

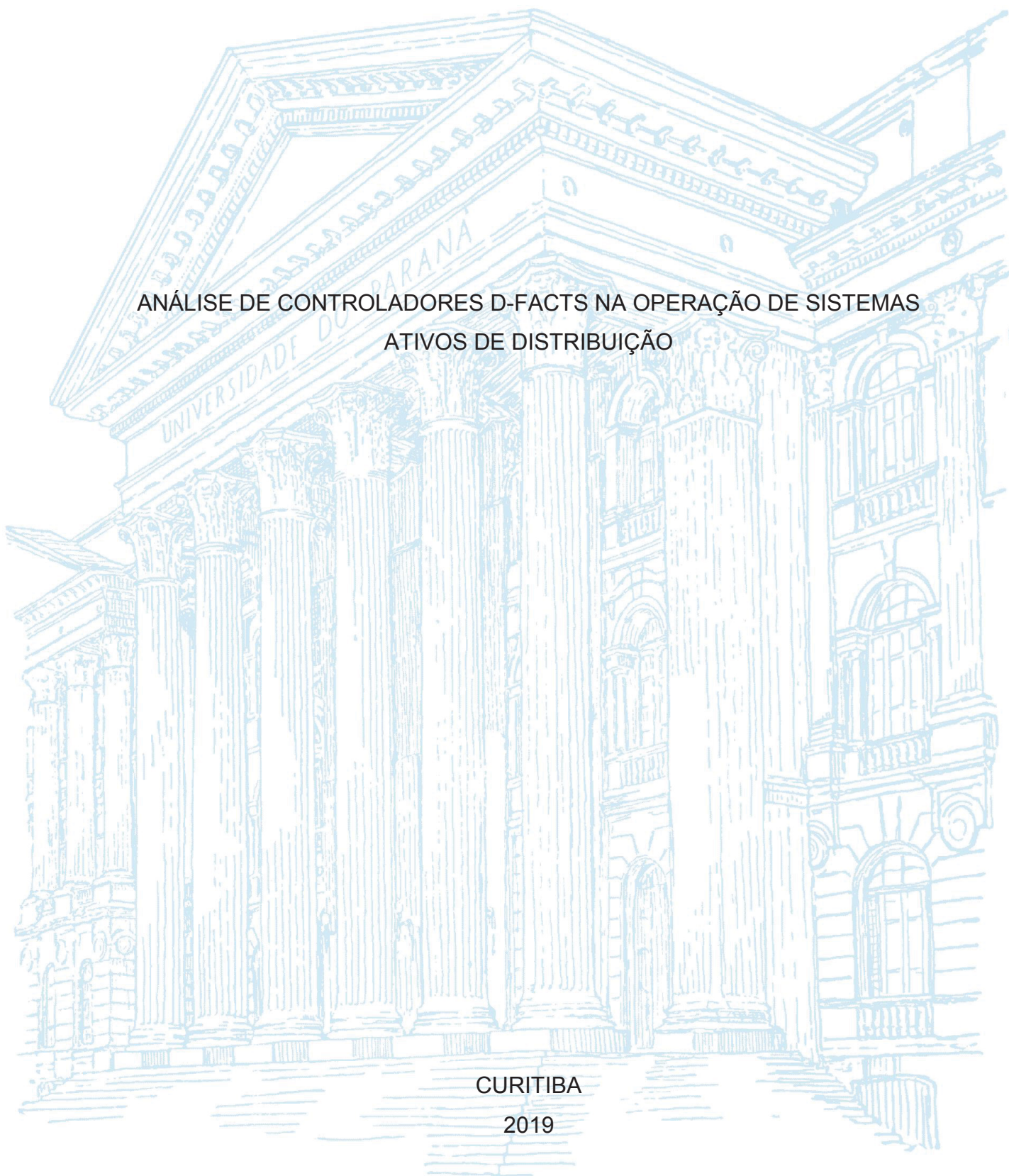
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PATRÍCIA MONTEIRO BARBOSA DE FREITAS

ANÁLISE DE CONTROLADORES D-FACTS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS
ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO

CURITIBA

2019



PATRÍCIA MONTEIRO BARBOSA DE FREITAS

ANÁLISE DE CONTROLADORES D-FACTS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS
ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas Elétricos de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- F866a Freitas, Patrícia Monteiro Barbosa de
Análise de controladores D-FACTS na operação de sistemas ativos de distribuição [recurso eletrônico] / Patrícia Monteiro Barbosa de Freitas – Curitiba, 2019.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli
1. Sistema de Distribuição – Energia Elétrica. 2. Método Desacoplado Rápido. I. Universidade Federal do Paraná. II. Tortelli, Odilon Luis. III. Título.

CDD: 621.381044

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **PATRICIA MOTEIRO BARBOSA DE FREITAS** intitulada: **ANÁLISE DE CONTROLADORES D-FACTS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. ODILON LUIS TORTELLI, que após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 09 de Agosto de 2019.

ODILON LUIS TORTELLI

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

ROMAN KUIAVA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

NASTASHA SALAME DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico esta dissertação ao meu esposo Ataré, meus pais Manuel e Maria de Fátima, as minhas irmãs Maria Aparecida e Juliana, e a minha sobrinha Maria Eduarda, pois me fizeram compreender a importância da família na longa jornada da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Odilon Luís Tortelli, pela paciência, confiança e apoio em todos os momentos. Agradeço pela paciência nos momentos de dificuldade e por sempre ter me motivado a continuar em frente.

Ao meu esposo Ataré por fazer eu sempre perceber minha força e capacidade, durante meus momentos de cansaço e fragilidade.

Aos meus pais que sempre me mostraram o caminho correto e a persistência para chegar ao objetivo almejado.

Aos meus familiares e amigos pela torcida durante todo o mestrado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo conhecimento repassado e pela contribuição dada a este trabalho.

Aos meus colegas e amigos da pós-graduação que me ajudaram direta ou indiretamente durante o mestrado.

Aos meus colegas do LACTEC que em diversas situações me ajudaram com ideias e conversas de corredor durante esse processo.

Ao LACTEC - pelo auxílio financeiro.

***“Em qualquer tempo em que eu
temer, confiarei em ti”. (Salmos 56:3)***

RESUMO

Este trabalho propõe a análise dos benefícios de dispositivos D-FACTS em regime permanente, bem como adaptar as ferramentas de análise de fluxo de potência Desacoplado Rápido para a inclusão desses dispositivos e, a partir disso, testar e avaliar o desempenho da nova metodologia considerando diferentes condições topológicas e operativas de redes de distribuição. Para tanto, neste trabalho, apresenta-se inicialmente a formulação convencional do fluxo de potência para redes de distribuição, assim como a sua solução pelo método desacoplado rápido. Para que o método desacoplado rápido possa ser utilizado em redes de distribuição é utilizada a técnica de normalização por unidade complexa, que emprega uma base de potência com valor complexo, sendo capaz de ajustar artificialmente a relação entre resistência (R) e reatância (X) das linhas do sistema de distribuição. Assim, o método desacoplado rápido para solução do fluxo de potência pode ser aplicado em sistemas de distribuição com baixas relações X/R . É apresentada a formulação e as características dos controladores FACTS e D-FACTS, com ênfase nos controladores *shunt*, com foco no controle de tensão. , cujos modelos são incluídos e adaptados à metodologia de cálculo de fluxo de potência desacoplado rápido. Os resultados obtidos com simulações realizadas com dois sistemas de distribuição atestam o bom desempenho computacional da metodologia proposta, que permite avaliar a ação dos controladores na melhoria do perfil de tensão da rede de distribuição operando com diferentes arranjos topológicos, incluindo elevada participação de geração distribuída.

Palavras-chave: D-FACTS. FACTS. Normalização Complexa. Método Desacoplado Rápido. Sistema de Distribuição.

ABSTRACT

This master thesis analyze the benefits of D-FACTS devices in steady state, as well as to adapt the fast decoupled power flow analysis tools to include these devices and, from this, to test and evaluate the performance of the new methodology considering different topological and operative conditions of distribution networks. Therefore, in this work, it is initially presented the conventional power flow formulation for distribution networks, as well as its solution by the fast decoupled method. For the fast decoupled method to be used in distribution networks, the complex unit normalization technique, which employs a complex value power base, is applied once it artificially adjust the relationship between resistance (R) and reactance (X). of the distribution system lines. Thus, the fast decoupled method for power flow solution can be used in distribution systems with high R / X ratios. The formulation and characteristics of the FACTS and D-FACTS controllers are presented, with emphasis on shunt controllers, focusing on voltage control, whose models are included and adapted to the fast decoupled power flow calculation methodology. The results obtained with simulations performed with two distribution systems attest to the good computational performance of the proposed methodology, which allows to evaluate the action of the controllers in the improvement of the voltage profile of the distribution network operating with different topological arrangements, including high participation of distributed generation.

Keywords: D-FACTS. FACTS. cpu Normalization. Fast Decoupled Power Flow. Distribution Systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REDE RADIAL	19
FIGURA 2– FLUXOGRAMA MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO	39
FIGURA 3 – EFEITO DA NORMALIZAÇÃO COMPLEXA	42
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO FLUXO DE POTENCIA COM <i>cpu</i>	44
FIGURA 5 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM SISTEMA DE ENERGIA	47
FIGURA 6 – ESTRUTURA BÁSICA DOS CONTROLADORES FACTS 1ª GERAÇÃO	48
FIGURA 7 – ESTRUTURA TÍPICA E REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE	50
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE DO SVC	52
FIGURA 9 – CIRCUITO EQUIVALENTE VISTO DA BARRA REGULADA.....	52
FIGURA 10 – INTERAÇÃO ENTRE O SVC E O SISTEMA DE POTÊNCIA.....	53
FIGURA 11 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM STATCOM.....	55
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA RELAÇÃO DO STATCOM COM O SISTEMA ELÉTRICO E DIAGRAMA FASORIAL DAS TENSÕES	56
FIGURA 13 –DIAGRAMAS FASORIAIS DAS RELAÇÕES ENTRE O SISTEMA ELÉTRICO E O STATCOM.....	57
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DA MATRIZ JACOBIANA COM A INCLUSÃO DE CONTROLADORES.....	59
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DO SVC	60
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO SVC SUSCEPTÊNCIA PURA	61
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO SVC COM <i>cpu</i>	62
FIGURA 18 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO STATCOM EM REGIME PERMANENTE	65
FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO.....	71
FIGURA 20 – SISTEMA-TESTE 69 BARRAS RADIAL	74
FIGURA 21 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA RADIAL	76
FIGURA 22 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA MALHADO	77
FIGURA 23 – SISTEMA-TESTE 139 BARRAS RADIAL	82
FIGURA 24 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA RADIAL	83
FIGURA 25 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA MALHADO	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1– TENSÕES NAS BARRAS COM CONTROLADORES (BARRA 25-SVC / BARRA 60-STATCOM).....	77
TABELA 2 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NAS BARRAS 25 E 60 SISTEMA 69 BARRAS	78
TABELA 3 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM STATCOM NAS BARRAS 25 E 60 SISTEMA 69 BARRAS.....	79
TABELA 4 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 25 E STATCOM NA BARRA 60 SISTEMA 69 BARRAS.....	79
TABELA 5 COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 60 E STATCOM NA BARRA 25 SISTEMA 69 BARRAS.....	80
TABELA 6 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR).....	80
TABELA 7 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR).....	80
TABELA 8 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR).....	80
TABELA 9 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR)	81
TABELA 10 – TENSÕES NAS BARRAS COM CONTROLADORES.....	84
TABELA 11 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NAS BARRAS 84 E 109 SISTEMA 136 BARRAS	85
TABELA 12 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM STATCOM NAS BARRAS 84 E 109 SISTEMA 136 BARRAS.....	85
TABELA 13 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 84 E STATCOM NA BARRA 109 SISTEMA 136 BARRAS.....	86
TABELA 14 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 109 E STATCOM NA BARRA 84 SISTEMA 136 BARRAS.....	86
TABELA 15 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR).....	87
TABELA 16 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR).....	87

TABELA 17 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR).....	87
TABELA 18 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR)	87
TABELA 19 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS RADIAL	96
TABELA 20 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS MALHADO	98
TABELA 21 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS RADIAL	100
TABELA 22 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS MALHADO	103
TABELA 23 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS	107
TABELA 24 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS	109
TABELA 25 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS	111
TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS	114

