo de tensões

Este método trabalha com equações de corrente, porém é possível trabalhar com medidas de módulo de tensão sem a necessidade da conversão para medidas de corrente. Para tanto, as medidas de módulo de tensão são convertidas para medidas de tensão na forma retangular – Equações (3.23) e (3.24), portanto, as equações que representam essas medidas são as próprias variáveis de estado: V_{rk}^{abc} e V_{ik}^{abc} .

Medidas de tensão do regulador de tensão

A equação que determina o controle efetuado pelo regulador de tensão é apresentada na Equação (3.28):

$$(V_m^{calc_abc})^2 = (V_{rm}^{abc})^2 + (V_{im}^{abc})^2 \quad (3.28)$$

onde $(V_m^{calc_abc})^2$ é o módulo da tensão ao quadrado para a barra m , em função das variáveis de estado da barra m , V_{rm}^{abc} e V_{im}^{abc} .

3.3.5 Matriz Jacobiana $H(x)$

A matriz Jacobiana $H(x)$ é calculada pela derivada parcial dos resíduos r – Equação (3.2) em relação às variáveis de estado, conforme a Equação (3.29):

$$H(x) = \frac{\partial(z(x) - h(x))}{\partial x} \quad (3.29)$$

A estrutura de $H(x)$ sem a inclusão de transformadores reguladores é representada pela Equação (3.30). O número de linhas m corresponde ao número de medidas de entrada, e o número de colunas n corresponde ao número de variáveis de estado.

$$H(x)_{m \times n} = \begin{matrix} & & V_{r,i-k}^{abc} & \cdots & V_{r,i-m}^{abc} \\ & I_{r,i-k}^{abc} & \frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} & \cdots & \frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-m}^{abc}} \\ & \vdots & \vdots & & \vdots \\ & I_{r,i-m}^{abc} & \frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} & \cdots & \frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial V_{r,i-m}^{abc}} \\ & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (V_{r,i-k}^{eq})^{abc} & \frac{\partial (V_{r,i-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} & \cdots & & 0 \end{matrix} \quad (3.30)$$

onde $\frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}}$ e $\frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-m}^{abc}}$ são as derivadas parciais das funções não lineares respectivas as medidas ou medidas equivalentes de injeções de correntes da barra k , em relação às variáveis de estado correspondentes as barras k e m e, $\frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}}$ e $\frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial V_{r,i-m}^{abc}}$ são as derivadas parciais das funções não lineares respectivas as medidas ou medidas equivalentes de injeções de correntes da barra m , em relação às variáveis de estado correspondentes as barras k e m .

Estas submatrizes são exemplificadas pela Equação (3.31) referente à medida ou medida equivalente da barra k :

$$\frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \left((I_{rk})^{abc} - (I_{rk}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{rk}^{abc}} & \frac{\partial \left((I_{rk})^{abc} - (I_{rk}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{ik}^{abc}} \\ \frac{\partial \left((I_{ik})^{abc} - (I_{ik}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{rk}^{abc}} & \frac{\partial \left((I_{ik})^{abc} - (I_{ik}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{ik}^{abc}} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

As expressões gerais para as submatrizes contidas na Equação (3.31) são explanadas a seguir:

$$\frac{\partial \left((I_{rk})^{abc} - (I_{rk}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{rk}^{abc}} = [G_{kk}^{abc}] - [a_k^{abc}] \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial \left((I_{rk})^{abc} - (I_{rk}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{ik}^{abc}} = -[B_{kk}^{abc}] + [b_k^{abc}] \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial \left((I_{ik})^{abc} - (I_{ik}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{rk}^{abc}} = [B_{kk}^{abc}] - [c_k^{abc}] \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial \left((I_{ik})^{abc} - (I_{ik}^{calc})^{abc} \right)}{\partial V_{ik}^{abc}} = [G_{kk}^{abc}] - [d_k^{abc}] \quad (3.35)$$

em que as submatrizes G_{kk}^{abc} , B_{kk}^{abc} , G_{km}^{abc} e B_{km}^{abc} são respectivamente, as condutâncias e susceptâncias próprias da matriz Ybus, dadas pelas Equações (3.36) a (3.37).

$$B_{kk}^{abc} = \begin{bmatrix} B_{kk}^{AA} & B_{kk}^{AB} & B_{kk}^{AC} \\ B_{kk}^{BA} & B_{kk}^{BB} & B_{kk}^{BC} \\ B_{kk}^{CA} & B_{kk}^{CB} & B_{kk}^{CC} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$G_{kk}^{abc} = \begin{bmatrix} G_{kk}^{AA} & G_{kk}^{AB} & G_{kk}^{AC} \\ G_{kk}^{BA} & G_{kk}^{BB} & G_{kk}^{BC} \\ G_{kk}^{CA} & G_{kk}^{CB} & G_{kk}^{CC} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Os elementos I_{rk} e I_{ik} , contidos na Equação (3.31) podem ser medidas reais I_{rk}^{med} , I_{ik}^{med} ou medidas equivalentes I_{rk}^{eq} , I_{ik}^{eq} . Se forem medidas reais, as submatrizes $[a_k^{abc}]$, $[b_k^{abc}]$, $[c_k^{abc}]$ e $[d_k^{abc}]$ das Equações (3.32) a (3.35) são zero. No entanto, se são medidas equivalentes, estas submatrizes são definidas pelas Equações (3.38) a (3.41).

$$a_k^{abc} = \frac{(P_k)^{abc} \left[(V_{ik}^{abc})^2 - (V_{rk}^{abc})^2 \right] - 2V_{rk}^{abc} V_{ik}^{abc} (Q_k)^{abc}}{\left((V_{rk}^{abc})^2 + (V_{ik}^{abc})^2 \right)^2} \quad (3.38)$$

$$b_k^{abc} = \frac{(Q_k)^{abc} \left[(V_{rk}^{abc})^2 - (V_{ik}^{abc})^2 \right] - 2V_{rk}^{abc} V_{ik}^{abc} (P_k)^{abc}}{\left((V_{rk}^{abc})^2 + (V_{ik}^{abc})^2 \right)^2} \quad (3.39)$$

$$c_k^{abc} = -b_k^{abc} \quad (3.40)$$

$$d_k^{abc} = \frac{(P_k)^{abc} [(V_{rk}^{abc})^2 - (V_{ik}^{abc})^2] + 2V_{rk}^{abc}V_{ik}^{abc}(Q_k)^{abc}}{((V_{rk}^{abc})^2 + (V_{ik}^{abc})^2)^2} \quad (3.41)$$

Observa-se que os elementos das Equações (3.38) a (3.41) só existem quando consideram-se medidas equivalentes. Observa-se também que estes elementos dependem das variáveis de estado, portanto na presença de medidas equivalentes, a matriz Jacobiana deverá ser atualizada em todas as iterações. No entanto, se houver apenas medidas de corrente como dado de entrada do estimador de estado, estes elementos serão nulos e a matriz Jacobiana será composta unicamente pelos elementos da matriz Ybus.

Quanto as medidas de tensão, o elemento $\frac{\partial (V_{r,i-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}}$ da matriz Jacobiana dada em (3.30) representa as derivadas parciais das medidas equivalentes correspondentes aos módulos de tensão em relação às variáveis das barras k e m , exemplificadas na Equação (3.42):

$$\frac{\partial (V_{r,i-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial ((V_{rk}^{eq})^{abc} - (V_{rk})^{abc})}{\partial V_{rk}^{abc}} & \frac{\partial ((V_{rk}^{eq})^{abc} - (V_{rk})^{abc})}{\partial V_{ik}^{abc}} \\ \frac{\partial ((V_{ik}^{eq})^{abc} - (V_{ik})^{abc})}{\partial V_{rk}^{abc}} & \frac{\partial ((V_{ik}^{eq})^{abc} - (V_{ik})^{abc})}{\partial V_{ik}^{abc}} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

As derivadas parciais das submatrizes contidas na Equação (3.42) são especificadas pelas Equações (3.43) a (3.46):

$$\frac{\partial (V_{r-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{r-k}^{abc}} = \frac{\partial ((V_{rk}^{eq})^{abc} - (V_{rk})^{abc})}{\partial V_{rk}^{abc}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial (V_{r-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{i-k}^{abc}} = \frac{\partial ((V_{rk}^{eq})^{abc} - (V_{rk})^{abc})}{\partial V_{ik}^{abc}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial (V_{i-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{r-k}^{abc}} = \frac{\partial ((V_{ik}^{eq})^{abc} - (V_{ik})^{abc})}{\partial V_{rk}^{abc}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial (V_{i-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{i-k}^{abc}} = \frac{\partial ((V_{ik}^{eq})^{abc} - (V_{ik})^{abc})}{\partial V_{ik}^{abc}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Nota-se que os elementos da matriz Jacobiana correspondentes às medidas de módulo de tensão são constantes.

3.3.6 Matriz Jacobiana $H_a(x)$ aumentada

A inclusão dos reguladores de tensão com estimação dos taps requer que novas variáveis de estado sejam acrescentadas a matriz Jacobiana. Para cada regulador de tensão, variáveis de estado a_{km}^{abc} irão representar os taps das fases A, B e C a serem controladas. Portanto, a matriz Jacobiana aumentada $H_a(x)$ passa a ser representada pela estrutura da Equação (3.47):

$$H_a(x)_{m \times n} = \begin{matrix} & & V_{r,i-k}^{abc} & & V_{r,i-m}^{abc} & & a_{km}^{abc} \\ & I_{r,i-k}^{abc} & \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} & \cdots & \frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial V_{r,i-m}^{abc}} & \frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} & \cdots & \frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial V_{r,i-m}^{abc}} & \frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial (V_{r,i-k}^{eq})^{abc}}{\partial V_{r,i-k}^{abc}} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{\partial (V_m^{abc})^2}{\partial V_{r,i-m}^{abc}} & 0 \end{array} \right. & & & & \\ & I_{r,i-m}^{abc} & & & & & \\ & (V_{r,i-k}^{eq})^{abc} & & & & & \\ & \vdots & & & & & \\ & (V_m^{abc})^2 & & & & & \end{matrix} \quad (3.47)$$

onde $\frac{\partial I_{r,i-k}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}}$ são as derivadas parciais das funções não lineares respectivas as medidas ou medidas equivalentes de injeções de corrente da barra k em relação as variáveis de estado taps dos reguladores; $\frac{\partial I_{r,i-m}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}}$ são as derivadas parciais das funções não lineares respectivas as medidas ou medidas equivalentes de injeções de corrente da barra m em relação as variáveis de estado taps dos reguladores e, $\frac{\partial (V_m^{abc})^2}{\partial V_{r,i-m}^{abc}}$ são as derivadas parciais das funções não lineares respectivas as medidas de tensão do regulador de tensão, em relação as variáveis de estado tensões nodais. Estas derivadas parciais são representadas pelas Equações 3.48 a 3.53.

$$\frac{\partial I_{rk}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}} = -g_{km}^{abc} V_{im}^{abc} - b_{km}^{abc} V_{rm}^{abc} + 2a_{km}^{abc} (g_{km}^{abc} V_{ik}^{abc} + b_{km}^{abc} V_{rk}^{abc}) \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial I_{ik}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}} = -g_{km}^{abc} V_{rm}^{abc} + b_{km}^{abc} V_{im}^{abc} + 2a_{km}^{abc} (g_{km}^{abc} V_{rk}^{abc} - b_{km}^{abc} V_{ik}^{abc}) \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial I_{im}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}} = -g_{km}^{abc} V_{ik}^{abc} - b_{km}^{abc} V_{rk}^{abc} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial I_{rm}^{abc}}{\partial a_{km}^{abc}} = -g_{km}^{abc} V_{rk}^{abc} + b_{km}^{abc} V_{ik}^{abc} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial (V_m^{abc})^2}{\partial V_{rm}^{abc}} = 2V_{rm}^{abc} \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial (V_m^{abc})^2}{\partial V_{im}^{abc}} = 2V_{im}^{abc} \quad (3.53)$$

Observa-se que os elementos da matriz Jacobiana correspondentes ao regulador de tensão também devem ser atualizados em todas as iterações, uma vez que eles dependem das variáveis de estados.