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

APF	- <i>Active Power Filter</i>
CA	- <i>Current Alternating</i>
cpu	- Normalização Complexa por Unidade
D-FACTS	- <i>Distributed Flexible AC Transmission Systems</i>
DSI	- <i>Distributed Series Impedance</i>
DSR	- <i>Distributed Series Reactor</i>
DSSC	- <i>Distributed Static Series Compensator</i>
D-STATCOM	- <i>Distribution Static Synchronous Compensator</i>
D-SVC	- <i>Distribution Static VAR Compensator</i>
D-UPFC	- <i>Distributed Unified Power Flow Controller</i>
DVC	- <i>Direct Voltage Control</i>
DVR	- <i>Dynamic Voltage Restorer</i>
FACTS	- <i>Flexible AC Transmission Systems</i>
GD	- Geração Distribuída
GTO	- <i>Gate Turn-Off thyristor</i>
HVDC	- Conversores de Corrente Contínua em Alta Tensão
IDVR	- <i>Interline Dynamic Voltage Restorer</i>
IEEE	- Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IGBT	- <i>Insulated Gate Bipolar Transistor Gate</i>
IGCT	- <i>Integrated Gate-Commutated Thyristor</i>
IVC	- <i>Indirect Voltage Control</i>
MTO	- <i>MOS Turn-Off Thyristor</i>
NRDR	- Newton-Raphson Desacoplado Rápido
pu	- Normalização Convencional por Unidade
PV	- <i>Photovoltaic</i>
PWM-STATCOM	- <i>Pulse Width Modulation STATCOM</i>
SCRs	- <i>Silicon Controlled Rectifiers</i>
SI	- <i>Smart Inverter</i>
SSSC	- <i>Static Synchronous Series Compensator</i>
STATCOM	- <i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	- <i>Static Var Compensator</i>
TCPS	- <i>Thyristor Controlled Phase Shifters</i>

TCPST	- <i>Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer</i>
TCSC	- <i>Thyristor-Controlled Series Capacitor</i>
TCVR	- <i>Thyristor-Controlled Voltage Regulator</i>
UPFC	- <i>Unified Power Flow Controller</i>
VSC	- <i>Voltage-Sourced Converter</i>
WECS	- <i>Wind Energy Conversion Systems</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

R – resistência em (Ω)

X – reatância em (Ω)

k – varia de N_b (número de barras da rede) até 2

\dot{S}_k^{esp} – injeção de potência complexa especificada da barra k

\dot{V}_k – tensão complexa da barra k

A_k – conjunto das barras alimentadas pela barra k

\dot{V}_1^{calc} – tensão calculada

\dot{V}_1^{esp} – tensão especificada

ε – tolerância do processo iterativo

V_i^{k-1} – tensão no nó calculada durante a iteração $k - 1$

S_i – injeção de potência especificada na barra i

Y_i – soma de todos os elementos shunt da barra i

$L(J_L)$ – corrente do ramo

I_{L2}^k – injeção de corrente no nó L_2

Z_L – impedância série do ramo L

S_i^k – injeção de potência para o nó na iteração k

$\Delta P_i^k, \Delta Q_i^k$ – desvios de potência ativa e reativa, respectivamente

j_1, j_2 – correspondem ao dois nós resultantes do ponto de quebra no nó j

$I_{j_1}^k, I_{j_2}^k$ – injeções de corrente em cada um destes nós

\hat{J}_j^k – corrente do ponto de quebra

P_k^{eq}, Q_k^{eq} – potência equivalente ativa e reativa, respectivamente

k – número da barra, variando de 1 a NB

P_k, Q_k – cargas ativa e reativa da própria barra k , respectivamente

P_b, Q_b – cargas ativa e reativa alimentadas pela barra b , respectivamente

$P_l^{perdas}, Q_l^{perdas}$ – perdas ativa e reativa das linhas alimentadas pela barra k , respectivamente

B_k – conjunto das barras alimentadas pela barra k

D_k – conjunto das barras alimentadas pela barra k

r_{km}, x_{km} – resistência e a reatância da linha entre as barras k e m , respectivamente

V_c – magnitude da tensão de saída do compensador

V_{ac} – magnitude da tensão de saída do sistema
 δ – diferença angular entre essas duas tensões
 V_k – magnitude da tensão nodal da barra k
 θ_k – ângulo da tensão nodal da barra k
 P_k – geração líquida (geração menos carga) de potência ativa da barra k
 Q_k – geração líquida de potência reativa da barra k
 $k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras do sistema
 PQ – barras de carga que representam as subestações
 PV – barras de geração
 $V\theta$ – barra de referência, de folga, slack
 Ω_k – conjunto das barras vizinhas à barra k
 V_k, V_m – magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k - m$
 θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$
 P_{km} – fluxo de potência ativa no ramo $k - m$
 Q_{km} – fluxo de potência reativa no ramo $k - m$
 Q_k^{sh} – injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra k
 K – conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a mesma
 G_{km}, B_{km} – coeficientes da matriz de admitâncias
 NPQ, NPV – número de barras PQ e barras PV , respectivamente
 x – vetor das variáveis de estado
 θ – vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV tendo dimensão $NPQ + NPV$
 V – vetor dos módulos das tensões das barras PQ , tendo dimensão NPQ
 $g(x)$ – função vetorial da variável x
 ΔP – vetor dos desvios (*mismatches*, erros, resíduos) de potência ativa
 ΔQ – vetor dos desvios (*mismatches*, erros, resíduos) de potência reativa
 P^{esp} – vetor das injeções de potência ativa especificados nas barras PQ e PV
 Q^{esp} – vetor das injeções de potência reativa especificados nas barras PQ
 P – vetor das injeções de potência ativa
 Q – vetor das injeções de potência reativa
 $J(x)$ – matriz Jacobiana
 H, N, M e L – submatrizes da matriz Jacobiana, dadas por $\partial P_k / \partial \theta_m, \partial P_k / \partial V_m,$
 $\partial Q_k / \partial \theta_m$ e $\partial Q_k / \partial V_m$, respectivamente
 v, p, q – contadores de iterações

$\varepsilon_p, \varepsilon_q$ – critério de convergência para o problema $P\theta$ e QV , respectivamente

\mathbf{B}' e \mathbf{B}'' – submatrizes Jacobianas associadas ao método desacoplado rápido

\dot{S}_{base} – potência de base complexa

V_{base} – tensão de base

φ_{base} – ângulo base para a potência de base complexa

\dot{Z}_{base} – impedância complexa de base

\dot{Z}_{pu} – impedância de um ramo em base convencional (sistema por unidade – pu)

\dot{Z}_{cpu} – impedância de um ramo em base complexa (cpu)

$R_\Omega, X_\Omega, \dot{Z}_\Omega$ – resistência, a reatância e impedância em ohms, respectivamente

R_{cpu}, X_{cpu} – resistência e reatância em base complexa (cpu)

G_{cpu}, B_{cpu} – condutância e susceptância em cpu

\dot{S}_{cpu} – injeção de potência complexa em cpu

P_{cpu} – injeção de potência ativa em cpu

Q_{cpu} – injeção de potência reativa em cpu

P_{pu} – injeção de potência ativa em pu

Q_{pu} – injeção de potência reativa em pu

® – marca registrada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTO	16
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.3 OBJETIVOS	26
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2 FLUXO DE POTÊNCIA	29
2.1 O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA	29
2.2 A FORMULAÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA	30
2.2.1 Subsistema 1	32
2.2.2 Subsistema 2	33
2.3 MÉTODO DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA NEWTON-RAPHSON	33
2.3.1 Método de Newton-Raphson	33
2.3.2 Método desacoplado	35
2.3.3 Método desacoplado-rápido	36
2.3.4 Normalização complexa aplicada aos Métodos desacoplado-rápido	40
2.3.4.1 Normalização complexa por unidade (cpu)	40
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	44
3 CONTROLADORES FACTS	46
3.1 INTRODUÇÃO	46
3.2 PRIMEIRA GERAÇÃO DE CONTROLADORES FACTS	47
3.3 SEGUNDA GERAÇÃO DE CONTROLADORES FACTS	49
3.4 CONTROLADORES D-FACTS	51
3.4.1 D-SVC - Static VAR Compensator	51
3.4.2 D-Static Compensator - STATCOM	54
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	57
4 FLUXO DE POTÊNCIA INCLUINDO CONTROLADORES FACTS	59
4.1 INTRODUÇÃO	59
4.2 MODELAGEM DO CONTROLADOR D-FACT SVC	59
4.3 MODELAGEM DO CONTROLADOR D-STATCOM	65
4.4 METODOLOGIA PROPOSTA	70
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	72
5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	73

5.1 INTRODUÇÃO	73
5.2 SISTEMA TESTE DE 69 BARRAS	74
5.3 SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
6.1 CONCLUSÕES	89
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS.....	91
APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES SISTEMA 136 BARRAS.....	100
ANEXO 1 – DADOS DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS.....	107
ANEXO 2 – DADOS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O controle e operação de redes elétricas de distribuição visa a manutenção da continuidade e qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores durante a maior parte do tempo possível. O aumento contínuo da demanda de energia e a inclusão crescente de geração distribuída (GD) impõem desafios cada vez maiores para sua operação.

Segundo ANEEL (2016), uma quantidade de pequenos geradores espalhados pelo sistema de distribuição aumenta a complexidade na operação da rede em relação ao seu controle e gerenciamento.

Nesse sentido, a busca por uma maior flexibilidade do sistema de potência é necessária, pois ele tem se tornado cada vez mais dinâmico e com menor margem operacional. O conceito de flexibilização diz respeito a rápida e contínua alteração dos : níveis de tensão, impedâncias de transferências e ângulo de transmissão que controlam a dinâmica de funcionamento do sistema para que o mesmo se adapte rapidamente a novas circunstâncias e volte a operar da melhor forma possível (TORTELLI, 2010) . Segundo MASUDA (2006), as soluções para a flexibilização da operação dos sistema de potência podem ser agrupadas em soluções tradicionais e soluções computacionais ou tecnológicas.

Devido a inserção de GD, o controle do fluxo de potência e do perfil de tensão, tornaram mais complexos, sendo portanto necessário equipamentos de controle para evitar flutuação de tensão e sobrecarga do sistema (KEANE *et al.*, 2011).

Os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), que são conversores estáticos desenvolvidos a partir dos avanços da eletrônica de potência, se enquadram dentre as soluções tecnológicas que permitem ampliar a ação de controle sobre as redes elétricas. Para Tortelli (2010), a utilização destes dispositivos visa o uso eficiente da rede elétrica e o aproveitamento de novas fontes de energia.

Estes dispositivos eletrônicos de controle, inicialmente empregados em sistemas de transmissão, passaram a ser mais recentemente considerados nos

sistemas de distribuição, sendo chamados de D-FACTS (*Distributed Flexible AC Transmission System*). Segundo Kakkar e Agarwal (2010), existe uma grande variedade de dispositivos flexíveis aplicáveis às redes de distribuição, dentre eles: *Distribution Static Synchronous Compensator* (D-STATCOM), *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), *Interline Dynamic Voltage Restorer* (IDVR), *Distributed Unified Power Flow Controller* (D-UPFC), *Distributed Series Impedance* (DSI), *Distributed Series Reactor* (DSR), *Distributed Static Series Compensator* (DSSC) e *Active Power Filter* (APF).

Os dispositivos D-FACTS são utilizados para melhorar o desempenho do sistema, podendo para isso controlar grandezas do sistema, tais como, a magnitude da tensão, o ângulo de tensão, as injeções de potência no barramento, os fluxos de potência e as perdas da linha (ROGERS; OVERBYE, 2008).

Exemplos da aplicação dos controladores no sistema de distribuição podem ser vistos no artigo de Alhejji, Salem e Mossad (2018), onde um SVC foi utilizado no sistema de distribuição do Egito para aumentar a capacidade de carga do sistema, mantendo os níveis de tensão dentro dos admissíveis, minimizando também as perdas de potência e reduzindo o custo de geração de energia.

No artigo de Ramadan, Ebeed e Kamel (2019) foi reportada a instalação do D-STATCOM em uma rede de distribuição em Menoufia – Egito, que conta com a presença de geração distribuída, mais especificamente a fotovoltaica. As análises realizadas levaram em consideração diferentes níveis de penetração fotovoltaica e a localização ideal para o controlador, visando diminuir as perdas de potência, minimizar os desvios de tensão e melhorar a estabilidade de tensão.

O trabalho de Aslam *et al.* (2019) tratou da instalação de um SVC numa subestação de energia elétrica do Paquistão. A inserção do controlador melhorou o perfil de tensão e o fator de potência, portanto diminuindo as perdas do sistema.

Como outro exemplo de aplicações, têm-se os controladores SVC e STATCOM instalados em um sistema de transmissão do Chile, que tinham por objetivo: regular e controlar a tensão de rede de 220 kV em condições normais e de contingência; fornecer energia reativa após contingências do sistema (curto-circuito, desconexões de linha e gerador) e; proporcionar o aumento da capacidade de transferência de energia do sistema (ASEA BROWN BOVERI-ABB,2011).