Finalmente, os elementos que representam a inclusão dos transformadores reguladores de tensão na modelagem do estimador *YBSE* são os elementos que se classificam como medidas de entrada do regulador – Equação (3.25), a equação de controle utilizada para relacionar as medidas de entrada do regulador e as variáveis de estado – Equação (3.28) e, as derivadas parciais que relacionam as medidas de entrada e variáveis de estado na matriz Jacobiana – Equações (3.48) a (3.53).

3.4 Algoritmo

A modelagem dos estimadores de estado pode considerar os taps dos reguladores de tensão como parâmetros ou variáveis de estado. Quando os taps são considerados parâmetros, estes são fixados em determinada posição e estima-se apenas as tensões complexas do sistema. Nesta condição, os taps dos reguladores não são considerados no vetor de estado e a tensão que deseja-se manter na barra controlada pelo regulador (Equação (3.25)), não é considerada uma medida de entrada no processo de estimação de estado. Portanto, a matriz Jacobiana considerada é representada pela Equação (3.30).

Na modelagem com taps como variáveis de estado, o estimador de estado é capaz de estimar os taps dos reguladores em conjunto com as tensões complexas do sistema. Portanto, a tensão que se deseja manter na barra controlada pelo regulador é considerada uma medida de entrada (Equação (3.25)). O vetor de estado que continha apenas tensões complexas como variáveis de estado passa a ser composto pelas tensões complexas e taps dos reguladores de tensão. E, a matriz jacobiana passa a ser a matriz jacobiana aumentada, dada na Equação (3.47).

O algoritmo de estimação de estado é dividido em três Etapas:

1. Determinação do estado inicial: taps como parâmetros.
2. Estimação de estado: taps com variáveis de estado (Teixeira et al., 1991b).
3. Discretização dos taps: taps como parâmetros (Teixeira et al., 1991b).

Na primeira Etapa, deseja-se determinar os valores iniciais para as tensões nodais, a fim de obter um estado de partida mais próximo do estado final, melhorando as características de convergência do algoritmo. Portanto, considera-se a modelagem com taps como parâmetros e estima-se somente as tensões complexas.

Na segunda Etapa, deseja-se estimar o estado operativo completo do sistema. Então, considera-se a modelagem com taps como variáveis de estado contínuas, porém, utilizam-se as tensões nodais estimadas na Etapa 1 como estimativa inicial para as novas tensões nodais juntamente com os taps dos reguladores de tensão.

A terceira Etapa tem como objetivo discretizar os taps estimados na Etapa anterior e ajustar as tensões estimadas para corresponder aos taps discretizados. Portanto, os taps estimados na Etapa 2 são discretizados para seu valor inteiro mais próximo e definidos como parâmetros. Na definição como parâmetro, exclui-se os taps do vetor de estado. Então, a estimação de estado é realizada novamente com os taps definidos com parâmetros e com as tensões estimadas na etapa anterior como valores iniciais. Nesta etapa, as tensões iniciais estarão muito próximas de seus valores finais, ocorrendo apenas pequenos ajustes.

Etapa 1. Determinação do estado inicial

- I. Inicializar o contador de iterações, $k = 0$;
- II. Inicializar as variáveis de estado, x^k . Geralmente assume-se um perfil plano para as tensões;
- III. Calcular a matriz Ybus considerando os reguladores de tensão;
- IV. Converter medidas de potência em medidas de correntes equivalentes;
- V. Calcular a matriz Jacobiana $H(x)$ com a Equação (3.30), os resíduos r e a matriz de Ganho $G(x)$;
- VI. Calcular Δx com a Equação (3.7);
- VII. Se $\Delta x \leq \text{tolerância}$, vá para a Etapa 2. Do contrário, vá ao passo VIII;
- VIII. Atualizar as variáveis de estado com $x^{k+1} = x^k + \Delta x$. Faça $k = k + 1$ e retorne ao passo IV.

Etapa 2. Estimação de Estado

- I. Reinicializar o contador de iterações, $k = 0$;
- II. Inicializar x^k com as variáveis de estado determinadas no passo VII da Etapa 1;
- III. Calcular a matriz Ybus considerando os reguladores de tensão;
- IV. Converter medidas de potência em medidas de correntes equivalentes;

- V. Calcular a matriz Jacobiana aumentada $H_a(x)$ com a Equação (3.47), os resíduos r e a matriz de Ganho $G(x)$;
- VI. Calcular Δx com a Equação (3.7);
- VII. Se $\Delta x \leq$ tolerância, vá para a Etapa 3. Do contrário, vá ao passo VIII;
- VIII. Atualizar as variáveis de estado com $x^{k+1} = x^k + \Delta x$. Faça $k = k + 1$ e retorne ao passo III.

Etapa 3. Discretização dos taps

- I. Reinicializar o contador de iterações, $k = 0$;
- II. Inicializar x^k com as variáveis de estado determinadas no passo VII da Etapa 2;
- III. Arredondar os taps estimados na Etapa 2 para seus valores discretos mais próximos;
- IV. Calcular a matriz Ybus considerando as posições dos taps dos reguladores determinados no passo III;
- V. Converter medidas de potência em medidas de correntes equivalentes;
- VI. Calcular a matriz Jacobiana $H(x)$ com a Equação (3.30), os resíduos r e a matriz de Ganho $G(x)$;
- VII. Calcular Δx com a Equação (3.7);
- VIII. Se $\Delta x \leq$ tolerância, então pare. Do contrário, vá ao passo IX;
- IX. Atualizar as variáveis de estado com $x^{k+1} = x^k + \Delta x$. Faça $k = k + 1$ e retorne ao passo IV.

3.4.1 Problemas de convergência do método

Os seguintes aspectos devem ser considerados para evitar problemas de convergência no método:

- Observabilidade

A formulação adotada no método permite dados de entrada do tipo corrente real, corrente imaginária, potência ativa, potência reativa e módulo de tensão. Para garantir a observabilidade do sistema, cada variável de estado deve ter uma medida associada a esta variável. Por exemplo: seja uma variável de estado x igual a V_{rk}^a , ou seja, a parte real da tensão da fase A na barra k . Deve-se ter como dado de entrada uma medida de corrente real da fase A na barra k I_{rk}^a , ou uma medida de potência ativa da fase A na barra k P_k^a ou uma medida de módulo de tensão da fase A na barra k $|V_k^a|$.

As medidas de entrada do tipo módulo de tensão são convertidas para medidas de tensões complexas. Portanto, uma medida de entrada do tipo módulo de tensão em determinada barra do sistema está associada a duas variáveis de estado, sendo elas as tensões complexas para esta barra. Dessa forma, a utilização de medidas de módulo de tensão diminui significativamente a quantidade de medidas necessárias como dado de entrada do estimador de estado, quando comparado aos outros tipos de medidas como dados de entrada.

- Posto da matriz Jacobiana

A matriz $H(x)$ não deve ter posto completo, caso contrário, a matriz $G(x)$ será inversível.

- Ponderações

Evitar o uso de ponderações muito elevadas na matriz W , como pode ser observado nos testes realizados no Capítulo Resultados.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se as simulações computacionais, análises e resultados obtidos para validar o algoritmo e a modelagem dos reguladores de tensão. O capítulo está dividido nas seguintes Seções:

4.2 Geração dos dados, avaliação do algoritmo e sistemas testes.

4.3 Validação da formulação.

4.4 Medidas com ruídos e redundância.

Na Seção 4.2 disserta-se como os dados de entrada foram gerados, quais os critérios utilizados para avaliar a qualidade da estimação de estado e o funcionamento do algoritmo e, ilustra-se os sistemas testes utilizados para realizar as estimacões de estado. A Seção 4.3 tem como objetivo validar a formulação do algoritmo. Portanto, são realizadas simulações cujos conjuntos de medidas não possuem ruídos ou redundância. Finalmente, na Seção 4.4 o comportamento do algoritmo e a qualidade da estimação de estado são analisados com conjuntos de medidas com ruídos e redundância.

4.2 Geração dos dados, avaliação do algoritmo e sistemas testes

Os dados de entrada do estimador de estado são os parâmetros do sistema elétrico, a topologia e o conjunto de medidas de entrada. Os sistemas testes utilizados neste trabalho são os sistemas de distribuição IEEE 34 barras e IEEE 123 barras (IEEE, 2017). O sistema teste de 34 barras é ilustrado pela Figura 4.1.

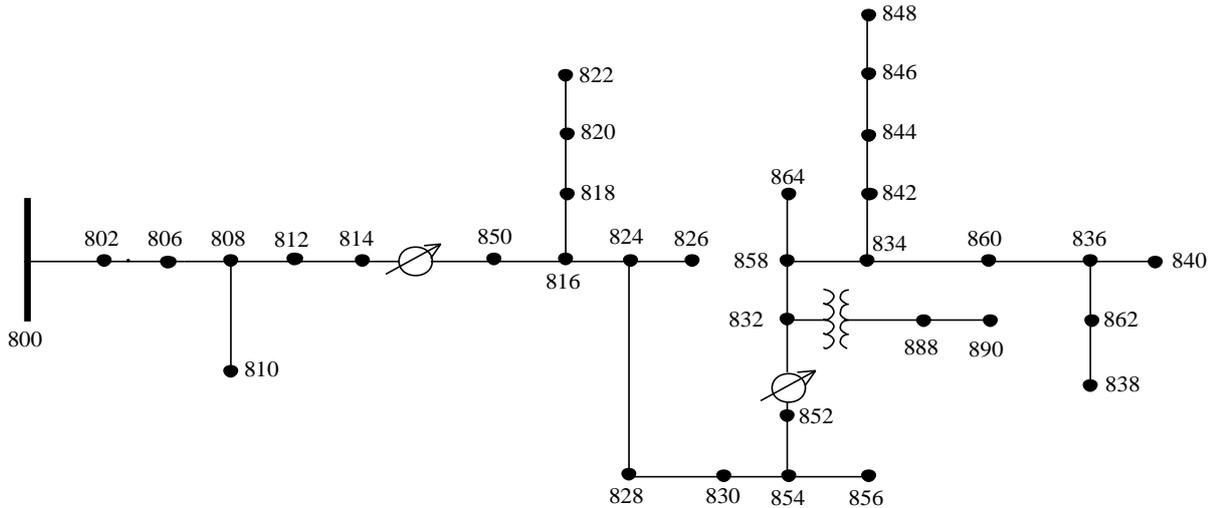


Figura 4.1 – Sistema IEEE 34 barras
Fonte: Adaptado de (IEEE, 2017)

O sistema teste IEEE 34 barras da Figura 4.1 possui tensão nominal de 24,9kV e topologia radial. Suas características principais são a existência de dois reguladores de tensão em linhas longas e levemente carregadas e, um transformador de potência abaixador com tensão 24,9/4,16kV e ligação Y-Y.

O sistema teste IEEE 123 barras é apresentado na Figura 4.2.