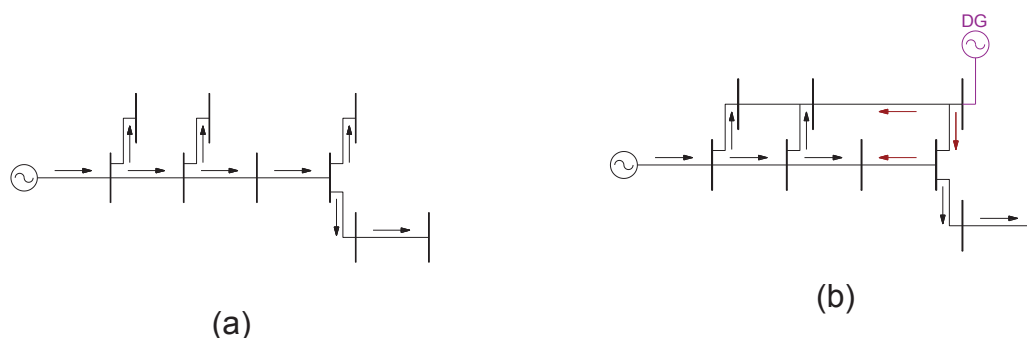
Uma aplicação nacional do SVC foi a instalação deste equipamento na subestação Extremoz, no estado do Rio Grande do Norte, pertencente a uma empresa de geração e transmissão de energia elétrica, utilizado para expandir o sistema de transmissão. Essa expansão foi necessária para facilitar a integração da energia renovável de diversos geradores eólicos localizados na região. O SVC Extremoz foi projetado para: executar o controle de tensão em regime permanente e durante contingências; fornecer energia reativa dinâmica e de resposta rápida após contingências do sistema, melhorando a estabilidade da rede elétrica (ASEA BROWN BOVERI-ABB,2013).

Para se definir o local adequado para a instalação de um desses controladores é necessário uma rigorosa análise do sistema de distribuição. Nesse sentido a solução do fluxo de potência que fornece as magnitudes de tensão e suas defasagens angulares em todas as barras do sistema, permite avaliar o estado atual e futuro da operação da rede elétrica

Porém, com o advento e crescente participação da geração distribuída (GD), e apoiada nas tecnologias associadas ao conceito de Smart Grids, a estrutura da rede de distribuição tende a se modificar, evoluindo para topologias em anel e mesmo arranjos mais malhados, sujeita, conseqüentemente, a fluxos de potência bidirecionais, flutuação do perfil de tensão e sobrecarga do sistema elétrico (MARINOPOULOS; ALEXIADIS; DOKOPOULOS, 2011). Assim, com a inserção de geração distribuída, os sistemas de distribuição passaram da condição de redes passivas para redes de energia elétrica potencialmente ativas.

Estas mudanças no setor elétrico atingem diretamente as metodologias para a solução do fluxo de potência, pois elas foram desenvolvidas considerando sistemas de distribuição radiais passivos e, portanto, sujeitos a fluxos de potência unidirecionais. Como afirma Shirmohammadi *et al.* (1988), a solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição tradicionais seguem as metodologias que derivam dos métodos tradicionais que se baseiam em métodos de varredura. Na FIGURA 1, pode ser observado na situação a o sentido do fluxo de potência em uma rede de distribuição tradicional. Já na situação b pode ser observado o comportamento da rede frente à presença de geração distribuída.

FIGURA 1 – REDE RADIAL



FONTE: A autora (2019).

Assim, no presente caso, em que as redes de distribuição passam a assumir características antes só presentes no sistema de transmissão, o uso de metodologias tradicionais de cálculo do fluxo de potência baseados na topologia radial tendem a ficar limitadas. Porém, as características relativas à baixa tensão e à baixa relação X/R , típicas nas redes de distribuição, permanecem, e, dessa forma, a aplicação direta dos métodos clássicos de fluxo de potência como os métodos desacoplados utilizados para estudos de sistemas de transmissão podem implicar em problemas numéricos. Assim, é necessário o desenvolvimento de metodologias de cálculo do fluxo de potência que levem em consideração a evolução dos sistemas de distribuição e suas particularidades para apoiar a operação e o planejamento desse setor nesse novo caso (DURCE, 2012).

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A evolução que ocorreu na indústria, devido aos avanços na eletrônica de potência, permitiu o desenvolvimento de dispositivos semicondutores para aplicações de alta tensão e corrente. Isto possibilitou uma transformação fundamental para os equipamentos industriais e para as redes de transmissão das concessionárias. Esses avanços foram empregados em conversores de corrente contínua em alta tensão (*High Voltage Direct Current* - HVDC), static VAR compensadores, fontes de alimentação ininterruptas para proteger equipamentos sensíveis e no acionamento de motores com velocidade ajustável.

No artigo de Hingorani (1988) é introduzida pela primeira vez a sigla FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), que defini uma série de equipamentos que utilizam eletrônica de potência e que permitiria obter um sistema mais confiável, flexível e eficaz. Ainda, segundo o autor esses equipamentos possibilitariam a integração de fontes renováveis de energia, solar e eólica, com maior facilidade com o sistema de transmissão de energia.

Hingorani (1995), apresenta o termo *Custom Power* para definir os dispositivos FACTS quando utilizados no sistema de distribuição. Esses dispositivos seriam aplicáveis para manter a confiabilidade e qualidade do fluxo de potência nas redes de distribuição. Para outros autores, esses dispositivos são identificados pela sigla D-FACTS (*Distribution Flexible Alternating Current Transmission Systems*).

Para Zhang *et al.* (2005), o aumento da demanda de energia elétrica por parte da sociedade que gera a sobrecarga ao sistema elétrico, atrelado a inserção de geração distribuída, em particular a eólica, conectada à rede gera incertezas no fluxo de potência. Uma solução possível para estes problemas seria a construção de novas linhas de transmissão. Porém, devido a questões financeiras, ambientais e sociais que impedem sua construção em certas localidades, outras soluções técnicas são necessárias para resolver estes problemas. Uma alternativa seria utilizar os dispositivos FACTS, por apresentam um baixo impacto ambiental e serem uma solução comprovada para aumentar rapidamente a confiabilidade e melhorar a capacidade de transmissão a longo prazo, com boa relação custo-benefício. Ainda, explica que os dispositivos shunt são utilizados para fazer o controle de tensão e potência reativa, e os dispositivos em série seriam mais indicados para o controle de potência. Apontou que a geração distribuída, principalmente geração eólica devido a sua intermitência, adicionaria desafios à operação e controle da rede de energia, e que os controladores FACTS, SVC e STATCOM, podem ser aplicados para controlar a tensão dos geradores eólicos. O controlador STATCOM, que tem a capacidade de regular a tensão de forma suave e rápida, e ainda fornecer suporte de potência reativa, encontraria ampla aplicação.

Para Kechroud *et al.* (2007), se uma parcela significativa de GD estiver conectada ao sistema de distribuição, resultará em um fluxo de potência invertido, das cargas para a subestação. Desta forma, as soluções convencionais para resolver problemas da rede de distribuição, como os transformadores de comutação

para controlar a tensão ao longo dos alimentadores, não seriam mais viáveis, pois a rede de distribuição passaria de uma rede passiva para uma rede ativa. Ressaltam ainda que, com a inserção da geração distribuída (GD) no sistema de distribuição, pode ser observado um aumento da tensão na barra em que mesma está conectada, e não uma queda de tensão. Portanto, novos conceitos de controle e dispositivos eletrônicos de potência serão necessários. A ideia seria introduzir os dispositivos FACTS no sistema de distribuição, que o autor denomina de FACDS (*Flexible AC Distribution System*).

No artigo de Rogers *et al.* (2008), foi analisado o impacto da inserção de dispositivos D-FACTS considerando as sensibilidades das grandezas do sistema de potência: magnitude de tensão, ângulo de tensão, injeções de potência na barra, fluxo de potência na linha e perdas de potência ativa com respeito a impedância da linha. O método utilizado foi a otimização, cuja função objetivo era minimizar as perdas do sistema, para tanto deveria ser determinado o local ótimo para o dispositivo D-FACT. O sistema teste adotado era de 38 barras, o código foi implementado em Matlab e informações do sistema exportadas para o simulador *PowerWorld*.

Já no trabalho de Sheykholeslami *et al.* (2008), é apresentado um novo procedimento para o cálculo do fluxo de potência de Newton-Raphson com a inserção do controlador de fluxo dinâmico (*Dynamic Flow Controller - DFC*), um novo controlador FACTS. Além disso foi proposta a extensão e modificação do método de fluxo de potência para incluir o controlador. O impacto da inclusão do dispositivo no fluxo de potência é resolvido adicionando novas entradas e modificando algumas das equações linearizadas da matriz jacobiana do sistema original.

Em Venkateswararao e Agarwal (2010), um modelo genérico de controlador D-FACT é implementado. Tendo como objetivo principal o desenvolvimento de uma formulação baseada em fluxo de linha (*Line Flow Based - LFB*) das equações de balanço de potência para analisar um sistema de distribuição radial, que também incorporasse eficientemente os dispositivos FACTS série ou shunt. Ainda foi utilizada a Busca em Largura (*Breadth-First-Search - BFS*), para que a matriz de incidência das barras do sistema de distribuição radial se tornasse uma matriz diagonal superior, desta forma reduzindo o esforço computacional.

No artigo de Sayed e Takeshita (2011), o controlador *Unified Power Flow Controller* (UPFC) foi utilizado para minimizar as perdas na linha e fazer o controle de tensão em um sistema de distribuição simultaneamente. Para verificar a eficiência do método proposto foi desenvolvido um modelo em laboratório.

No trabalho de Ghahremani e Kamwa (2012), foi implementado um processo de otimização, baseado em algoritmo genético, visando a localização ótima dos dispositivos FACTS e também de seus parâmetros, para que fosse maximizada a potência transmitida pela rede. Foram modelados controladores série, shunt e série-shunt. Os sistemas de 9 e 30 barras foram utilizados para validar a proposta. Já no artigo de Rogers e Overbye (2012), a otimização implementada procura minimizar as diferenças entre as potências reais e as desejadas para o sistema de distribuição. O impacto da instalação de dispositivos D-FACTS é examinado através do estudo das sensibilidades das grandezas do sistema, como magnitude de tensão, ângulo de tensão, injeções de potência nas barras, perdas reais de energia com relação à impedância de linha. Os autores testaram o método em dois sistemas de 4 e 48 barras.

Em Deepmala e Kumar (2014), o dispositivo D-STATCOM foi modelado para realizar a controle de tensão mantido em 1 pu, em um sistema de distribuição radial de 33 barras. O método para o cálculo de fluxo de potência adotado foi o *back-forward sweep*. A local ideal para a inserção do dispositivo de controle foi embasado na redução de perdas do sistema.

Para Jaiswal e Shrivastava (2014), o dispositivo UPFC pode ser usado para melhorar o perfil de tensão, aumentar a estabilidade transitória e o amortecimento de oscilações do sistema em baixa frequência. Neste artigo o método de fluxo de potência adotado de Newton Raphson foi implementado em Matlab. O algoritmo proposto poderia ser simulado com e sem a inserção do controlador, o sistema de distribuição radial teste foi o de 33 barras do IEEE.

No artigo de Gitibin e Hoseinzadeh (2015), foi ressaltado que devido à baixa relação X/R das redes de distribuição e sua configuração radial o método de fluxo de carga convencional de Newton-Raphson, o método desacoplamento rápido e suas versões modificadas são inadequados para resolver problemas de fluxo de potência, podendo, em muitos casos, não ter convergência. Portanto, o método utilizado foi *backward/forward sweep*. Foi considerada a inserção de geração distribuída (eólica)

no sistema de distribuição. Os controladores shunt D-SVC e D-STATCOM foram utilizados para melhorar o perfil de tensão do sistema. Os autores concluíram que ambos os dispositivos apresentam o mesmo desempenho no sistema.

Para Lakkireddy *et al.* (2015), uma das principais causas de queda de tensão é a disponibilidade insuficiente de potência reativa no sistema. Este tipo de problema pode ser resolvido com a inserção de dispositivos FACTS. Foram utilizados os controladores *Static VAR Compensator* (SVC), o *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) e o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), para melhorar o perfil de tensão do sistema. O sistema teste foi o New England IEEE de 39 barras, o mesmo foi modelado no MATLAB. Em seguida, o fluxo de potência foi executado usando o PSAT (*Power System Analysis Toolbox*).

No trabalho de Jain, Gupta e Kumar (2015), foi apresentado um método para melhorar o perfil de tensão e a redução de perdas no sistema, o controlador utilizado foi o D-STATCOM. Inicialmente, a estabilidade de tensão de todas as barras são examinadas pelo cálculo dos valores do índice de estabilidade. A barra que é mais instável é selecionada como barra candidata. O D-STATCOM é modelado para que tensão na barra em que será inserido seja de 1 pu. Finalmente, o fluxo de carga é realizado através da implementação dos valores de compensação para cargas com potência constante (CP), corrente constante (CI) e impedância constante (CZ). Os resultados foram obtidos para um sistema de distribuição de 33 barras da IEEE, o método para o cálculo de fluxo de potência adotado foi o *forward sweep*, implementado em MATLAB.

O trabalho de Gupta, Jain e Kumar (2015) utiliza o método de *Power Loss Index* (PLI) para a inserção do D-STATCOM em um sistema de distribuição radial, visando reduzir as perdas e melhorar o perfil de tensão. A modelagem matemática do D-STATCOM é realizada para a sua inserção para o cálculo de fluxo de potência. O fluxo de potência *forward sweep* foi utilizado para determinar os parâmetros do sistema. Com os valores de potência em cada barra é determinado o local ideal para inserir o D-STATCOM. O algoritmo proposto é testado nos sistemas de distribuição radial de 10, 33 e 69 barras IEEE usando o *software* MATLAB.

No artigo de Sanam e Ganguly (2016), é apresentada uma nova estratégia de modelagem e alocação do D-STATCOM em um sistema de distribuição radial da IEEE de 69 barras. A modelagem matemática do D-STATCOM foi realizada e

incorporada ao algoritmo de fluxo de potência *forward-backward sweep*. O objetivo da inserção do controlador era reduzir significativamente as perdas de potência e melhorar o perfil de tensão do sistema teste.

Para Burana *et al.* (2017), afirmam que a geração distribuída (GD) e os D-FACTS são usados para aumentar a eficiência e melhorar a geração de energia. Entretanto, a instalação da GD com D-FACTS em uma localização inapropriada pode gerar impactos negativos. O artigo propõe uma ferramenta de planejamento para determinar a local ótimo e o tamanho da GD com D-FACTS para reduzir as perdas de potência, o carregamento da linha e melhorar o perfil de tensão. A geração distribuída utilizada é um gerador síncrono e o controlador adotado é o SVC. A técnica de otimização utilizada foi o algoritmo genético (AG) implementado no software MATLAB. Para a avaliação das soluções de fluxo de carga e funções objetivos em cada geração de AG é determinada usando o script *DIGSILENT Programming Language* (DPL) no software *DIGSILENT*.

O artigo de Tiwari e Ghatak (2017), ressaltou que ocorreria um aumento no uso dos controladores FACTS, tais como, D-STATCOM, D-SVC dentre outros e da geração distribuída (GD) nas redes de distribuição. Afirmaram, também que a GD afeta a tensão do sistema, causa perdas no fluxo de potência e perda de estabilidade. Para analisar essas mudanças foi considerada uma rede de distribuição radial de 33 barras da IEEE. Para identificar as barras fracas foi adotado o *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) que serve para identificar a instabilidade de tensão do sistema. O desempenho da rede foi avaliado pelo posicionamento ideal da GD e do D-STATCOM na área fraca. Posteriormente, foi feita uma análise do perfil de tensão e da diminuição das perdas.

No trabalho de Abou El-Ela, Mouwafi e Shammah (2018), o método proposto visa determinar o local ideal para o D-STATCOM, com o objetivo de reduzir o total de perdas de potência e melhorar o perfil de tensão. O algoritmo JAYA foi utilizado para a determinar o posicionamento ideal do D-STATCOM. O método de fluxo de potência aplicado foi *backward/forward sweep* (BFS). Dois sistemas de distribuição foram utilizados para verificar a eficiência do método, sendo um de 33 e outro de 69 barras. Os autores afirmam que o algoritmo de otimização JAYA é poderoso e rápido para determinar a solução ideal.

Selim, Kamel e Jurado (2018) adotaram a técnica de otimização híbrida analítica e metaheurística para encontrar os locais e tamanhos adequados para a geração distribuída (GD) e o D-STATCOM em redes de distribuição radial, procurando minimizar as perdas totais do sistema. Os testes foram realizados em um sistema de 12 e 69 barras da IEEE e implementados em MATLAB.

No artigo de Youssef, Kamel e M. Aly (2018), foi utilizada a técnica de otimização chamada de *Teaching-Learning-Based Optimization* (TLBO) para determinar a localização ideal, tamanho e tipo de dispositivo de compensação em derivação para o sistema de distribuição. Os dispositivos de compensação analisados foram: capacitor, SVC e STATCOM. Além disso, foi adotada a análise de sensibilidade de perda (*Loss Sensitivity Indice - LSI*), onde a sensibilidade é calculada com base nas perdas de potência ativa e reativa em cada linha em relação à variável de controle dos dispositivos de compensação do sistema de distribuição. O método foi testado nos sistemas de 14 e 30 barras do IEEE.

Os autores Saleem e Majeed (2019) abordam a questão da inserção da geração distribuída nos sistemas de distribuição. Enfatizam que a maioria dos geradores são assíncronos, necessitando de potência reativa para funcionar, o que pode causar queda de tensão, desta forma afetando a qualidade da energia. O controlador D-STATCOM foi escolhido para suprir a potência reativa exigida pela geração distribuída. Esse problema pode ser superado usando técnicas de gerenciamento de energia reativa.

No trabalho de Saafin, Zaro e Jawadeh (2019), o controlador D-STATCOM é utilizado para melhorar o perfil de tensão no ponto de acoplamento comum do sistema de distribuição. A estratégia de controle D-STATCOM, baseada nos ganhos de um controlador proporcional e integral, utilizando a técnica de otimização *Hybrid Particle Swarm Optimization and Artificial Neural Networks* (PSO-ANNs). A metodologia foi testada em um sistema de distribuição radial que foi modelado no Simulink/Matlab.

Para Aslam *et al.* (2019), o problema mais comum no sistema de distribuição altamente carregada são as quedas de tensão, devido às variações de carga exigida do sistema. Portanto, dispositivos que permitem diminuir a perda de energia e a queda de tensão na rede elétrica são necessários. Os autores desenvolveram uma metodologia para definir a melhor localização e tamanho do D-SVC, para isso

identificaram seu impacto no sistema teste utilizando vários casos com diversos valores de tensão especificada. Neste artigo, a análise do fluxo de potência é feita para encontrar os parâmetros do sistema, de modo que a quantidade de queda de tensão no sistema tenha sido encontrada. Para determinar o fluxo de potência da subestação de 132 /11 kV e as simulações foi utilizado o software *Electrical Transients Analyzer Program* (ETAP).

Finalmente, no artigo de Khan; Kassas (2019), é destacado que os geradores de indução de velocidade fixa são amplamente utilizados instalações de parques eólicos. Sua operação é acompanhada por variações da velocidade do vento, transientes e variações bruscas de potência. Os dispositivos STATCOM e SVC foram utilizados para melhorar a estabilidade transitória de um parque eólico baseado em turbinas eólicas de velocidade. Todo o sistema foi modelado no Simulink/MATLAB. Os resultados obtidos na simulação demonstraram que o STATCOM fornece potência reativa mais rápido que o SVC durante interrupções forçadas momentâneas no sistema e, após perturbações, mantem os valores de tensão durante surtos de velocidade do vento ou transientes.

Existem vários trabalhos que analisam a ação dos controladores no sistema de distribuição, sua contribuição para melhorar o perfil de tensão e proporcionar diminuição das perdas do sistema elétrico. Porém, como a análise das referências bibliográficas evidenciou, os métodos de cálculo de fluxo de potência são baseados no método *backward-forward sweep* ou utilizando softwares comerciais que consideram a rede de distribuição com as características convencionais, ou seja, sem a inserção de GD e das mudanças proporcionadas ao sistema através dessa inserção.

1.3 OBJETIVOS

Visando contribuir para uma análise do sistema de distribuição com a inserção de GD, o presente trabalho tem como objetivo geral proporcionar uma metodologia para o cálculo de fluxo de potência de redes de distribuição, baseada no método Newton-Raphson Desacoplado Rápido (NRDR), que incorpore a representação de dispositivos D-FACTS em derivação, com o intuito de auxiliar na

operação e planejamento de sistemas de distribuição modernos na definição de alternativas efetivas, com vistas a uma operação mais segura e eficiente.

Os objetivos específicos são:

- Levantar a fundamentação teórica e o estado da arte do objetivo geral;
- Apresentar as características em regime permanente e formas de controle dos dispositivos D-FACTS;
- Adaptar as ferramentas de análise de fluxo de potência para a inclusão dos dispositivos D-FACTS;
- Testar e avaliar o desempenho da metodologia desenvolvida, considerando diferentes condições topológicas e operativas de redes de distribuição.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação é composta por seis capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório, que abrange uma breve introdução e contexto do assunto estudado, apresenta também os artigos estudados, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da análise do fluxo de potência, em que são descritos seus conceitos básicos e métodos de solução fundamentais. O capítulo inicia com uma revisão da formulação do problema do fluxo de potência. Em seguida, apresenta o método de Newton-Raphson e suas variações desacopladas e aborda também a adaptação do método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido para ser utilizado na rede de distribuição via normalização complexa.

No capítulo 3 são apresentados os controladores FACTS e D-FACTS de maneira geral. Depois, são detalhados os princípios de funcionamento de dois controladores que serão utilizados no trabalho, um da primeira e outro da segunda geração de controladores.

O capítulo 4 descreve a modelagem matemática dos controladores D-SVC e D-STATCOM e a inclusão desses modelos no fluxo de potência.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados alcançados a partir da aplicação do algoritmo de normalização complexa e do algoritmo do fluxo

de potência com a inclusão dos controladores D-FACTS em diversas situações de simulações em sistemas-teste.

Por fim, o capítulo 6 traz as considerações finais do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

2 FLUXO DE POTÊNCIA

2.1 O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA

Para o planejamento, expansão e operação do sistema elétrico são necessários estudos do seu estado visando um desempenho seguro e confiável. A solução obtida pelo cálculo do fluxo de potência permite a determinação deste estado, através dos valores das tensões nas barras, da distribuição dos fluxos de potências ativas e reativas que fluem pelas linhas e transformadores.

A modelagem da rede para o cálculo do fluxo de potência é estática, ou em regime permanente, sendo representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. O problema do fluxo de potência consiste na determinação das magnitudes e ângulos de fase das tensões em todas as barras. Através desses valores são calculados os fluxos de potência ativa e reativa.

Vários métodos foram desenvolvidos para a solução deste problema, apresentando características distintas, vantagens e desvantagens, e limitações de aplicações diante das características da rede considerada. Desta forma, alguns dos métodos desenvolvidos são apropriados para as redes de transmissão e outros para redes de distribuição.

Com relação aos sistemas de distribuição, sua tradicional estrutura radial orientou o desenvolvimento dos métodos mais usualmente empregados. Devido a simplicidade de análise apresentada por esta configuração, os métodos de fluxo de potência que foram desenvolvidos ao longo do tempo se aproveitaram dessa característica. Estes métodos são uma extensão da forma geral do método iterativo de Gauss-Seidel, sendo conhecidos como métodos de varredura (*Backward/Forward Sweep*). Tais métodos se mostram eficientes e são largamente empregados para estudos de redes passivas e com topologia radial ou fracamente malhada, ou seja, constituídas a partir de um conjunto de nós unidos por ramos no qual só existe um sentido para o fluxo de potência, da subestação de distribuição para a carga (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988) (KERSTING, 2001). No entanto, tal abordagem se mostra ineficaz para tratar de sistemas de distribuição modernos, sujeitos a forte participação de geração distribuída e configurações em anel ou mesmo em malha.

Assim, ainda neste capítulo será apresentado o método clássico de solução de fluxo de potência via Newton-Raphson, bem como suas variações desacopladas que servirão de base para a metodologia de análise proposta.

2.2 A FORMULAÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA

As equações básicas do problema de fluxo de potência são obtidas considerando a conservação das potências ativa e reativa em cada nó, considerando que o nó representa as barras do sistema e os ramos as linhas de transmissão. Assim, as injeções de potência ativa e reativa em uma barra devem ser iguais à soma dos fluxos de potência que saem da mesma barra (MONTICELLI,1983).

Na formulação básica do cálculo de fluxo de potência estão associadas quatro variáveis, destas duas são dados de entrada do problema e duas são incógnitas:

V_k – magnitude da tensão nodal da barra k

θ_k – ângulo da tensão nodal da barra k

P_k – geração líquida (geração menos carga) de potência ativa da barra k

Q_k – geração líquida de potência reativa da barra k

Definem-se três tipos de barras, de acordo com quais variáveis são consideradas como entrada do sistema:

- PQ (barras de carga) – barras que representam as subestações, portanto P_k e Q_k são conhecidas e V_k e θ_k são as incógnitas do problema;
- PV (barras de geração) – barras das subestações que estão conectadas aos geradores. Neste caso P_k e V_k são dados do problema e Q_k e θ_k são as incógnitas;
- $V\theta$ (barra de referência, de folga, *slack*) – barra que representa a subestação que é utilizada para o fechamento do balanço de potência do sistema, fornece a referência angular $\theta_k = 0$ e $V_k = 1$. As incógnitas são: P_k e Q_k .

Pela primeira Lei de Kirchhoff é obtido o conjunto de equações do problema de fluxo de potência, sendo formado por duas equações para cada barra. Cada uma representa o fato de que as potências ativas e reativas injetadas em cada barra são iguais aos somatórios dos fluxos de potência ativa e reativa que deixam as respectivas barras. Matematicamente expresso por:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

Em que:

$k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras do sistema;

Ω_k – conjunto das barras vizinhas à barra k ;

V_k, V_m – magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

P_{km} – fluxo de potência ativa no ramo $k - m$;

Q_{km} – fluxo de potência reativa no ramo $k - m$;

Q_k^{sh} – injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k ;

As injeções de potência ativa e reativa de cada barra do sistema são dadas por:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.3)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.4)$$

onde:

K – conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a mesma;

G_{km}, B_{km} – coeficientes da matriz de admitâncias.

Definindo NPQ e NPV como o número de barras PQ e barras PV respectivamente, o problema do fluxo de potência pode ser dividido em duas etapas, o Subsistema 1 e o Subsistema 2, descritos nas subseções a seguir (GARCIA; MONTICELLI, 1984).