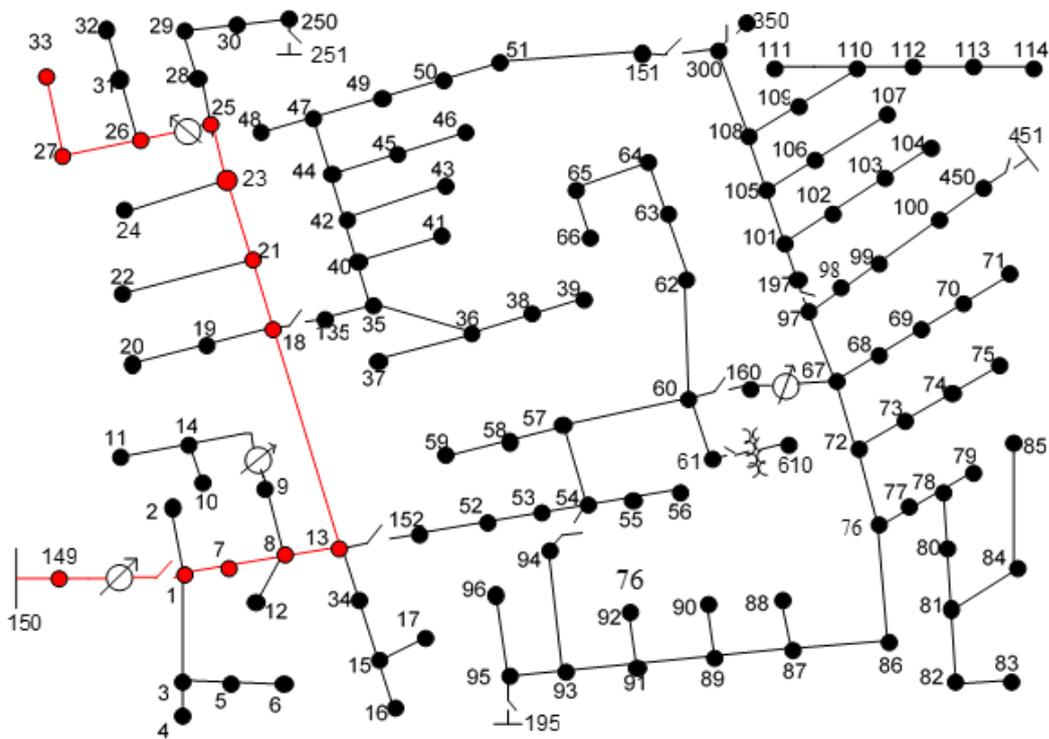


Figura 4.2 – Sistema IEEE 123 barras
Fonte: Adaptado de (IEEE, 2017)

O IEEE 123 barras, Figura 4.2, opera em tensão nominal de 4,16kV e apresenta problemas

de queda de tensão que são contornados com a aplicação de reguladores de tensão e capacitores shunt. Seu circuito é caracterizado por cargas desequilibradas, 4 reguladores de tensão e bancos de capacitores em derivação. Os reguladores de tensão possuem conexões trifásicas, monofásicas e bifásicas, o que pode ser um desafio para métodos de varredura.

As medidas de entrada do estimador de estado são geradas através do algoritmo de fluxo de carga apresentado em Almeida (2015). Este algoritmo considera a modelagem de injeção de correntes e transformadores reguladores de tensão. A validação da formulação é realizada com conjuntos de medidas puras, ou seja, sem ruídos. Para os demais resultados, o conjunto de medidas de entrada do estimador de estado é corrompido por erros gaussianos que variam de $\pm 3\sigma$.

A avaliação do algoritmo é realizada comparando-se o resultado obtido pelo estimador de estado com o estado operativo e taps determinados com o algoritmo de fluxo de carga. O estado operativo e taps obtidos através do fluxo de carga são chamados de “referência”. Portanto, tem-se o estado operativo referência e taps referência. Considera-se que o estado operativo referência não possui ruídos, ou seja, são dados perfeitos. Para a análise dos resultados, determina-se um erro máximo de cada estado operativo, calculado de acordo com a Equação (4.1).

$$erro_máximo = máximo \left\{ \frac{|Vest| - |Vref|}{|Vref|} \right\} \quad (4.1)$$

Onde $|Vest|$ é o vetor que contém os módulos das tensões complexas estimadas para todas as barras do sistema, $|Vref|$ é o vetor que contém os módulos das tensões complexas referência para todas as barras do sistema, e o *erro_máximo* é o valor máximo contido no vetor de erros para determinado estado operativo, dado em p.u.

O algoritmo adotado foi implementado no software MATLAB 2018b, em que algumas simulações são realizadas com uma curva de carga específica. Essa curva de carga possui 24 horas com intervalos de 15 minutos. Dessa forma, a curva de carga possui 96 pontos. Nas simulações que consideram a curva de carga, em cada ponto é realizada uma estimação de estado, portanto, tem-se 96 estados operativos. Cada estado operativo possui um erro máximo.

4.3 Validação da formulação

4.3.1 Sistema IEEE 34 barras sem reguladores de tensão

A validação da formulação é realizada com o sistema teste IEEE 34 barras e uma curva com 96 pontos. O primeiro teste tem como objetivo validar a modelagem do estimador de estado sem a interferência dos reguladores de tensão tanto para a geração dos estados operativos referência quanto para a estimação de estado.

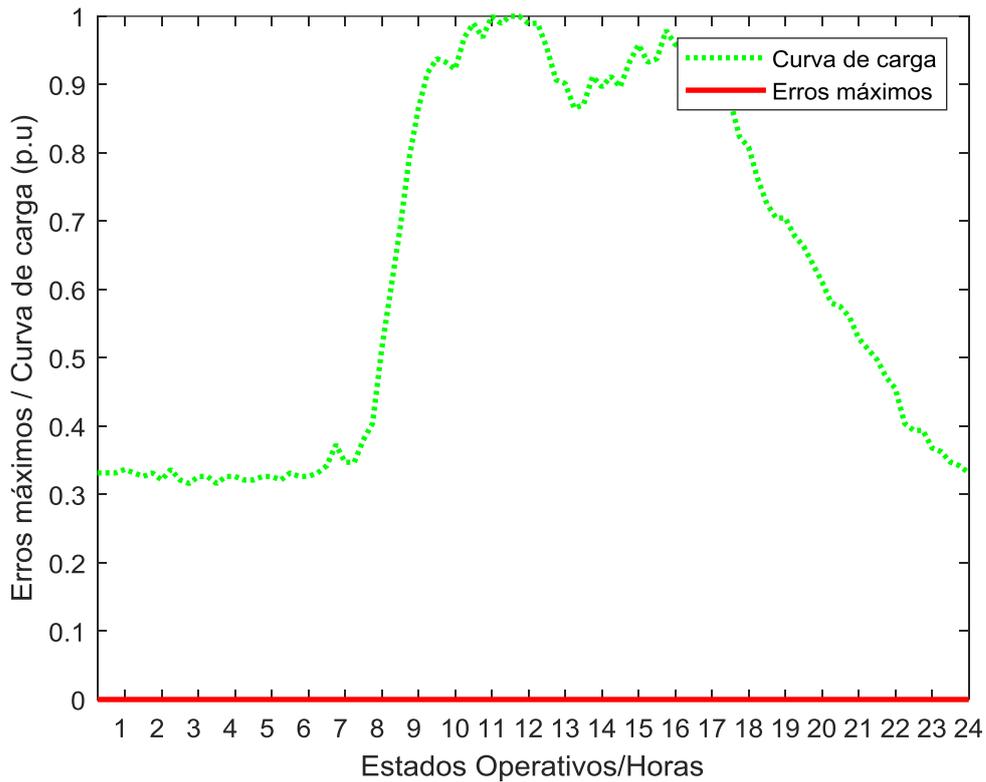


Figura 4.3 – Curva de carga e erros máximos de estimação de estado para os 96 estados operativos estimados em um intervalo de 24 horas, com o sistema sem reguladores de tensão

A curva pontilhada em verde da Figura 4.3 representa a curva de carga utilizada em todas as barras para as 24 horas consideradas em intervalos de 15 minutos, em que cada intervalo de 15 minutos corresponde a um estado operativo. A curva contínua em vermelho, representa os erros máximos em relação à referência, de cada estado operativo estimado.

Observa-se pela linha contínua vermelha da Figura 4.3 que sem a presença de reguladores de tensão no sistema referência utilizado para a geração de dados e sem ruídos gaussianos no conjunto de medidas, obteve-se o erro máximo de cada estado operativo nulo. Para todos os estados operativos considerados nesta etapa, o algoritmo atingiu a tolerância determinada em 3 iterações. Como não há reguladores de tensão no sistema, foi necessário realizar apenas a Etapa 1 do algoritmo de estimação de estado apresentado no Capítulo 3.

4.3.2 Sistema IEEE 34 barras com reguladores de tensão: taps iniciais nominais

Com objetivo de verificar a interferência da estimação dos taps na qualidade dos estados operativos estimados, os resultados que serão apresentados a seguir consideram separadamente a estimação de estado com os taps apenas como parâmetros e, a estimação de estado com os taps como variáveis de estado. Para os casos apresentados nesta subseção, considerou-se as posições iniciais dos taps como sendo seus valores nominais. Neste trabalho, define-se como taps nominais os valores utilizados para inicializar os taps dos estados referência, gerados pelo fluxo de carga.

Tabela 4.1 – Taps nominais dos reguladores de tensão do sistema IEEE 34 barras

	Fase A	Fase B	Fase C
Regulador 1	5	1	1
Regulador 2	10	5	12

Todos os estados referência do sistema IEEE 34 barras foram gerados considerando os taps da Tabela 4.1, para os Transformadores Reguladores 1 (barras 814 e 850) e 2 (barras 852 e 832).

No gráfico da Figura 4.4 apresentam-se os resultados da segunda simulação realizada. A curva pontilhada em verde representa a curva de carga apresentada anteriormente. A curva marcada com “x” em vermelho representa os erros máximos em relação à referência para os 96 estados operativos da curva de carga, considerando os taps apenas como parâmetro do sistema, ou seja, apenas a Etapa 1 do algoritmo apresentado no Capítulo 3. Já a curva contínua em azul representa os erros máximos em relação à referência para os 96 estados operativos da curva de carga, porém com os taps como variáveis de estado. Esta curva considera as três Etapas do algoritmo de estimação de estado.

O erro máximo dos estados estimados para os taps como parâmetros foi de 0,1167 p.u., enquanto o erro máximo considerando os taps como variáveis de estado foi de 0,0074 p.u. Para visualizar melhor, apresenta-se essa diferença no gráfico da Figura 4.5.

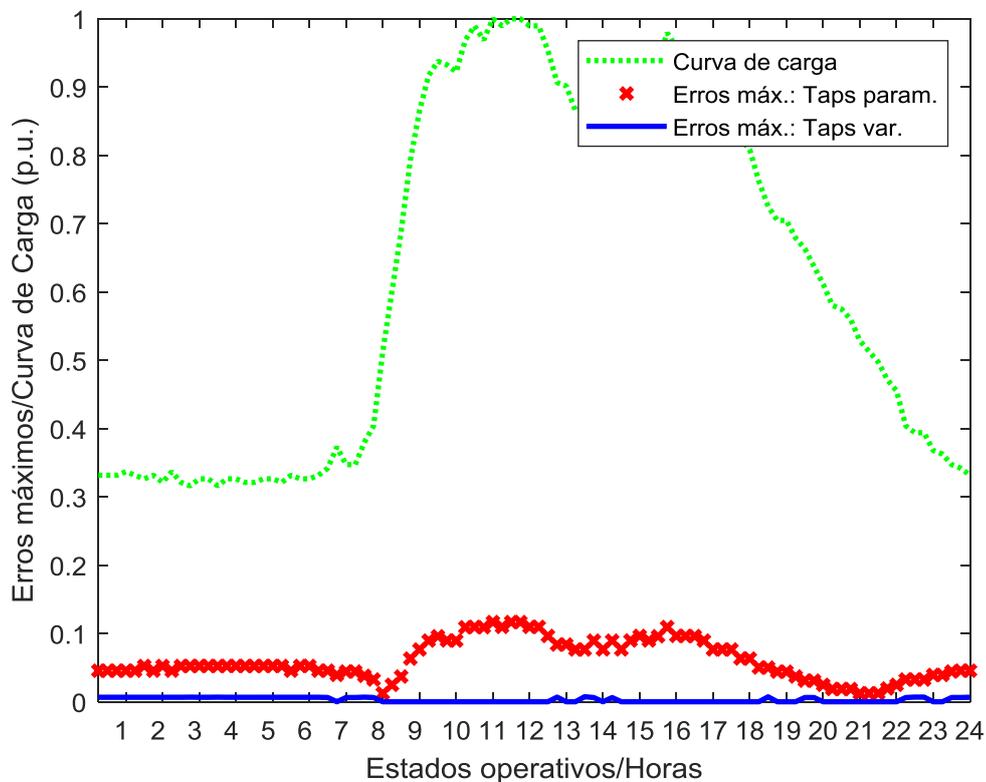


Figura 4.4 – Erros máximos de estimação de estado considerando os taps dos reguladores de tensão como parâmetros e como variáveis de estado para 96 estados operativos em um intervalo de 24 horas

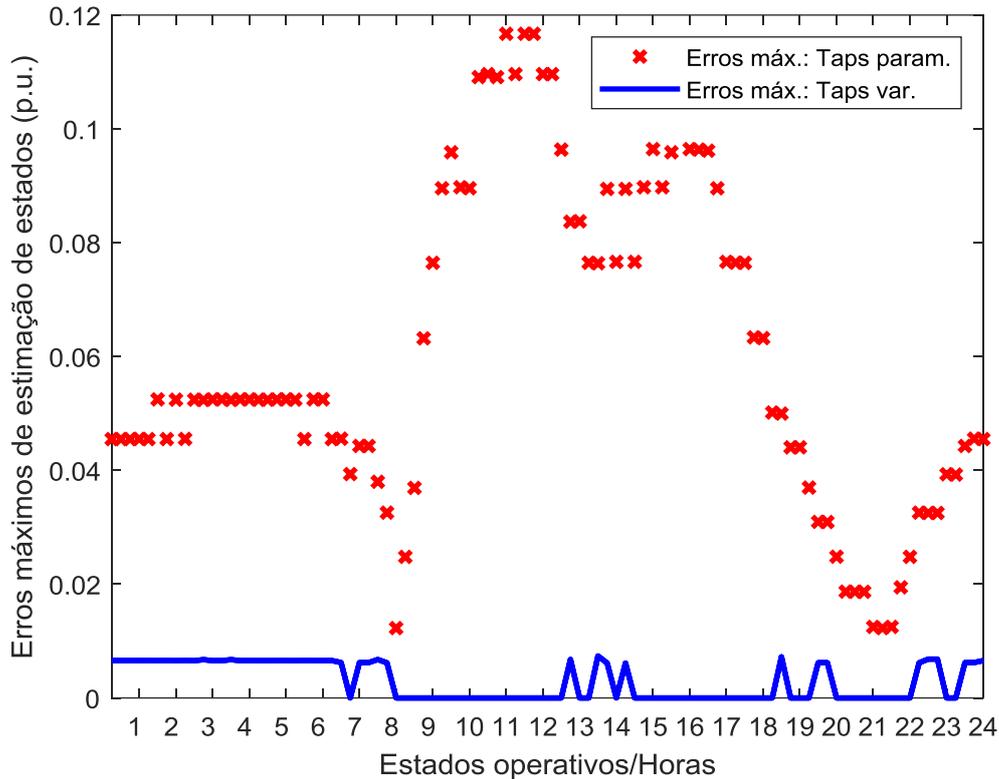


Figura 4.5 – Erros máximos de estimação de estado considerando os taps dos reguladores de tensão como parâmetros e como variáveis de estado para 96 estados operativos em um intervalo de 24 horas

Analisando a curva correspondente aos taps definidos como parâmetros da Figura 4.5, verifica-se que em aproximadamente 8 e 21 horas tem-se os estados operativos estimados com menores erros. Estes erros equivalem a aproximadamente 0,0123 p.u., enquanto os maiores erros, que se dão nos estados operativos estimados em 11 e 12 horas equivalem a quase 0,1200 p.u.

Os estados operativos respectivos a curva vermelha marcada por “x” foram estimados com os taps atribuídos como parâmetros, ou seja, posições fixas durante todo o processo iterativo para os 96 estados operativos considerados. No entanto, em cada estado operativo simulado os taps referências, que são os taps definidos pelo fluxo de carga, possuem valores diferentes. Quanto mais próximo os taps atribuídos estão dos taps referência, menor será o erro e, analogamente, quanto mais distante os taps atribuídos estiverem dos taps referência, maior será o erro.

Na Tabela 4.2 constam os taps atribuídos como parâmetros durante o processo iterativo para o Regulador 1 e para o Regulador 2. Nesta tabela consta também os taps referência para três estados operativos diferentes: 8, 21, 11 e 11:30 horas.

Tabela 4.2 – Taps atribuídos como parâmetros e taps referência para os pontos de maiores e menores erros da curva de erros máximos de estimação

	Regulador 1			Regulador 2			Erros máximos de estimação	
	Horas	Fase			Fase			
		A	B	C	A	B		C
TAPs Atribuídos	1 a 24	5	1	1	10	5	12	
	8	5	1	1	9	6	10	
TAPs referência	21	5	1	1	10	7	11	
	11	16	6	7	16	16	15	
	11:30	16	6	7	16	16	15	

Observa-se na Tabela 4.2 que nos estados operativos em que o erro foi mínimo (8 e 21 horas), os taps referência se aproximam dos taps fixados, atingindo no máximo 2 posições de diferença. Já nos estados operativos em que os erros foram máximos (11 e 11:30 horas), os taps fixados como parâmetro se distanciam significativamente dos taps referência, em até 11 posições. Além disso, em nenhum dos estados operativos encontrados na Figura 4.5, considerando a modelagem dos taps como parâmetros, o erro atingiu o valor zero. Isso acontece porque em nenhum dos estados operativos os taps atribuídos são iguais aos taps referência para os dois reguladores. Esses detalhes podem ser melhor ilustrados através do Apêndice A, em que os erros das Etapas 1 e 2 do algoritmo e os taps estimados são ilustrados.

Na curva da Figura 4.5, que considera os taps como variáveis de estado, observa-se que em alguns pontos o erro máximo calculado foi zero, ou seja, as tensões estimadas são exatamente iguais as tensões referência. E, o ponto de maior erro da curva atingiu o valor de 0,0074 p.u. em um sistema com a tensão nominal entre linhas de 24,9kV. Neste processo iterativo, atribui-se valores iniciais para os taps e, durante o processo estes valores modificam-se até determinar-se um estado operativo que mantém as tensões e taps em valores que condizem com as medidas de entrada do sistema. Destaca-se que o algoritmo com estimação dos taps faz com que os taps estimados se aproximem dos taps referência, atingindo erros menores quando comparados aos erros do algoritmo que considera os taps apenas como parâmetros.

Com isso, verifica-se que quando a modelagem considera os taps como parâmetros, a qualidade do estado estimado depende do quão próximo os taps atribuídos estão dos taps reais. Em contrapartida, na modelagem com os taps como variáveis de estado, os taps estimados conseguem se aproximar dos taps reais resultando em um erro muito pequeno ou inexistente.

4.3.3 Sistema IEEE 34 barras: inicialização não nominal dos taps

Com o intuito de verificar a interferência da inicialização dos taps na aplicação do método, nestes testes a análise anterior é realizada novamente, porém, os taps são inicializados com valores não nominais (zero para todas as posições). Portanto, nas simulações que consideram os taps dos reguladores como parâmetros, seus valores serão zero em todo o

processo de estimação de estado. Já para as simulações que consideram os taps como variáveis de estado, apenas a inicialização dos taps serão com valores iguais a zero.

A Figura 4.6 apresenta as curvas referentes a inicialização dos taps com valores nominais e valores iguais a zero. As curvas marcadas por “x” representam os erros máximos de estimação de cada estado operativo, considerando os taps com valores nominais tanto para a estimação com taps como parâmetros quanto para a inicialização dos taps na estimação destes como variáveis de estado. Já as curvas contínuas representam os taps com valores iguais a zero na sua inicialização e definição como parâmetro.

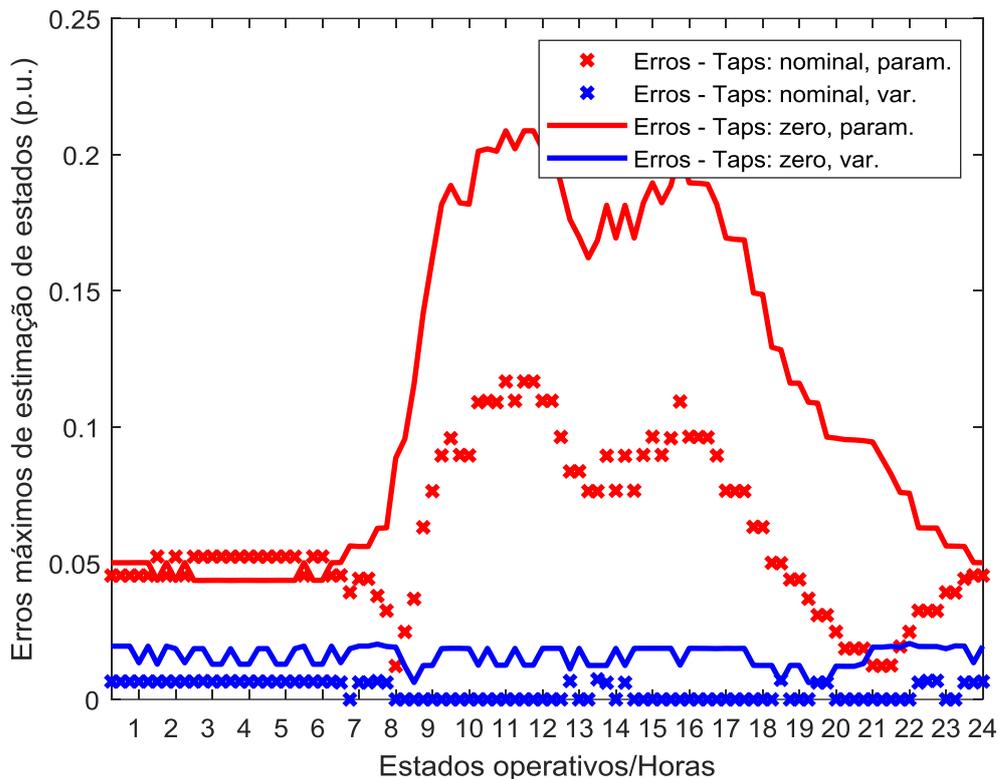


Figura 4.6 - Erros máximos de estimação considerando os taps dos reguladores de tensão: como parâmetros e como variáveis de estado; com os taps iniciais iguais aos seus valores nominais e com os taps iniciais iguais a zero

Comparando as curvas marcadas com “x” com as curvas contínuas da Figura 4.6, observa-se que a maior parte dos estados estimados o valor inicial nominal dos taps apresentou melhores resultados do que o valor inicial dos taps igual a zero, tanto para os taps como parâmetros quanto para os taps como variáveis de estado. Esta é uma característica do método de Newton. A inicialização inadequada dos taps dos reguladores poderá resultar em não convergência ou uma convergência para soluções indesejadas. Apesar disso, em todas as simulações a modelagem com os taps como variáveis de estado apresentou erros muito menores do que na modelagem dos taps apenas com parâmetros, chegando ao máximo de 0,0206 p.u.