2.2.1 Subsistema 1

O Subsistema 1 não possui solução direta por ser um sistema de equações algébricas não lineares, sendo necessário a utilização de algum método iterativo para determinar os módulos das tensões e seus respectivos ângulos. A solução deste subsistema determina V_k e θ_k para as barras PQ, θ_k para as barras PV, para a barra V θ não entra nesta etapa, pois sua solução é conhecida.

As incógnitas do Subsistema 1 podem ser agrupadas no vetor:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Onde θ é o vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV de dimensão NPQ + NPV, e V o vetor das magnitudes de tensões das barras PQ de dimensão NPQ.

As expressões que formam o Subsistema 1, podem ser reescritas da seguinte forma:

$$g(x) = g(V, \theta) = \begin{bmatrix} \Delta P[V, \theta] \\ \Delta Q[V, \theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P[V, \theta] \\ Q^{esp} - Q[V, \theta] \end{bmatrix} = 0 \quad (2.6)$$

onde:

ΔP – vetor dos desvios (*mismatches*, erros, resíduos) de potência ativa;

ΔQ – vetor dos desvios (*mismatches*, erros, resíduos) de potência reativa;

P^{esp} – vetor das injeções de potência ativa especificados nas barras PQ e PV;

Q^{esp} – vetor das injeções de potência reativa especificados nas barras PQ;

P – vetor das injeções de potência ativa calculados por (2.3);

Q – vetor das injeções de potência reativa calculados por (2.4).

Vários métodos iterativos podem ser utilizados para resolver este sistema de equações não-lineares, sendo os mais eficientes o método de Newton-Raphson e o Desacoplado Rápido são os que melhor se aplicam ao problema e serão descritos nas próximas seções.

2.2.2 Subsistema 2

Este Subsistema tem solução direta das equações (2.3) e (2.4). Sendo sua dimensão é $NPV + 2$, pois 1 incógnita P para a barra de referência e $NPV + 1$ para Q para as barras PV e a barra de referência. Nele são determinados os valores das injeções de potência ativa e reativa na barra $V\theta$ e a injeção de potência reativa das barras PV da rede. Sendo utilizados para isto, os valores dos módulos e ângulos das tensões em todas as barras, obtidos através da solução do Subsistema 1.

2.3 MÉTODO DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA NEWTON-RAPHSON

Ao longo do tempo surgiram diferentes métodos de solução utilizados no cálculo do fluxo de potência de redes de transmissão. O método de Newton-Raphson e suas versões desacopladas são os mais utilizados nas redes de transmissão, devido suas vantagens e as características apresentadas neste tipo de rede.

Já para sistemas de distribuição, o comportamento dos métodos desacoplados é prejudicado e não apresenta desempenho satisfatório. Assim, para que possa ser utilizado nas redes de distribuição, tais métodos precisam passar por alterações em sua formulação, que serão apresentados ao final desta seção.

2.3.1 Método de Newton-Raphson

É um método numérico utilizado na solução de sistemas algébricos não-lineares que apresenta convergência quadrática. Assim, o método de Newton-Raphson é um dos principais métodos utilizados para a solução do cálculo do fluxo de potência.

A aplicação deste método consiste em determinar os vetores de correção Δx para atualização dos valores de ângulo e módulo da tensão do vetor $x(\theta, V)$, utilizando a equação (2.6) do Subsistema 1.

A solução do sistema linear a seguir determina o vetor de correção Δx a cada iteração, sendo $J(x)$ a matriz Jacobiana e v o contador de iterações.

$$g(x^v) = -J(x^v) \Delta x^v \quad (2.7)$$

A matriz Jacobiana pode ser dividida em quatro submatrizes:

- **H** – derivadas parciais de injeção de potência ativa em função dos ângulos das tensões;
- **N** – derivadas parciais de injeção de potência ativa em função dos módulos das tensões;
- **M** – derivadas parciais de injeção de potência reativa em função dos ângulos das tensões;
- **L** – derivadas parciais de injeção de potência reativa em função dos módulos das tensões.

Conforme apresentado na equação (2.8):

$$J(x) = J(V, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & M \\ N & L \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

As componentes das submatrizes Jacobianas **H**, **N**, **M** e **L** são dadas por:

$$\begin{cases} H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = P_k - V_k^2 G_{kk} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} L_{km} = \partial Q_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{kk} = \partial Q_k / \partial V_k = V_k^{-1} (Q_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases} \quad (2.12)$$

Assim, o sistema a ser solucionado a cada iteração passa a ser:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^u = \begin{bmatrix} H & M \\ N & L \end{bmatrix}^u \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^u \quad (2.13)$$

A cada iteração o vetor com os módulos e ângulos das tensões é atualizado com os valores de correção obtidos pela solução do sistema da equação (2.6), conforme pode ser visto nas equações:

$$\Delta P(V^u, \theta^u) = H(V^u, \theta^u) \Delta \theta^u + N(V^u, \theta^u) \Delta V^u \quad (2.14)$$

$$\Delta Q(V^u, \theta^u) = M(V^u, \theta^u) \Delta \theta^u + L(V^u, \theta^u) \Delta V^u \quad (2.15)$$

$$\theta^{u+1} = \theta^u + \Delta \theta^u \quad (2.16)$$

$$V^{u+1} = V^u + \Delta V^u \quad (2.17)$$

Segundo Monticelli (1983), o método possui convergência quadrática e tem sensibilidade quanto à escolha do ponto de inicialização do processo iterativo. Além disso, a cada iteração a matriz jacobiana é recalculada, exigindo um grande volume memória e tempo de processamento, caso o sistema seja de grande dimensão. Em função disso, os métodos desacoplados surgiram como uma alternativa para a redução do esforço e tempo computacional para a resolução do sistema.

2.3.2 Método desacoplado

Os métodos desacoplados consideram o desacoplamento $P\theta - QV$, ou seja, são obtidos considerando o fato de as sensibilidades $\partial P_k / \partial V_m$ e $\partial Q_k / \partial \theta_m$ serem mais fracas que as sensibilidades $\partial P_k / \partial \theta_m$ e $\partial Q_k / \partial V_m$, características observadas

em sistemas de transmissão em extra-alta tensão (acima de 230kV) e ultra-alta tensão (acima de 750kV) (MONTICELLI,1983). Portanto, nesses sistemas, verifica-se que variações nos ângulos das tensões influenciam variação da potência ativa, enquanto que variação da magnitude das tensões modificam mais significativamente a potência reativa.

Devido ao desacoplamento, as submatrizes N e M são consideradas nulas. Portanto, é possível resolver os subproblemas $P\theta$ e QV alternadamente, e utilizar os valores atualizados de V para a resolução do subproblema $P\theta$ e dos valores atualizados de θ para a resolução do subproblema QV . Assim, as variáveis θ e V são atualizadas a cada meia-iteração (MONTICELLI,1983).

Considerando essas simplificações o algoritmo básico do método de Newton pode ser representado pelas seguintes equações:

$$\Delta P(V^u, \theta^u) = H(V^u, \theta^u) \Delta \theta^u \quad (2.18)$$

$$\theta^{u+1} = \theta^u + \Delta \theta^u \quad (2.19)$$

$$\Delta Q(V^u, \theta^u) = L(V^u, \theta^u) \Delta V^u \quad (2.20)$$

$$V^{u+1} = V^u + \Delta V^u \quad (2.21)$$

Como afirma Monticelli (1983), dependendo do sistema considerado na resolução do problema de fluxo de potência, os problemas $P\theta$ e QV podem ter velocidades de convergência diferentes. Nestes casos podem-se obter algumas vantagens computacionais ao se alternar a resolução dos problemas $P\theta$ e QV . Se o problema $P\theta$ convergir antes do problema QV os cálculos relacionados a ele não são mais considerados, assim diminuindo o esforço computacional enquanto o problema QV não foi resolvido.

2.3.3 Método desacoplado-rápido

O método desacoplado rápido possui o mesmo algoritmo básico que o método desacoplado. No entanto, ao contrário do método desacoplado, onde as

submatrizes H' e L' são recalculadas a cada meia-iteração, no método desacoplado as mesmas são mantidas constantes durante todo o processo iterativo, passando a serem chamadas respectivamente de B' e B'' .

Para isso, algumas aproximações são introduzidas (MONTICELLI,1983):

- $\theta_{km} \approx 0 \therefore \cos(\theta_{km}) \approx 1$ e $\text{sen}(\theta_{km}) \approx 0$;
- B_{km} é, em magnitude muito maior que $G_{km}\text{sen}(\theta_{km})$;
- $B_{kk}V_k^2$ é em magnitude muito maior que Q_k .

Considerando ainda que V_m e V_k são aproximadamente unitárias, temos as submatrizes H' e L' resultantes:

$$\begin{cases} H'_{km} \cong -B_{km} \\ H'_{kk} \cong -B_{kk} \end{cases} \rightarrow H' \cong B' \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} L'_{km} \cong -B_{km} \\ L'_{kk} \cong -B_{kk} \end{cases} \rightarrow L' \cong B'' \quad (2.23)$$

Portanto, as matrizes B' e B'' , não dependem mais das variáveis de estado do sistema (ângulos e magnitudes das tensões), mas apenas dos parâmetros da rede. A matriz B' não apresenta as linhas e colunas da matriz referentes às barras do tipo $V\theta$, e em B'' não aparecem as linhas e colunas da matriz referentes às barras PV e $V\theta$. Desse forma as matrizes B' e B'' mantêm as estruturas das submatrizes jacobiana H e L (Monticelli,1983).

Assim, as equações do método de desacoplado-rápido podem ser expressas por:

$$\Delta P(V^v, \theta^v)/V = B' \Delta \theta^v \quad (2.24)$$

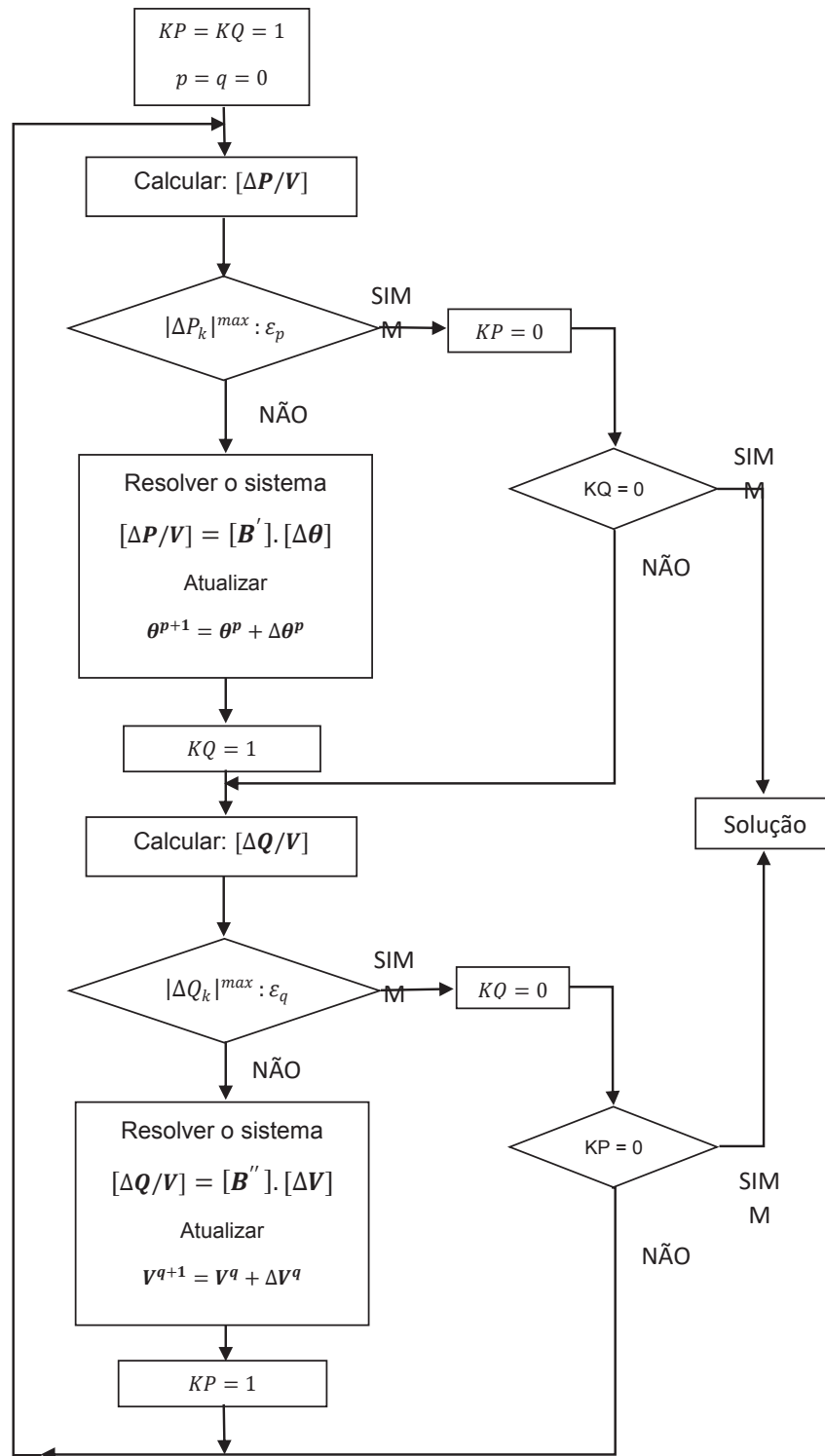
$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad (2.25)$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^v)/V = B'' \Delta V^v \quad (2.26)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (2.27)$$

Segundo Monticelli (1983), algumas outras modificações podem ser realizadas no método desacoplado-rápido. Por exemplo, ao se construir a matriz \mathbf{B}' as resistências série das linhas e os elementos da rede relacionados à potência reativa são desconsiderados, esta versão é conhecida como XB. Outra possibilidade de modificação é desconsiderar as resistências série das linhas durante a montagem da matriz \mathbf{B}'' ao invés da \mathbf{B}' , e também desconsiderar os elementos *shunt* de \mathbf{B}' e duplicar esses elementos em \mathbf{B}'' , esta é a versão BX. Esta última versão apresenta melhor desempenho em sistemas com baixa relação X/R , já em sistemas de alta tensão as duas versões tem desempenho similar. Na FIGURA 2, é apresentado o fluxograma do método.