Quanto ao número de iterações, nos dois casos simulados (valor inicial nominal e valor inicial igual a zero), a Etapa 1 do algoritmo atingiu a convergência em 2 iterações para todos os estados operativos da curva de carga. Já para a Etapa 2 que corresponde a estimação dos

taps, a simulação com os taps iniciais nominais atingiu a convergência em no máximo 4 iterações para os 96 estados operativos, enquanto na simulação com taps iniciais iguais a zero o algoritmo atingiu a convergência em no máximo 5 iterações. Portanto, verifica-se também que quanto mais distante estiver a consideração inicial dos taps dos reguladores do seu valor real, mais iterações o algoritmo precisará para atingir a convergência, pois estará inicialmente mais distante da resposta a ser atingida.

4.4 Medidas com ruídos e redundância

4.4.1 Qualidade da estimação de estado em função dos tipos de medidas

Com objetivo de verificar a viabilidade da utilização do estimador de estado com a modelagem dos transformadores reguladores, nesta seção considera-se redundância e ruídos gaussianos. As medidas utilizadas são medidas de injeção de corrente, medidas injeção de potência e medida de módulo de tensão. A redundância utilizada foi 2×1 , ou seja, para cada ponto de medição existem duas medições disponíveis, de corrente, potência ou tensão. Atribuiu-se ruídos gaussianos aleatórios em todas as medidas cujos valores estão no intervalo de $\pm 3\sigma$.

A formulação adotada permite medidas complexas de corrente, potência e medidas de módulo de tensão. Cada medida possui características particulares no método adotado. Como mencionado anteriormente, as medidas de corrente possuem uma relação linear entre as equações e as variáveis de estado, resultando em uma matriz Jacobiana constante. Já as medidas de potência devem ser convertidas para medidas de correntes equivalentes, fazendo com que a parcela da matriz Jacobiana referente a essas medidas não seja constante. As medidas de módulo de tensão, são convertidas para medidas complexas de tensões equivalentes utilizando as variáveis de estados, o que garante uma observabilidade artificial. Em cada estimação de estado, o algoritmo adotado procura através do processo iterativo um estado operativo e taps dos reguladores que satisfaçam o conjunto de medidas que lhe foi fornecido. Dessa forma, o tipo de medida de entrada pode interferir na acurácia do algoritmo.

Os pesos atribuídos para as medidas dependem das variâncias dos seus ruídos, e estas definem o grau de precisão de cada medida. Neste trabalho definiu-se que as medidas complexas de corrente são medidas altamente precisas, enquanto as medidas complexas de potência são pouco precisas, consideradas pseudomedidas. Já as medidas de módulo de tensão possuem precisão intermediária entre as medidas de corrente e potência. Essa seção tem como objetivo verificar como o algoritmo se comporta perante os três tipos de medidas com diferentes graus de redundância.

Primeiramente definiu-se o grau de ruído de cada tipo de medida. Considerou-se que as medidas de corrente possuem ruído de $\pm 2\sigma$, enquanto as medidas de potência e tensão possuem ruído de $\pm 3\sigma$.

Os valores das variâncias foram definidos verificando-se a variância limite que as

medidas de potência devem ter a fim de manter a convergência do algoritmo, uma vez que estas são consideradas as medidas menos precisas.

Na Tabela 4.3 apresentam-se diferentes valores para as variâncias e os erros máximos do estado operativo estimado para cada caso:

Tabela 4.3 – Valores para as variâncias das medidas complexas de potência

Medidas complexas de potência					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Variância	1	0,1	0,04	0,03	0,02
Erro máximo estimação	0,0004	0,0074	0,0150	Não convergiu	Não convergiu

O Caso 1 da Tabela 4.3 representa a estimação de estado com variância e peso igual a 1, ou seja, medidas puras e sem erros. Os Casos 2 e 3 representam, respectivamente, as estimacões de estado para as variâncias de 0,1 e 0,04. Em ambos os casos o algoritmo atingiu a convergência, no entanto, observou-se o aumento do erro de estimação com a diminuição da variância. Já nos casos 4 e 5 o algoritmo não atingiu a convergência. Portanto, definiu-se o valor da variância das medidas de potência como sendo 0,04. Com base na variância definida para as medidas de potência, definiu-se o valor de 0,8 para as medidas de corrente e 0,04 para as medidas de módulo de tensão.

Os próximos testes desta subsecção correspondem ao mesmo estado operativo que foi utilizado para definir os valores das variâncias das medidas. Na Tabela 4.4 apresentam-se dados referentes a qualidade da estimação de estado com diferentes conjuntos de medidas de entrada. As informações desta tabela referentes à porcentagem das medidas correspondem as suas localizações no sistema. No Caso 1 por exemplo tem-se que 20% das barras do sistema possuem medidas de corrente, 100% das barras do sistema possuem medidas de potência e 20% das barras do sistema possuem medidas de tensão, como é ilustrado na Figura 4.7.

Tabela 4.4 – Qualidade da estimação de estado em função do conjunto de medidas de entrada

Caso	Porcentagem das medidas			N° de Redund.medidas de entrada	N° de variáveis de estado	Erro máx. (p.u.)	Iterações		
	Corrente	Potência	Tensão				Etapa 1	Etapa 2	
1	20%	100%	20%	40%	211	172	0,0003	5	4
2	100%	0%	0%	0%	178	172	0,0075	2	4
3	0%	100%	0%	0%	172	172	0,0150	5	5
4	0%	0%	100%	0%	86	172	0,0020	2	1
5	0%	100%	20%	20%	193	172	0,0002	5	4
6	100%	100%	0%	100%	344	172	0,0226	5	10
7	100%	0%	100%	100%	258	172	0,0012	11	4
8	0%	100%	100%	100%	258	172	0,0007	6	7

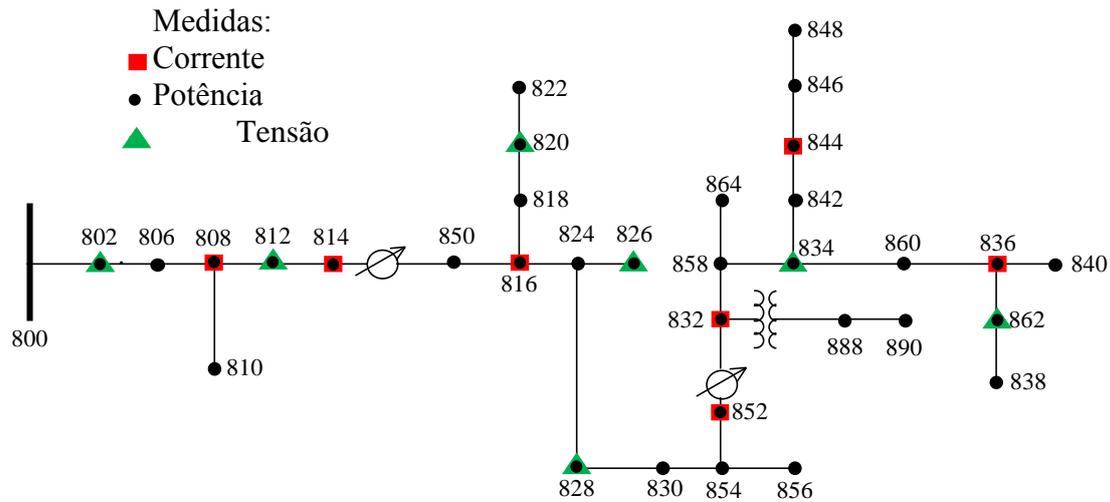


Figura 4.7 – Sistema IEEE 34 barras com 20% das barras com medidas de corrente, 20% das barras com medidas de tensão e 100% das barras com medidas de potência
Fonte: Adaptado de (IEEE, 2017)

Analisando a Tabela 4.4, observa-se que o caso em que se obteve a menor quantidade de iterações foi o Caso 4 em que se considerou apenas medidas de tensão. Observa-se também que a quantidade de medidas de entrada do Caso 4 foi a menor entre todos os casos, já que para cada medida de módulo de tensão tem-se duas medidas equivalentes de tensões complexas, garantindo uma observabilidade artificial. A utilização de medidas de tensão é interessante neste método pois reduz o esforço computacional e o número de iterações, visto que a relação entre as medidas de tensões e as variáveis de estado é linear. Portanto, praticamente toda a matriz Jacobiana para este caso é constante e composta por valores iguais a 1, com exceção dos elementos correspondentes aos transformadores reguladores. Apesar disso, o erro máximo do estado operativo estimado não foi o menor entre todos os casos.

O menor erro entre os 4 casos analisados encontra-se no Caso 5, em que se considera medidas de potência em 100% das barras do sistema e medidas de tensão em 20% das barras, resultando em 20% de redundância. Neste caso obteve-se o menor erro de estimação entre os 8 casos, no entanto, o número de iterações não foi o menor. O número de iterações para o Caso 5 iguala-se ao número de iterações do Caso 1, que também contém medidas de potência em 100% das barras. A relação entre as medidas de potência e as variáveis de estado não é linear, fazendo com que seja necessário atualizar em todas as iterações a parcela da matriz Jacobiana referente a essas medidas. Essa atualização resulta em um esforço computacional maior, além de mais iterações para o algoritmo atingir a convergência, uma vez que existem mais equações que devam ser satisfeitas com as variáveis de estado. No entanto, a utilização de medidas de potência é muito importante em estimação de estado pois, normalmente elas estão disponíveis em maior quantidade em relação aos outros tipos de medidas, dado que elas geralmente são provindas de dados históricos.

Nos Casos 2, 3 e 4, considerou-se apenas um tipo de medida sem redundância. Observa-se que no Caso 4, com apenas medidas de tensão, obteve-se a menor quantidade de iterações e

o menor erro de estimação. Já o Caso 2, em que existem apenas medidas de corrente, obteve-se um resultado intermediário entre os Casos 3 e 4, tanto em relação ao número de iterações quanto ao erro de estimação. O pior dos três casos foi o Caso 3, em que se considerou apenas medidas de potência.

Os Casos 6, 7 e 8 apresentaram o maior número de iterações. Destaca-se que estes casos possuem 100% de redundância, resultando em uma matriz Jacobiana consideravelmente maior do que nos Casos 1 a 5. Entre todos os casos, o Caso 6 obteve o maior erro de estimação e maior quantidade de iterações na Etapa 2 do algoritmo, que corresponde a estimação de estado com estimação dos taps dos reguladores. Nota-se que se considerou 100% de redundância e não se considerou medidas de tensão, o que resulta em uma quantidade maior de medidas de entrada e uma matriz Jacobiana menos simplificada.