FIGURA 2- FLUXOGRAMA MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO



FONTE: Adaptado de Stott e Alsac (1974)

2.3.4 Normalização complexa aplicada aos Métodos desacoplado-rápido

Com a inserção de GD no rede de distribuição, essa rede, antes considerada radial, tende a assumir configurações em anel ou em malha, uma característica observada em sistema de transmissão. Porém, em função das características típicas de seus condutores, as relações X/R continuam sendo baixas, não caracterizando o acoplamento $P\theta$ - QV , que viabiliza o uso dos métodos desacoplados. Assim, para que estes métodos sejam aplicáveis às redes de distribuição, foi proposta a técnica de normalização complexa (TORTELLI *et al.*,2015). Esta técnica é utilizada para adaptar relações X/R para valores próximos aos do sistema de transmissão, e assim ser possível utilizar os eficientes métodos desacoplados também para análises de sistemas de distribuição independente de sua condição de operação.

2.3.4.1 Normalização complexa por unidade (cpu)

Na normalização convencional, tanto a base de potência e as bases de tensão do sistema são definidas como valores reais, ou seja, não apresentam parcelas imaginárias. Já no sistema por unidade complexa, enquanto as bases de tensão continuam apresentando valores reais, a base de potência definida para o sistema passa a ser um valor complexo, apresentando, assim, não só magnitude, mas também uma defasagem angular φ_{base} (Tortelli *et al.*,2015). As equações (2.28) e (2.29) exemplificam este processo.

$$\dot{S}_{base} = |\dot{S}_{base}| \cdot e^{-j\varphi_{base}} \quad (2.28)$$

$$\dot{V}_{base} = |\dot{V}_{base}| \cdot e^{-j \cdot 0} = V_{base} \quad (2.29)$$

A partir da nova definição para a potência base, a definição da impedância base para o sistema também passa a ser uma unidade complexa, dada por:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{(V_{base})^2}{\dot{S}_{base}^*} = |\dot{Z}_{base}| \cdot e^{-j\varphi_{base}} \quad (2.30)$$

Assim, as impedâncias das linhas do sistema são dadas por:

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{|\dot{Z}_{\Omega}| \cdot e^{j\theta}}{|\dot{Z}_{base}| \cdot e^{-j\varphi_{base}}} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot e^{j(\theta + \varphi_{base})} \quad (2.31)$$

Na qual:

- R_{Ω} e X_{Ω} são, respectivamente, a resistência e reatância da linha em ohms;
- \dot{Z}_{Ω} é a impedância da linha em ohms, representada por um fasor com módulo \dot{Z}_{Ω} e defasagem angular θ ;
- \dot{Z}_{pu} é a impedância em pu.;
- \dot{Z}_{cpu} é a impedância em cpu.

Assim, pela equação (2.31) temos que a normalização complexa não afeta a magnitude da impedância normalizada, quando comparada com a normalização convencional, contudo, afeta diretamente a componente fasorial da impedância que passa a variar conforme o ângulo base escolhido (TORTELLI *et al.*, 2015). Consequentemente, as resistências e reatâncias das linhas podem ser dadas por:

$$R_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot \cos(\theta + \varphi_{base}) \quad (2.32)$$

$$X_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot \sin(\theta + \varphi_{base}) \quad (2.33)$$

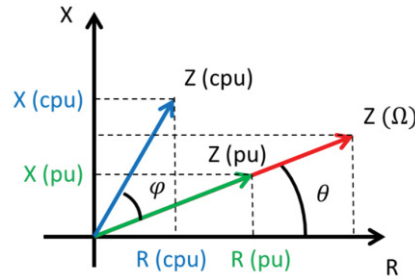
Pelas equações (2.32) e (2.33) chega-se à relação X/R :

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \varphi_{base}) \quad (2.34)$$

Analisando a equação (2.34) que a relação X/R é agora função do ângulo base (φ_{base}) escolhido. Realizando o controle do ângulo base é possível ajustar a relação X/R para valores adequados para utilização do método desacoplado para sistema de distribuição.

Como pode ser observado na FIGURA 3, após a aplicação da normalização complexa é modificada a relação X/R .

FIGURA 3 – EFEITO DA NORMALIZAÇÃO COMPLEXA



FONTE: Portelinha (2016)

Esta formulação também pode ser estendida à condutância e à susceptância:

$$G_{cpu} = G_{pu} \cdot \cos \varphi_{base} + B_{pu} \cdot \sin \varphi_{base} \quad (2.35)$$

$$B_{cpu} = -G_{pu} \cdot \sin \varphi_{base} + B_{pu} \cdot \cos \varphi_{base} \quad (2.36)$$

Com a normalização complexa, as impedâncias assumem novos valores (R_{cpu} e X_{cpu}), e, portanto, são estabelecidos novos parâmetros para a rede elétrica. Com o objetivo de conservar as tensões complexas das barras, ou seja, manter o estado original da rede, as injeções de potência ativa e reativa também devem ser alteradas. Assim:

$$\dot{S}_{cpu} = \frac{|\dot{S}_{VA}| \cdot e^{j\delta}}{|\dot{S}_{base} \cdot e^{-j\varphi_{base}}|} = |\dot{S}_{pu}| \cdot e^{j(\delta + \varphi_{base})} = (P_{pu} + jQ_{pu}) \cdot e^{j\varphi_{base}} \quad (2.37)$$

De modo que:

$$P_{cpu} = |\dot{S}_{pu}| \cdot \cos(\delta + \varphi_{base}) = P_{pu} \cdot \cos \varphi_{base} - Q_{pu} \cdot \sin \varphi_{base} \quad (2.38)$$

$$Q_{cpu} = |\dot{S}_{pu}| \cdot \sin(\delta + \varphi_{base}) = Q_{pu} \cdot \sin \varphi_{base} + P_{pu} \cdot \cos \varphi_{base} \quad (2.39)$$

A normalização complexa também afeta as bases de corrente, que passam a ser dadas por:

$$\dot{I}_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{|\dot{Z}| \cdot e^{-j\varphi_{\text{base}}}} = |\dot{I}| \cdot e^{j\varphi_{\text{base}}} \quad (2.40)$$

Portanto, a corrente em cpu (\dot{I}_{cpu}) passa a ser dada por:

$$\dot{I}_{\text{cpu}} = \frac{|\dot{I}_A| \cdot e^{j\beta}}{|\dot{I}_{\text{base}}| \cdot e^{j\varphi_{\text{base}}}} = |\dot{I}_{\text{pu}}| \cdot e^{j(\beta - \varphi_{\text{base}})} \quad (2.41)$$

Substituindo as equações (2.37) e (2.41) em $\dot{S} = \dot{V} \cdot \dot{I}^*$ tem-se:

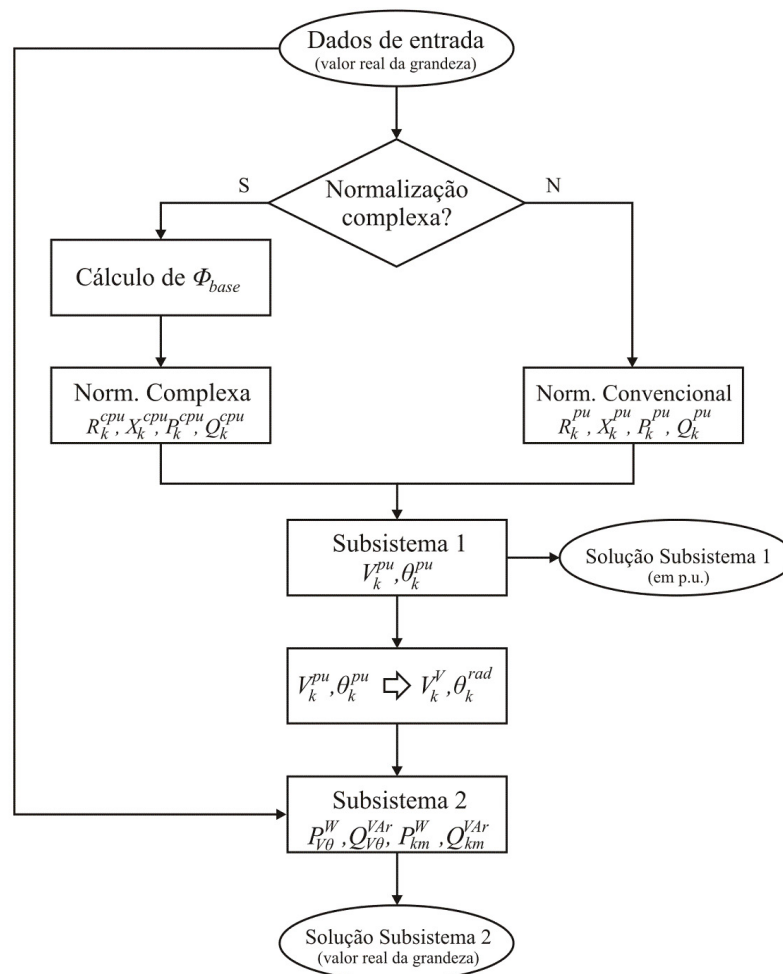
$$\dot{V}_{\text{cpu}} = \frac{|\dot{S}_{\text{cpu}}| \cdot e^{j(\beta + \varphi_{\text{base}})}}{|\dot{I}_{\text{pu}}| \cdot e^{-j(\beta - \varphi_{\text{base}})}} = |\dot{V}_{\text{pu}}| \cdot e^{j(\delta + \beta)} = \dot{V}_{\text{pu}} \quad (2.42)$$

A equação (2.42) demonstra que a normalização complexa não afeta as variáveis de estado do sistema elétrico, pois as tensões do sistema são iguais independentemente de se utilizar a normalização convencional (pu) ou complexa (cpu). Assim, o estado do sistema são equivalentes para ambas as normalizações:

$$V_{\text{cpu}} \equiv V_{\text{pu}} \quad (2.43)$$

$$\theta_{\text{cpu}} \equiv \theta_{\text{pu}} \quad (2.44)$$

Ainda segundo Tortelli *et al.* (2015), a normalização complexa consiste numa generalização da normalização convencional, pois, esta pode ser vista como um caso específico da normalização complexa quando o ângulo base é igual a zero. Portanto, a normalização complexa possui as mesmas vantagens que são obtidas quando se utiliza a normalização convencional, além de que, através do correto ajuste do ângulo base, pode-se virtualmente controlar as relações X/R das linhas do sistema. Na FIGURA 4, é apresentado o fluxograma da Normalização Complexa por Unidade.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO FLUXO DE POTENCIA COM *cpu*

FONTE: Durce (2012)

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi exposto o problema do fluxo de potência, que é dividido em dois subsistemas. O subsistema 1 exige aplicação de métodos iterativos, determina as tensões nas barras do sistema. Já subsistema 2 que se refere ao cálculo do fluxo de potência nas linhas tem solução direta.

Foram apresentados métodos iterativos tradicionais para o sistema de transmissão para a obtenção das tensões nas barras do sistema, ou seja, Método de Newton-Raphson e suas variações desacopladas. São métodos que apresentam boa robustez e rápida convergência.

A escolha pelo método Newton-Raphson Desacoplado Rápido para sistema de distribuição é devida a diminuição do custo computacional e rápida convergência

do mesmo. A diminuição do custo computacional se deve ao cálculo da matriz Jacobiana uma única vez no início do processo.

Mas, para que seja possível utilizar esse método no sistema de distribuição, é necessário um ajuste via o processo de normalização complexa (normalização por unidade complexa), que incorpora um ângulo de rotação à sua base de potência. A utilização da normalização complexa não afeta os valores das variáveis de estado do sistema, apenas ajusta a relação X/R para valores compatíveis com os do sistema de transmissão.