O Caso 7 possui medidas de corrente em 100% das barras e medidas de tensão em 100% das barras, resultando em 11 iterações na primeira Etapa do algoritmo e 4 iterações na segunda Etapa do algoritmo. Apesar das 11 iterações na primeira etapa, o erro máximo de estimação para este caso foi significativamente menor do que no Caso 6, em que não se considera medidas de tensão.

Com os testes apresentados nesta subseção verifica-se que o comportamento do algoritmo é superior com medidas de tensão, inferior com medidas de potência e intermediário com medidas de corrente. Notou-se também que o nível de redundância afeta a quantidade de iterações que o algoritmo necessita para atingir a convergência.

4.4.2 Estimação de estado com taps atribuídos como parâmetros e como variáveis de estado no sistema IEEE 34 barras: medidas com ruídos e redundância

Os casos apresentados a seguir são comparados com os resultados obtidos na etapa de validação da formulação, ou seja, sem redundância e ruídos gaussianos. Nestes casos considerou-se a inicialização dos taps com seus valores nominais.

No gráfico da Figura 4.8, apresentam-se quatro curvas de erros máximos de estimação de estado, traçadas para os estados operativos da curva de carga apresentada na seção de validação. As curvas contínuas representam os erros máximos de estimação considerando um conjunto de medidas sem redundância e sem ruídos gaussianos. Já as curvas pontilhadas representam os erros máximos de estimação considerando redundância e erros gaussianos. Da mesma forma que foi realizado na seção de validação, os casos são separados em simulações com os taps como parâmetros e como variáveis de estado.

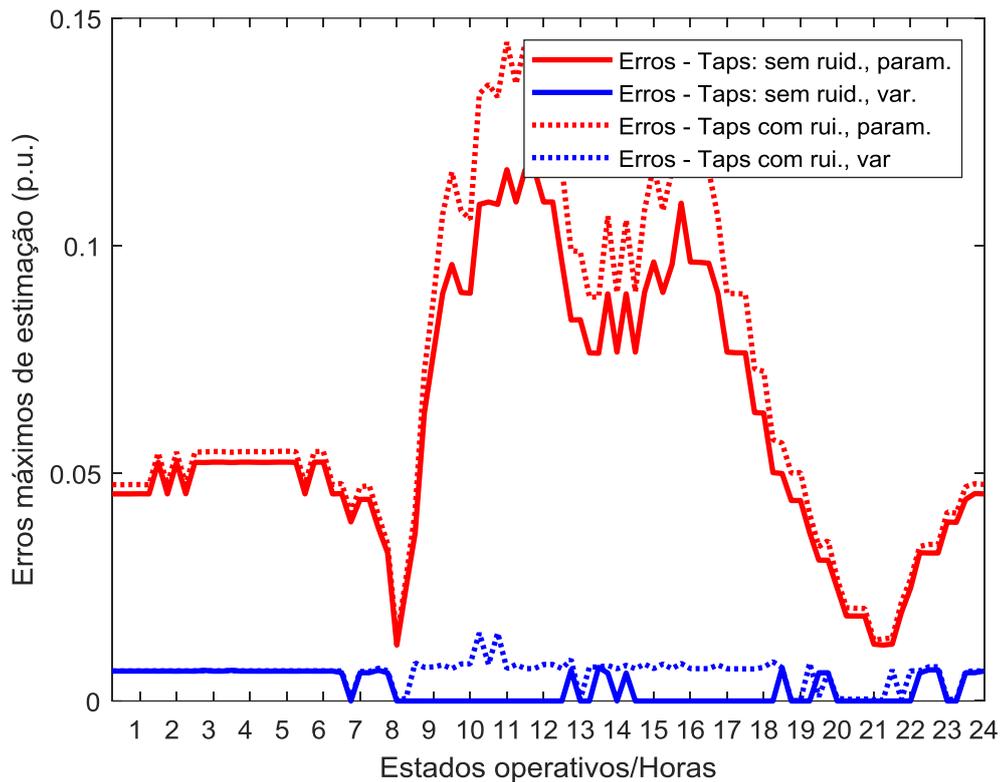


Figura 4.8 – Erros máximos de estimação considerando medidas com erros gaussianos e redundância e sem erros gaussianos e redundância, considerando os taps como parâmetros e como variáveis e estado.

Comparando-se as curvas contínuas com as pontilhadas, verifica-se que a inserção de ruídos gaussianos resultou em maiores erros em relação ao fluxo de carga em quase todas as pontos de operação considerados. Observa-se que o erro das duas curvas correspondentes aos taps como parâmetros seguem padrões parecidos, uma vez que os taps fixados são os mesmos.

Observa-se também que com ruídos gaussianos o erro máximo para os taps como parâmetros ficou próximo de 0,1500 p.u., menor do que o erro máximo dos casos em que considera-se taps iniciais iguais a zero (Figura 4.6). Portanto, mesmo com ruídos gaussianos, a inicialização dos taps é de grande importância na determinação do estado operativo do sistema.

Até as 8:00 horas e após as 19:00 horas as curvas contínuas e pontilhadas para os 4 casos apresentam os mesmos padrões e poucas diferenças nos erros em relação à referência. Esses são os horários em que as cargas do sistema estão mais leves.

Com ruídos gaussianos o número de iterações da Etapa 1 do algoritmo aumentou consideravelmente. Enquanto nos casos anteriores constatou-se no máximo 2 iterações, neste caso o número de iterações da Etapa 1 variou entre 5 e 9. Já na Etapa 2 do algoritmo, o número de iterações variou entre 3 e 5.

Analisando somente as curvas dos os taps como variáveis de estado notou-se que com ruídos gaussianos o erro máximo de estimação aumentou para grande parte dos estados estimados. Apesar disso, o estimador ainda apresentou bons resultados, atingindo erro máximo de 0,0149 p.u. entre 10 e 11 horas.

4.4.3 Estimação de Estado para um único estado operativo do sistema IEEE 123 barras

As simulações a seguir apresentam a aplicação do estimador de estado no sistema IEEE 123 barras ilustrado na Figura 4.2. As medidas foram corrompidas com ruídos gaussianos e redundância de 2×1 .

A primeira simulação realizada com o sistema IEEE 123 barras considera um único estado operativo. A modelagem utilizada para a simulação considera o algoritmo completo apresentado neste trabalho, em que realiza-se a inicialização das variáveis, a estimação de estado e a discretização dos taps dos reguladores.

A Figura 4.9 apresenta as tensões estimadas das barras destacadas em vermelho no sistema da Figura 4.2. Este alimentador possui ramos trifásicos, bifásicos e monofásicos, além de dois reguladores de tensão. As elevações de tensão do gráfico da Figura 4.9 indicam a localização dos reguladores de tensão.

O primeiro regulador de tensão está conectado entre as barras 149 e 1, controlando as tensões das fases A, B e C na barra 1 e, o segundo regulador está localizado entre as barras 25 e 26, controlando a tensão das fases A e C da barra 26.

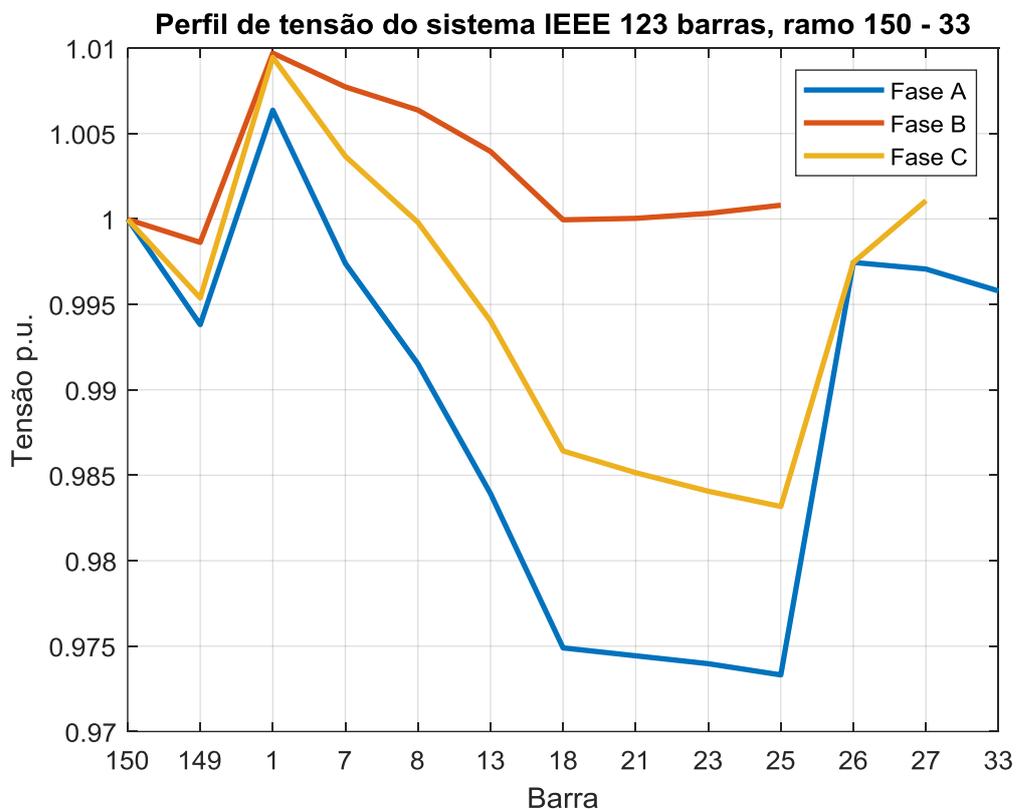


Figura 4.9 - Estimação de estado do sistema IEEE 123 barras: perfil de tensão do ramo 150 – 33

Para este sistema, foram necessárias 3 iterações para o algoritmo atingir a convergência na Etapa 1 que diz respeito a inicialização das variáveis, 5 iterações na Etapa 2 que corresponde

a estimação de estado e 2 iterações para a discretização dos taps dos reguladores, totalizando em 9 iterações. O erro máximo atingido para este estado operativo foi de $1,1248^{-7}$ p.u., mostrando que mesmo em grandes sistemas o método aplicado apresenta bons resultados.

4.4.4 Estimação de estado com taps atribuídos como parâmetros e como variáveis de estado no sistema IEEE 123 barras: medidas com ruídos e redundância

Neste teste a curva de carga da Figura 4.2 foi aplicada ao sistema teste IEEE 123 barras. Gerou-se 96 estados operativos referências em um período de 24 horas. Na Figura 4.10 apresentam-se os erros máximos de cada estado operativo que foi estimado para a curva de carga considerada, com as modelagens utilizando os taps dos reguladores como parâmetros e como variáveis de estado.