3 CONTROLADORES FACTS

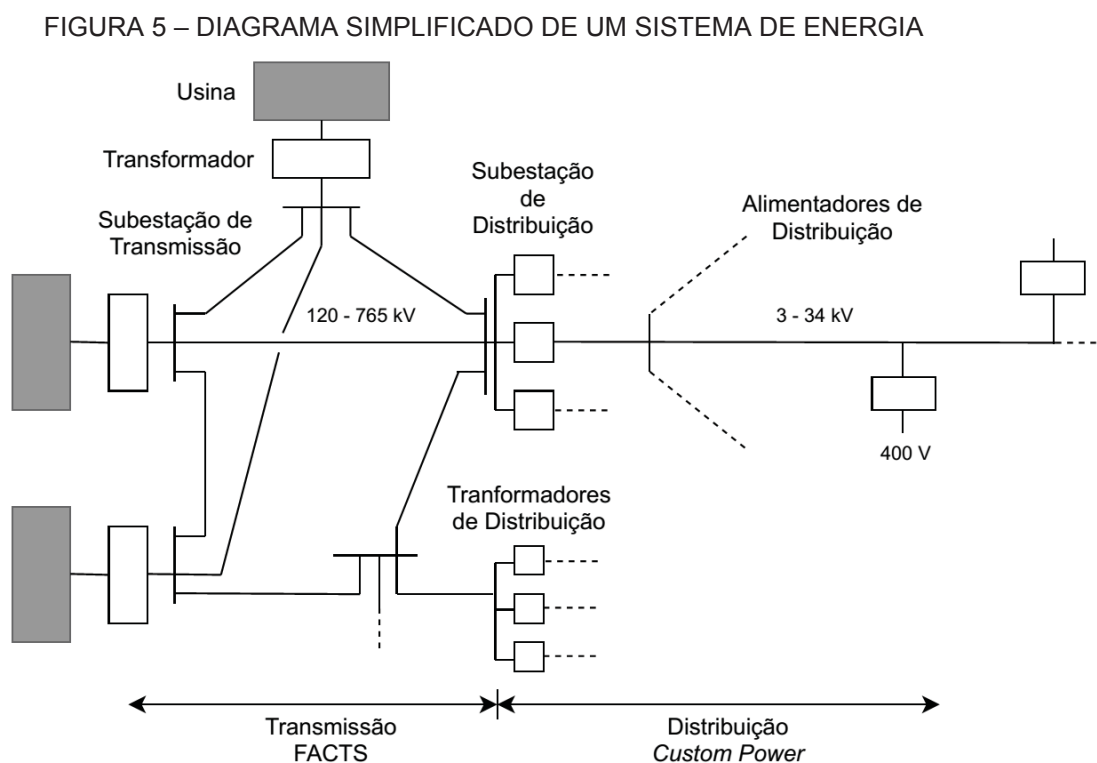
3.1 INTRODUÇÃO

Os modernos sistemas de potência são altamente complexos e espera-se que, mesmo com a crescente demanda de energia, continuem a oferecer energia elétrica com qualidade, segurança e custos aceitáveis. Devido a fatores econômicos e ambientais os sistemas de geração estão, tradicionalmente, localizados distantes dos centros de carga. Restrições regulatórias para a expansão da rede de transmissão resultaram em redução das margens de estabilidade e aumento dos riscos de interrupções e apagões em cascata. Esse problema pode ser enfrentado com eficácia, através da introdução de controladores eletrônicos para a regulação de fluxo de potência e das tensão nas redes de transmissão. Isso permite uma operação mais flexível dos sistemas de transmissão, permitindo que as alterações sejam mais facilmente resolvidas, sem sobrecarregar o sistema. Os sistemas eletrônicos de potência e outros equipamentos estáticos que fornecem capacidade de controle do fluxo de potência e tensão são denominados controladores FACTS (PADIYAR, 2007).

Os controladores eletrônicos de potência foram introduzidos pela primeira vez como projetos de sistemas de transmissão em corrente contínua em alta tensão (*High Voltage Direct Current* - HVDC), não apenas para a regulação do fluxo de potência em conexões HVDC, mas também para modulação para melhorar a estabilidade do sistema (ângulo e tensão) (Padiyar, 2007). No artigo de Hingorani (1988), foi introduzido o conceito FACTS, incorporando controladores eletrônicos para melhorar a transferência de energia em linhas de transmissão existentes, melhorando a regulação da tensão e a segurança do sistema sem a necessidade de se adicionar novas linhas.

Embora o conceito dos controladores FACTS terem sido originalmente desenvolvidos para os sistemas de transmissão, eles foram expandidos para aplicações nos sistemas de distribuição. No artigo de Hingorani (1995), foi demonstrada a aplicação desses dispositivos FACTS para sistemas de distribuição, com o objetivo de melhorar a confiabilidade e qualidade da energia. Na FIGURA 5 é mostrado o diagrama de um sistema de energia mostrando a divisão do mesmo em

transmissão e distribuição, evidenciando-se que na transmissão os controladores são classificados como FACTS, e já no caso da distribuição como *Custom Power*.



FONTE: Adaptado de Hingorani (1995)

Devido à evolução no desenvolvimento das chaves de potência, os dispositivos FACTS são divididos em duas gerações: a primeira, inicial, caracterizada pela utilização de tiristores convencionais, e uma segunda geração, de proposições e desenvolvimentos mais recentes, baseada no emprego de chaves eletrônicas com capacidade de controle do disparo e bloqueio, como o GTO (*Gate Turn-off Thyristor*) e o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (PADIYAR, 2007). Tal divisão será melhor explicada nas subseções a seguir.

3.2 PRIMEIRA GERAÇÃO DE CONTROLADORES FACTS

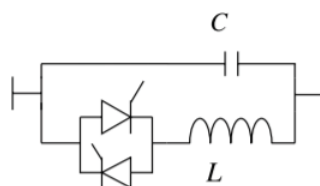
O desenvolvimento dos dispositivos FACTS foram baseados em ações de controle convencionais: bancos de capacitores e transformadores de tap variável, e também do desenvolvimento tecnológico da eletrônica de potência.

Os controladores FACTS desta geração são baseados na ação de tiristores convencionais ou SCRs (*Silicon Controlled Rectifiers*), em arranjos similares aos de capacitores e reatores chaveados. A ação de controle dessas chaves eletrônicas se dá apenas no momento do disparo, ou seja, não possui controle no bloqueio do dispositivo. O bloqueio ocorre apenas com a anulação da corrente, ou seja, esses conversores dependem do término do ciclo da rede para a desativação do tiristor. São capazes de suportar elevadas tensões e correntes, possuem baixo custo e alta eficiência, devido a essas características ainda são muito utilizados em projetos de conversores de alta potência.

Os controladores FACTS desenvolvidos nesta geração têm como característica comum, que para a compensação da potência reativa, esta é absorvida ou gerada por bancos de capacitores ou por reatores convencionais. Os tiristores são utilizados para o controle da impedância equivalente que o controlador apresenta à rede elétrica na barra em que está conectado. Portanto, em regime permanente, o valor da impedância equivalente (capacitiva ou indutiva) é controlada eletronicamente pelo ângulo de disparo dos tiristores. Devido ao fato desses dispositivos poderem modificar a característica de impedância do sistema, eles acabam atuando indiretamente na magnitude de tensão e na potência transmitida (PADIYAR, 2007).

A configuração típica dos controladores FACTS da primeira geração, é a combinação de um capacitor fixo em paralelo com um reator controlado por tiristor (FC-TCR), conforme pode ser observado na FIGURA 6.

FIGURA 6 – ESTRUTURA BÁSICA DOS CONTROLADORES FACTS 1ª GERAÇÃO



FONTE: Tortelli (2010)

Os principais controladores FACTS desta primeira geração (impedância variável controlada) são:

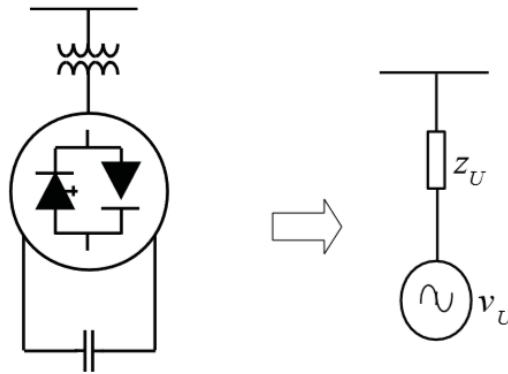
- *Static VAR Compensator (SVC)*: é um controlador shunt, que dependendo da reatância equivalente do SVC (indutiva ou capacitiva), é capaz de injetar ou absorver potência reativa do sistema, atuando no controle da magnitude de tensão;
- *Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)*: é um controlador série que através variação na impedância da linha de transmissão onde está conectado, controla o fluxo de potência ativo;
- *Thyristor Controlled Phase Shifters (TCPS)*: é um controlador inserido em série com a rede elétrica que através da atuação sobre a abertura angular da tensão, controla o fluxo de potência ativa.

3.3 SEGUNDA GERAÇÃO DE CONTROLADORES FACTS

O elemento base da segunda geração de controladores FACTS, são os conversores tipo VSC (*Voltage-Sourced Converter*), que foram construídos devido ao desenvolvimento do GTO (*Gate Turn-Off thyristor*) de alta potência, que se constitui por um tiristor com capacidade de comandar o seu disparo e seu bloqueio.

Os VSCs utilizam conversores constituídos por chaves eletrônicas com capacidade de bloqueio (autocomutadas), porém não utilizam bancos de capacitores ou reatores, para gerar uma tensão síncrona com magnitude e ângulo de fase controláveis. Um dispositivo VSC pode ser visto como uma fonte de tensão que opera apenas na frequência fundamental, portanto não proporciona ressonâncias (série ou shunt) com a rede de transmissão, problema que ocorria com os conversores baseados em tiristores convencionais. A FIGURA 7 mostra a estrutura típica de um VSC e sua representação equivalente.

FIGURA 7 – ESTRUTURA TÍPICA E REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE



FONTE: Tortelli (2010)

Apesar da evolução da capacidade de corrente e tensão dos GTOs, para suportar a alta tensão requerida para aplicações em sistemas de transmissão, é preciso fazer conexão em série de diversos dispositivos, para formar uma chave capaz de aguentar essas altas tensões. Essa questão foi resolvida através de uma nova gama de chaves semicondutoras como o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), MTO (*MOS Turn-Off Thyristor*) e IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*), resultado dos contínuos avanços em semicondutores de potência (PADIYAR, 2007).

Dentre essas novas chaves, o IGBT apresenta grande interesse para aplicação em controladores FACTS, pois pode ser utilizado em aplicações de baixa e média potências, chegando a alcançar até dezenas de MW. Possui tempo de chaveamento reduzido e conseqüentemente redução nas perdas, portanto pode ser utilizado em operação em frequências mais elevadas.

Devido a sua capacidade de bloqueio (autocomutados) geralmente são mais caros e apresentam perdas mais elevadas que tiristores convencionais. Por serem desenvolvimento de conversores com conceitos mais avançados e eficientes, podem levar a reduções significativas de tamanho e custo do sistema como um todo, apresentam também características de desempenho bem superior, podendo fazer a troca de potência ativa diretamente com a rede elétrica. Portanto, constitui-se uma valiosa opção para o controle mais eficiente do sistema elétrico.

Os principais controladores FACTS desta segunda geração baseados em VSC são:

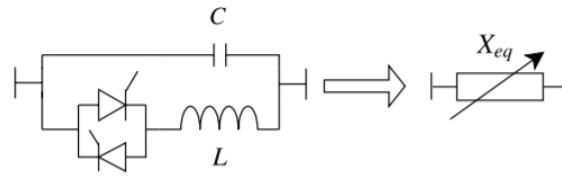
- *Static Compensator – STATCOM*: em regime permanente, pode fornecer ou absorver potência reativa da rede elétrica, portanto pode ser utilizado para regulação de tensão. Funciona como uma fonte de tensão eletronicamente controlada, conectada em paralelo com a rede de potência por meio de um transformador de acoplamento;
- *Static Synchronous Series Compensator – SSSC*: sua atuação é similar com a do STATCOM, porém o mesmo é conectado em série com a linha de transmissão;
- *Unified Power Flow Controller – UPFC*: pode ser compreendido como uma combinação de um STATCOM com um SSSC em um único dispositivo, o que confere uma capacidade ampliada de controle. Permite controlar simultaneamente magnitude de tensão e fluxos de potência ativa e reativa. Assim, constitui-se no mais complexo e versátil dos controladores FACTS, sendo um avançado dispositivo de controle do sistema elétrico de potência;
- Sistema HVDC-VSC: sistemas HVDC baseados em conversores do tipo VSC, com uma proposta mais orientada à controlabilidade do sistema elétrico é uma proposta mais recente. Emprega interruptores de potência de última geração, como o GTO e o IGBT, junto com avançadas técnicas de controle digital.

3.4 CONTROLADORES D-FACTS

3.4.1 D-SVC - Static VAR Compensator

O Controlador SVC consiste basicamente de um banco de capacitores e reatores shunt chaveáveis, cuja ação de controle dos tiristores se dá por comando eletrônico. Portanto, dessa forma, um SVC pode ser considerado como uma reatância shunt variável, conforme apresentado pela FIGURA 8.

FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE DO SVC



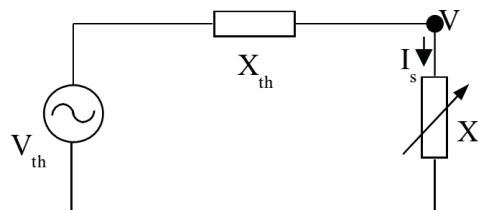
FONTE: Tortelli (2010)

A reatância equivalente do SVC, pode ser indutiva ou capacitiva, assim ela é capaz de injetar ou absorver potência reativa do sistema de potência. É possível realizar regulação da magnitude de tensão na barra do sistema onde o SVC está conectado, através do controle apropriado da reatância equivalente.