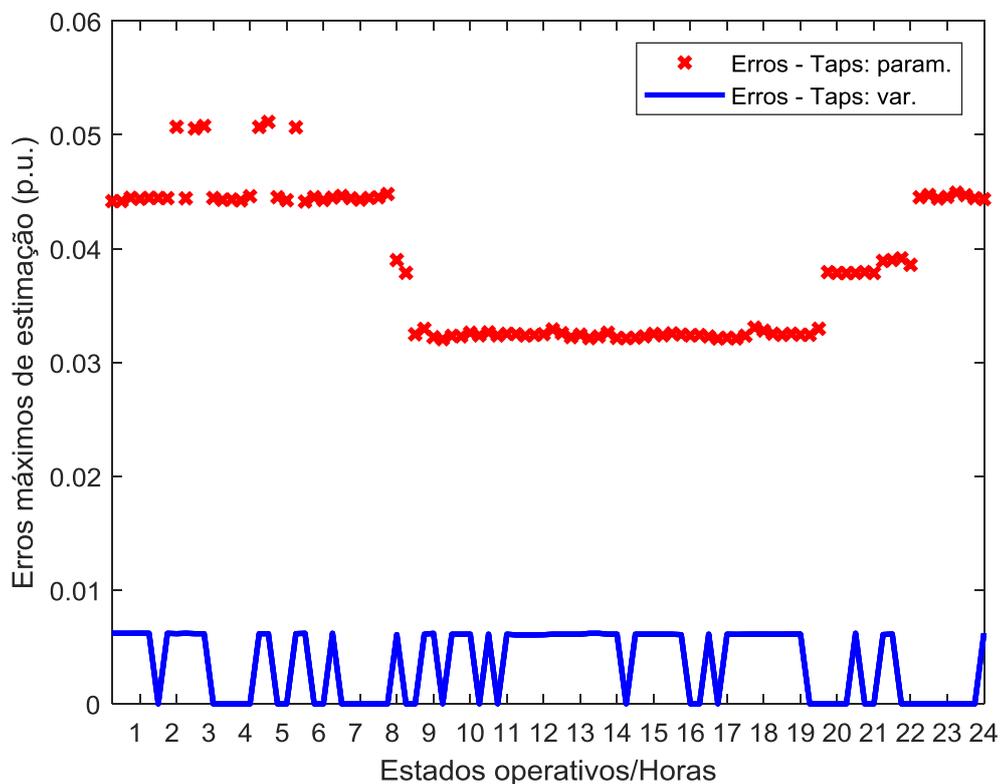


Figura 4.10 – Erros máximos de estimação de estado com as modelagens com os taps como parâmetros e taps como variáveis de estado para o sistema teste IEEE 123 barras

A curva vermelha marcada por “x” representa os erros máximos para a modelagem dos taps como parâmetros, enquanto a curva contínua em azul representa os erros máximos para a modelagem dos taps como variáveis de estado.

Observa-se que o maior valor referente a curva de erros máximos das estimações de estado considerando os taps como parâmetros foi de aproximadamente 0,0500 p.u.. Já o maior valor da curva de erros máximos considerando os taps como variáveis de estado foi de aproximadamente 0,0062 p.u.

Nota-se que a qualidade da estimação de estado é melhor perante o sistema IEEE 123 barras do que com o sistema IEEE 34 barras. Apesar do sistema IEEE 123 barras possuir um número significativamente maior de nós do que o sistema IEEE de 34 barras, este sistema é mais balanceado e caracteriza-se por possuir poucos problemas de convergência (IEEE, 2017).

Na Tabela 4.5 o número de iterações referente as modelagens com os taps como parâmetros e como variáveis de estado do algoritmo de estimação de estado aplicado aos estados operativos do gráfico da Figura 4.10 são apresentados.

Tabela 4.5 – Número de iterações referente as modelagens com os taps como parâmetros e como variáveis de estado do algoritmo de estimação de estado considerando os estados operativos da curva de carga aplicada ao sistema IEEE 123 barras

Estado operativo	Taps: parâm.	Taps: var.	Estado operativo	Taps: parâm.	Taps: var.	Estado operativo	Taps: parâm.	Taps: var.
1	3	4	33	4	4	65	3	4
2	3	4	34	3	4	66	4	4
3	3	4	35	3	4	67	3	4
4	3	4	36	3	4	68	5	4
5	3	4	37	3	4	69	4	4
6	3	4	38	3	4	70	3	4
7	3	4	39	4	4	71	3	4
8	3	4	40	3	4	72	4	4
9	3	4	41	3	4	73	3	4
10	3	4	42	3	4	74	3	4
11	3	4	43	4	4	75	3	4
12	3	4	44	3	4	76	3	4
13	3	4	45	3	4	77	3	4
14	4	4	46	3	4	78	3	4
15	3	4	47	4	4	79	3	4
16	3	4	48	3	4	80	3	4
17	3	4	49	3	4	81	3	4
18	3	4	50	3	4	82	3	4
19	3	4	51	3	4	83	3	4
20	3	4	52	3	4	84	3	4
21	3	4	53	4	4	85	4	4
22	3	4	54	3	4	86	3	4
23	3	4	55	3	4	87	3	4
24	3	4	56	3	4	88	3	4
25	3	4	57	3	4	89	3	4
26	3	4	58	4	4	90	4	4
27	3	4	59	4	4	91	3	4
28	3	4	60	3	4	92	3	4
29	4	4	61	3	4	93	3	4
30	3	4	62	3	4	94	3	4
31	3	4	63	3	4	95	3	4
32	3	4	64	3	4	96	3	4

As iterações do algoritmo com taps como parâmetros da Tabela 4.5 correspondem a Etapa 1 do algoritmo de estimação de estado, enquanto as iterações do algoritmo com os taps com variáveis de estado correspondem a Etapa 2. Observa-se que o estimador apresentou entre 3 e 4 iterações para atingir a convergência na modelagem com os taps como parâmetros, com exceção do estado 68 em que foram necessárias 5 iterações. Já para a Etapa 2 do algoritmo, que corresponde aos taps dos reguladores como variáveis de estado, o algoritmo precisou 4 iterações em todos os estados operativos estimados.

4.4.5 Pesos limites

De acordo com (Monticelli, 1999), a utilização de ponderações elevadas na matriz de pesos W pode ocasionar a não convergência em métodos baseados na teoria de MQP.

A matriz de pesos depende do inverso do quadrado das variâncias, σ_1^{-2} , de cada medida. Para mensurar quais os limites de pesos atribuídos no sistema IEEE 123 barras de forma que a convergência do método esteja garantida, determinou-se diferentes níveis de pesos para o conjunto de medidas de um determinado estado operativo. Na Tabela 4.6 apresenta-se as variâncias e pesos atribuídos para as medidas em quatro casos e seus respectivos erros máximos, calculados a partir da Equação (4.1). Cada caso corresponde a uma estimação de estado com o mesmo peso atribuído para todo o conjunto de medidas, considerando a estimação dos taps dos reguladores e discretização. As medidas são corrompidas com ruídos gaussianos e redundância de 2×1 .

Tabela 4.6 – Erros máximos do estado operativo estimado para diferentes variâncias e pesos das medidas

	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
σ	1	0,1	0,001	0,0001
Peso	1	100	10000	1000000
Erro máximo (p.u.)	0,0005	0,0063	0,0063	$1 \cdot 10^{+6}$

O Caso 1 corresponde as medidas sem peso, ou seja, variância igual a 1. O erro máximo das tensões estimadas para este estado operativo foi de 0,0005 p.u. Nos Casos 2 e 3, em que se atribuiu variâncias de 0,1 e 0,001 respectivamente, o erro máximo das tensões estimadas foram de 0,0063 pu. No Caso 4, em que determinou-se uma variância de 0,0001 p.u. e, o algoritmo não convergiu. Portanto, considera-se interessante atribuir pesos entre 1 e 10000 na matriz de pesos.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho adaptou-se um método de estimação da posição dos taps de reguladores de tensão utilizados para fluxo de carga e estimadores de estado para sistemas de transmissão, para o estimador de estado YBSE. Essa adaptação permitiu o aprimoramento da representação dos componentes da rede em estimação de estado para sistemas de distribuição, contribuindo para a melhoria da qualidade da estimação de estado.

No modelo utilizado, realizou-se o aumento da matriz Jacobiana tradicional, devido ao aumento do vetor de estado com a inclusão das variáveis de estado taps. Esse aumento da matriz Jacobiana permitiu a estimação dos taps dos reguladores de tensão no método YBSE. Para tanto, modelou-se as relações entre as novas variáveis de estado e as medidas de tensão, potência e corrente, visto que essas relações estavam disponíveis apenas para métodos aplicados a problemas de fluxo de carga.

Através dos resultados apresentados observou-se que a inclusão da modelagem dos taps dos reguladores como variáveis de estado faz com que o estimador de estado obtenha resultados mais precisos quando comparados a estimação de estado sem a estimação dos taps dos reguladores. Este resultado é interessante economicamente pois faz com que não seja necessária a utilização de equipamentos de monitoramento remoto da posição dos taps em transformadores reguladores de tensão.

Observou-se que a posição inicial dos taps dos reguladores de tensão interfere na qualidade da estimação de estado. Essa interferência é tão significativa que os erros de estimação foram maiores quando considerou-se os taps iniciais iguais a zero e um conjunto de medidas sem redundância ou ruídos gaussianos, do que nos casos em que se considerou os taps iniciais sendo os nominais e as medidas com redundância e ruídos gaussianos.

Quanto aos conjuntos de medidas adotados, verificou-se que apesar do estimador de estado utilizado ser baseado em equações de corrente, as medidas de módulo de tensão foram as que mais aprimoraram os resultados da estimação, uma vez que as variáveis de estados do método são tensões. Este resultado é interessante pois medidas de módulo de tensão estão disponíveis em maior quantidade em sistemas de distribuição quando comparadas a outros tipos de medidas, uma vez que não é necessário realizar medição fasorial para a sua obtenção.

Medidas de corrente que foram consideradas as mais precisas e medidas de tensão que foram consideradas as menos precisas também apresentaram bons resultados quanto aos erros dos estados operativos estimados. No entanto, observou-se que além do tipo de medida e precisão, a redundância das medidas interfere no estados estimado. Observou-se também que a redundância interfere no número de iterações que o algoritmo necessita para atingir a convergência. Essa interferência se dá devido à grande quantidade de medidas que o estimador precisa processar, fazendo com que aumente o vetor de medidas de entrada e consequentemente, a dimensão da matriz Jacobiana.

Devido ao método YBSE ser baseado na análise nodal clássica, a implementação de medidas de tensão, corrente e potência; transformadores e, transformadores reguladores torna-se simples e eficaz, o que geralmente é um desafio em métodos de estimação de estado do tipo varredura. Além disso, este método é capaz de lidar com medidas de diferentes naturezas como dados de entrada, tornando-se atrativo diante dos diferentes tipos de informações que se tem atualmente. Essas vantagens são importantes em estimadores de estado para sistemas de distribuição, visto que esses sistemas estão se tornando cada vez mais complexos, necessitando de ferramentas robustas capazes de modelar adequadamente os componentes do sistema elétrico, representando o sistema físico da melhor forma possível.

5.1 Trabalhos futuros

Com base no que foi apresentado, lista-se os seguintes trabalhos futuros:

- Modelar medidas de módulo tensão tradicionais e de tensão nos reguladores com métodos de rotação de eixos.
- Adotar técnicas para manter a matriz Jacobiana constante.
- Modelar a estimação de banco de capacitores controlados com estimação dos taps
- Incluir medidas do sistema SCADA e medidas PMUs com atualização de tempos diferentes.

5.2 Publicação

A publicação realizada durante a elaboração deste trabalho está referenciada a seguir:

Zoche, Elis R., Carreno, Edgar M., Asada, Eduardo N. Current Based Three Phase State Estimator for Distribution Systems with Smart Meters Data. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2019, Gramado.

Referências Bibliográficas

- Abur, A. and Expósito, (2004). *Power system state estimation: theory and implementation*, Marcel Dekker Inc, New York.
- Almeida, A. B. De. (2015). *Um Modelo Unificado para Análise de Geração Distribuída em Sistemas de Transmissão e Distribuição*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, São Paulo.
- Alsaç, O., Vempati, N., Stott, B. and Monticelli, A. (1998). Generalized State Estimation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3), 1069–1075.
- Artritt, R. F. and Dugan, R. C. (2011). Distribution system analysis and the future smart grid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(6), 2343–2350.
- Baran, M. E., Jung, J. and Mcdermott, T. E (2009). Including Voltage Measurements in Branch Current State Estimation for Distribution Systems. *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, (2), pp.1–5.
- Baran, M. E. and Kelley, A. W. (1995). A branch-current-based state estimation method for distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1), 483–491.
- Chen, T., Chen, M. and Chebli, E. A. (1991). Tree-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4), 1671–1681.
- Clements, K. A. and Davis, P. W. (1988). Detection and identification of topology errors in electric power systems. *Transaction on Power Systems*, 3(4), 1748–1753.
- Della Giustina, D., Pau, M., Pegoraro, P., Ponci, F. and Sulis, S. (2014). Electrical distribution system state estimation: measurement issues and challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 17(6), 36–42.
- Fletcher, D. L. and Stadlin, W. O. (1983). Transformer TAP position estimation. *Transaction on Power Apparatus and Systems*, (11), 3680–3686.
- Garcia, P. A. N., and Carneiro, S. (2001). Voltage Control Devices Models for Distribution Power Flow Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 586–594.
- Garcia, P. A. N., Pereira, J. L. R., Carneiro S., Costa, V. M., and Martins, N. (2000). Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2), 508–514.
- Hayes, B. and Prodanovic, M. (2014). State Estimation Techniques for Electric Power Distribution Systems. *2014 European Modelling Symposium*, Pisa, Italy, pp. 303–308.
- Heydt, G. T. (2010). The Next Generation of Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(3), 225–235.

- Houari, M., Kocar, I., Therrien, F. and Lacroix, J. S. (2013). Treatment of Transformers and Voltage Regulators in Branch Current State Estimation for Distribution Networks. *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1–5.
- IEEE (2017). IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group. Acesso em: março/2020. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/>
- Lin, W. T. and Lu, C. N. (2016). Performance comparison of distribution system state estimation methods. *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies, Asia*, pp. 1121–1126.
- Lin, Y. and Abur, A. (2017). Robust Transformer Tap Estimation. *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, pp. 1–6.
- Liu, W. -H. E., and Lim, S. -L. (1995). Parameter error identification and estimation in power system state estimation. *Transaction on Power Systems*, 10(1), 200–209.
- Lu, C. N., Teng, J. H and Liu W. -H. E. (1995). Distribution system state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1), 229–240.
- Majdoub, M., Boukherouaa, J., Cheddadi, B., Adbelaziz, B., Sabri, O., and Haidi, T. (2018). A Review on Distribution System State Estimation Techniques. *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Rabat, Morocco, pp. 1–6.
- Monticelli, A. (1983). *Fluxo de Carga em Rede de Energia Elétrica*. Edgard Blücher LTDA, São Paulo
- Monticelli, A. (1999). *State Estimation in Electric Power Systems. A Generalized Approach*. Springer Science+Business Media New, New York.
- Monticelli, A., and Wu, F. F. (1985). Network observability: theory. *Transaction on Power Apparatus and Systems*, (5), 1042–1048.
- Mukherjee, B. K., Hanson, S. O., Fuerst, G. R. and Monroe, C. A. (1984). Transformer TAP Position Estimation - Field Experience. *Transaction on Power Apparatus and Systems*, (6), 1454–1458.
- Muscas, C., Pau, M., Pegoraro, P. A., Sulis, S., Ponci, F. and Monti A. (2015). Multiarea Distribution System State Estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(5), 1–9.
- Nanchian, S., Majumdar, A. and Pal, B. C. (2017). Ordinal Optimization Technique for Three-Phase Distribution Network State Estimation Including Discrete Variables, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(4), 1528–1535.
- Noopura, S. P., Amit, J., and Jayan, V. M. (2015). Fast Decoupled State Estimation based on Current Equations. *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies, Asia*, pp. 3–6.
- Noopura, S. P., and Jayan, V. M. (2017). A Hybrid State Estimator using Current based Estimator and PMU. *Energy Procedia*, 117, 1117–1124.
- Popa, M. (2011). Data Collecting from Smart Meters in an Advanced Metering Infrastructure,

2011 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Poprad, Slovakia, pp. 137–142.

- Raggi, L. (2018). *Aplicações de estimação de estados em sistemas de distribuição de energia elétrica com medidores inteligentes*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.
- Schweppe, F. C., and Wildes, J. (1970). Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. *Transaction on Power Apparatus and Systems*, (1), 120–125.
- Shiroie, M., and Hosseini, S. H. (2008). Observability and Estimation of Transformer Tap Setting with Minimal PMU Placement. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA, pp. 1–4.
- IBM Corporation and Software Group (2012). *Managing big data for smart grids and smart meters*, Somers, USA.
- Teixeira, P. A., Brammer, S. R., Rutz, W. L., Merritt, W. C., and Salmonsén, J. L. (1991). State Estimation of Voltage and Phase-Shift Transformer TAP Settings. In *Conference Papers 1991 Power Industry Computer Application Conference*, Baltimore, USA, pp. 416–422
- Teng, J.-H. (2002). Using voltage measurements to improve the results of branch-current-based state estimators for distribution systems. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 149(6), 667–672.
- Zarco, P., and Expósito, A. G. (1999). *Estimación de estados y de parámetros en redes eléctricas*, Copyright, Ed., 1st ed., Sevilla.

Apêndice A

Erros máximos de estimação de estados e taps estimados para os estados operativos da curva de carga com o sistema IEEE 34 barras

		Taps Estimados						Taps referência					
Regulador		1			2			1			2		
Erros para taps atribuídos como parâmetros (p.u.)	Erros para taps atribuídos como variáveis de estados (p.u.)	Fase											
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0524	0,0065	1	-1	-1	6	6	7	1	-1	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0524	0,0065	1	-1	-1	6	6	7	1	-1	0	6	6	6
0,0524	0,0067	1	-1	-1	6	6	6	1	-1	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0524	0,0067	1	-1	-1	6	6	6	1	-1	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0524	0,0065	1	-1	-1	6	6	7	1	-1	0	6	6	6
0,0524	0,0065	1	-1	-1	6	6	7	1	-1	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0524	0,0065	1	-1	-1	6	6	7	1	-1	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0525	0,0066	1	0	-1	6	6	7	1	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0456	0,0062	2	0	0	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0393	0,0000	2	0	0	7	6	7	2	0	0	7	6	7
0,0443	0,0062	2	0	0	7	6	7	2	0	0	7	6	6
0,0443	0,0062	2	0	0	7	6	7	2	0	0	7	6	6

0,0380	0,0068	2	0	0	7	6	7	3	0	0	7	6	7
0,0326	0,0062	3	0	1	7	6	7	3	0	1	7	7	7
0,0123	0,0000	5	1	1	9	6	10	5	1	1	9	6	10
0,0248	0,0000	5	1	1	10	9	12	5	1	1	10	9	12
0,0369	0,0000	7	1	2	11	11	11	7	1	2	11	11	11
0,0632	0,0000	9	3	4	13	13	12	9	3	4	13	13	12
0,0765	0,0000	11	4	5	14	14	13	11	4	5	14	14	13
0,0896	0,0000	13	5	6	15	15	14	13	5	6	15	15	14
0,0959	0,0000	14	5	6	15	15	14	14	5	6	15	15	14
0,0897	0,0000	13	5	6	15	15	14	13	5	6	15	15	14
0,0896	0,0000	13	5	6	15	15	14	13	5	6	15	15	14
0,1091	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,1096	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,1091	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,1167	0,0000	16	6	7	16	16	15	16	6	7	16	16	15
0,1096	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,1167	0,0000	16	6	7	16	16	15	16	6	7	16	16	15
0,1167	0,0000	16	6	7	16	16	15	16	6	7	16	16	15
0,1096	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,1096	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,0964	0,0000	14	5	6	15	15	15	14	5	6	15	15	15
0,0837	0,0068	12	5	5	15	14	14	13	5	5	14	14	14
0,0838	0,0000	12	5	5	14	14	14	12	5	5	14	14	14
0,0765	0,0000	11	4	5	14	14	13	11	4	5	14	14	13
0,0764	0,0074	11	4	5	14	14	13	12	4	5	14	14	13
0,0894	0,0061	13	5	6	15	14	14	13	5	6	15	15	14
0,0766	0,0000	12	4	5	14	14	14	12	4	5	14	14	14
0,0894	0,0061	13	5	6	15	14	14	13	5	6	15	15	14
0,0766	0,0000	12	4	5	14	14	14	12	4	5	14	14	14
0,0897	0,0000	13	5	6	15	15	14	13	5	6	15	15	14
0,0964	0,0000	14	5	6	15	15	15	14	5	6	15	15	15
0,0897	0,0000	13	5	6	15	15	14	13	5	6	15	15	14
0,0959	0,0000	14	5	6	15	15	14	14	5	6	15	15	14
0,1094	0,0000	15	6	7	16	16	15	15	6	7	16	16	15
0,0964	0,0000	14	5	6	15	15	15	14	5	6	15	15	15
0,0964	0,0000	14	5	6	15	15	15	14	5	6	15	15	15
0,0962	0,0000	14	5	6	15	15	15	14	5	6	15	15	15
0,0896	0,0000	13	5	6	15	15	14	13	5	6	15	15	14
0,0766	0,0000	12	4	5	14	14	14	12	4	5	14	14	14
0,0765	0,0000	12	4	5	14	14	14	12	4	5	14	14	14
0,0765	0,0000	12	4	5	14	14	13	12	4	5	14	14	13
0,0634	0,0000	10	3	4	13	13	13	10	3	4	13	13	13
0,0632	0,0000	10	3	4	13	13	12	10	3	4	13	13	12
0,0502	0,0000	8	2	3	12	12	12	8	2	3	12	12	12
0,0500	0,0072	7	2	3	12	11	11	8	2	3	12	12	11

0,0440	0,0000	7	2	2	11	11	11	7	2	2	11	11	11
0,0440	0,0000	7	2	2	11	11	11	7	2	2	11	11	11
0,0370	0,0000	6	1	2	11	11	11	6	1	2	11	11	11
0,0309	0,0062	6	1	2	11	11	11	6	1	2	11	10	11
0,0309	0,0062	5	1	1	10	10	12	5	1	1	10	10	11
0,0248	0,0000	5	1	1	10	9	12	5	1	1	10	9	12
0,0187	0,0000	5	1	1	10	8	12	5	1	1	10	8	12
0,0187	0,0000	5	1	1	10	8	12	5	1	1	10	8	12
0,0187	0,0000	5	1	1	10	8	11	5	1	1	10	8	11
0,0125	0,0000	5	1	1	10	7	11	5	1	1	10	7	11
0,0123	0,0000	5	1	1	9	6	10	5	1	1	9	6	10
0,0125	0,0000	5	1	1	8	6	10	5	1	1	8	6	10
0,0194	0,0000	4	1	1	8	5	9	4	1	1	8	5	9
0,0248	0,0000	4	1	1	8	5	8	4	1	1	8	5	8
0,0326	0,0062	3	0	1	7	6	7	3	0	1	7	7	7
0,0325	0,0068	3	0	0	7	6	7	3	0	1	7	6	7
0,0325	0,0068	3	0	0	7	6	7	3	0	1	7	6	7
0,0393	0,0000	2	0	0	7	6	7	2	0	0	7	6	7
0,0392	0,0000	2	0	0	7	6	7	2	0	0	7	6	7
0,0443	0,0062	2	0	0	7	6	7	2	0	0	7	6	6
0,0456	0,0062	2	0	0	7	6	7	2	0	0	6	6	6
0,0455	0,0066	1	0	-1	7	6	7	2	0	0	6	6	6