Característica e Operação do SVC

Para determinar a característica tensão-corrente do SVC, pode ser analisando o circuito elétrico a partir da barra a ser regulada, conforme FIGURA 9.

FIGURA 9 – CIRCUITO EQUIVALENTE VISTO DA BARRA REGULADA



FONTE: Tortelli (2010)

Representando o sistema de potência pelo equivalente de Thevenin, sendo a impedância predominantemente indutiva. Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões, a característica do sistema pode ser expressa por:

$$V = V_{th} - j \cdot X_{th} I_s \quad (3.1)$$

onde I_s é a corrente reativa do elemento *shunt* conectado na barra controlada.

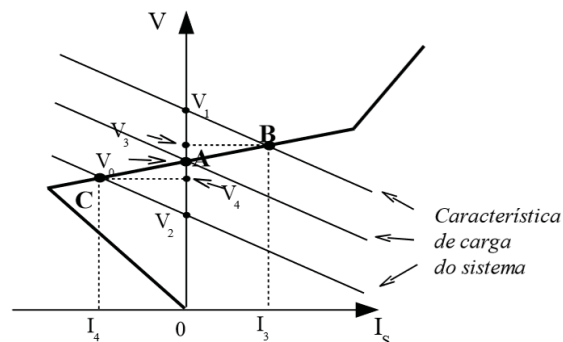
A equação (3.1) pode ser expressa por:

$$V = \frac{V_{th}}{1 \pm \frac{X_{th}}{X_s}} \quad (3.2)$$

sendo X_s é a reatância shunt variável vista na FIGURA 9. O sinal negativo da equação (3.2) será utilizada quando X_s for capacitivo.

A interação entre as características do SVC e do sistema de potência pode ser observada na FIGURA 10. Os pontos A, B e C representam três características distintas do sistema de potência correspondentes a três diferentes valores da tensão de Thevenin. O ponto de operação do sistema de potência é dado pela intersecção dessas duas características. O ponto A representa a condição nominal do sistema, onde $V = V_{ref}$ e $I_s = 0$.

FIGURA 10 – INTERAÇÃO ENTRE O SVC E O SISTEMA DE POTÊNCIA



FONTE: Tortelli (2010)

Um decréscimo no nível de carregamento do sistema resulta em um acréscimo da magnitude de tensão em todos os nós do sistema. Esta ação é representada por um acréscimo de tensão V_{th} na fonte de tensão FIGURA 9. Se o SVC não estivesse conectado à rede, a tensão V aumentaria até V_1 . Entretanto, a interação entre o sistema de potência e o SVC move o novo ponto de operação para o ponto B. O SVC assegura a magnitude da tensão em V_3 através da absorção da corrente indutiva I_3 . Por outro lado, um aumento no nível de carregamento do sistema produz um decréscimo na magnitude das tensões nodais. Para esta condição o SVC mantém a magnitude de tensão em V_4 através da injeção da corrente capacitiva I_4 . Na ausência do SVC, a magnitude da tensão seria V_2 .

3.4.2 D-Static Compensator - STATCOM

O nome STATCOM foi consolidado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). No entanto, outras denominações podem ser encontradas para o mesmo conceito de dispositivo, por exemplo, STATCON, (*Static Condenser*), SSC (*Static Synchronous Compensator*), ASVC (*Advanced Static Var Compensator*) e ASVG (*Advanced Static Var Generator*). A nomenclatura difere apenas em muitos casos pela empresa que desenvolveu o dispositivo.

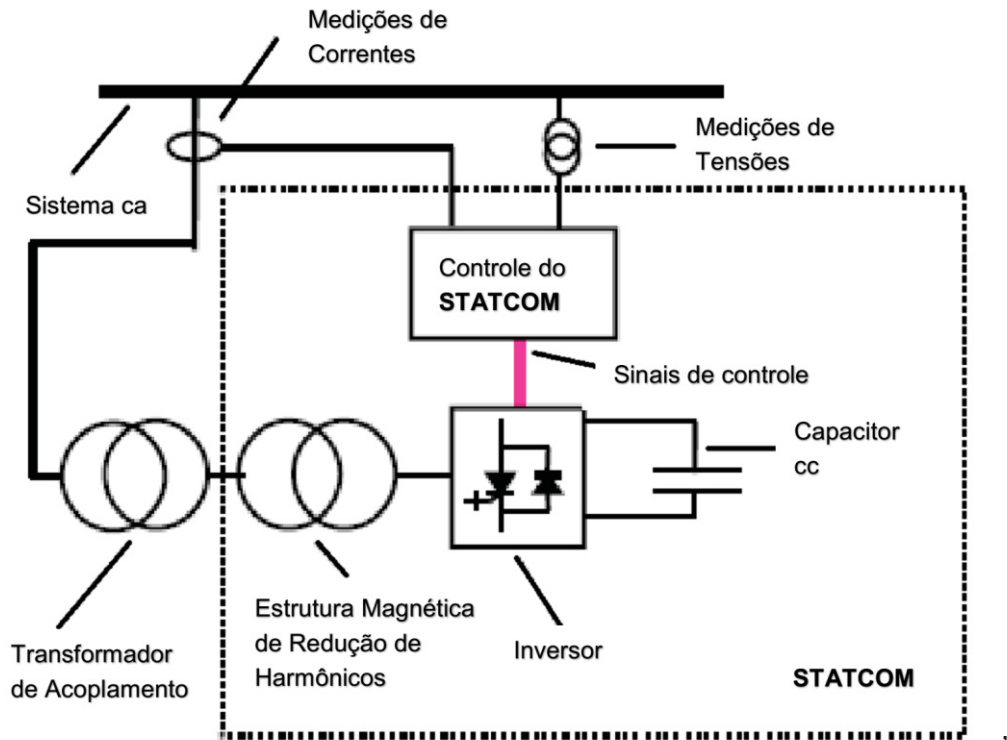
Além destas denominações, existem outras variações como o D-STATCOM (*Distribution-STATCOM*), voltado para sistemas de distribuição e o PWM-STATCOM (*Pulse Width Modulation STATCOM*), com inversores operando com frequência de chaveamento elevadas.

O funcionamento do STATCOM é similar a um compensador síncrono rotativo (máquina síncrona), porém sem sua inércia mecânica característica. É empregado normalmente para regulação de tensão, pois pode fornecer ou absorver tanto potência reativa quanto potência ativa da rede elétrica, quando acoplado a uma fonte de energia adequada.

O conversor do tipo fonte de tensão (VSC) que converte uma tensão dc em uma tensão alternada com magnitude e ângulo de fase controláveis, sendo a unidade básica de um STATCOM. Portanto não modifica de forma significativa a característica de impedância do sistema.

De maneira simplificada a estrutura básica de um STATCOM, como pode ser observada na FIGURA 11, é constituída por um transformador de acoplamento, um VSC e um dispositivo acumulador de energia, usualmente um capacitor dc. Portanto, pode apenas gerar ou absorver potência reativa. Se o capacitor for substituído por baterias ou outra fonte de tensão dc, o controlador poderá também injetar ou absorver potência ativa com o sistema. Assim, o dispositivo passa a ter quatro quadrantes como região de operação, ao invés de dois quadrantes quando utilizado o capacitor.

FIGURA 11 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM STATCOM



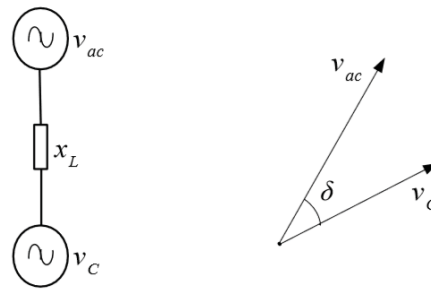
FONTE: Tortelli (2010)

Com as medições de corrente e tensão, são determinados os instantes de comutação das chaves que constituem o inversor, e este processo é executado pelo sistema de controle do STATCOM. A função de compatibilizar os níveis de impedância do compensador e do sistema CA é realizada pelo transformador.

Princípio de Funcionamento

A representação esquemática do STATCOM é mostrada na FIGURA 12, facilitando a compreensão do seu funcionamento. No diagrama, a fonte de tensão v_{ac} representa o sistema elétrico, a tensão v_c o STATCOM e X_L representa a reatância do transformador de acoplamento do STATCOM. Na FIGURA 12, também está representado o diagrama fasorial das tensões, sendo δ o ângulo de defasagem entre as tensões do sistema e do STATCOM.

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA RELAÇÃO DO STATCOM COM O SISTEMA ELÉTRICO E DIAGRAMA FASORIAL DAS TENSÕES



FONTE: Tortelli (2010)

O fluxo de potência reativa absorvida ou injetada pelo controlador, pode ser obtido pela diferença entre a magnitude da tensão de saída do conversor e a da barra onde o STATCOM está conectado.

A potência reativa trocada entre o conversor e o sistema elétrico pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q = \frac{V_c^2 - V_c \cdot V_{ac} \cdot \cos \delta}{X} \quad (3.3)$$

A potência ativa trocada entre o sistema de potência e o conversor pode ser calculada por:

$$P = \frac{V_c \cdot V_{ac} \cdot \sin \delta}{X} \quad (3.4)$$

Onde:

V_c : magnitude da tensão de saída do compensador;

V_{ac} : magnitude da tensão de saída do sistema;

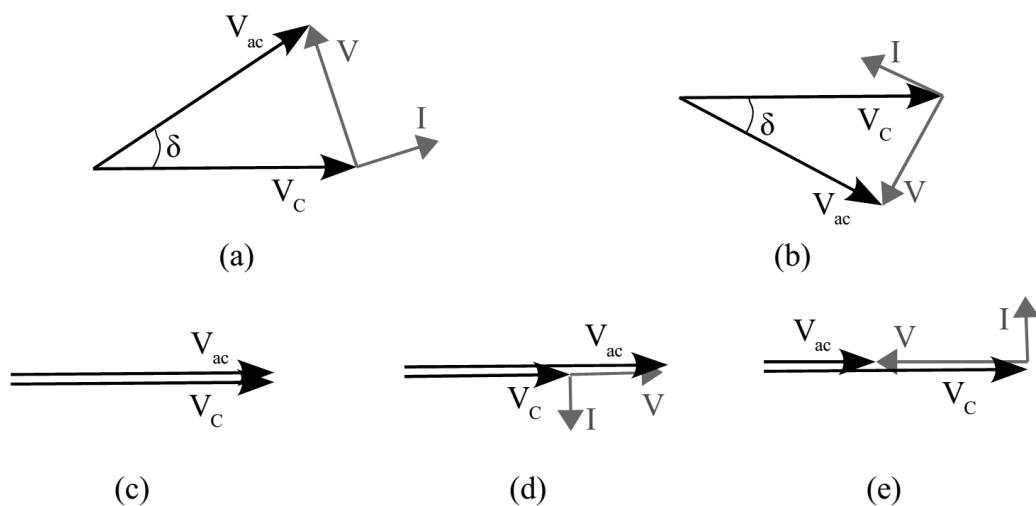
δ : diferença angular entre essas duas tensões.

Pelas equações (3.3) e (3.4), verifica-se que o controle de fase através de uma fonte de tensão tem a capacidade de direcionar o fluxo de potência ativa, e que para controlar a potência reativa, basta fazer o controle da amplitude dessa fonte de tensão.

Na FIGURA 13, são apresentados os modos de operação do STATCOM em relação ao sistema em que está conectado. Nos casos (c), (d), (e) caso as tensões

do sistema e do STATCOM estejam sincronizadas e em fase, não existe fluxo de potência ativa em nenhum sentido. Quando as amplitudes das tensões entre o sistema de potência e o STATCOM são diferentes, ocorre um fluxo de potência reativa. Se a magnitude da tensão do sistema elétrico for constante, e a tensão do STATCOM puder ser variada continuamente com uma amplitude menor que a tensão da rede, este passa a operar como um banco de indutores variáveis, gerando correntes atrasadas de 90° em relação à tensão do sistema elétrico. Por outro lado, se a magnitude da tensão for variada continuamente, porém com amplitude maior que a da rede, pode-se obter potência reativa capacitiva e o STATCOM passa a operar como um banco de condensadores (indutores) variáveis, gerando correntes adiantadas de 90° .

FIGURA 13 –DIAGRAMAS FASORIAIS DAS RELAÇÕES ENTRE O SISTEMA ELÉTRICO E O STATCOM



FONTE: Tortelli (2010)

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada uma breve descrição dos principais tipos de controladores FACTS, buscando mostrar suas características e as diferenças tecnológicas entre a primeira e a segunda geração desses dispositivos. Também, foi abordado o princípio de funcionamento dos controladores SVC e STATCOM, e os parâmetro de controle de cada dispositivo.

Foram abordados os dispositivos da primeira geração de controladores, que são baseados na ação de chaves tiristorizadas, tendo como representantes desta tecnologia os controladores SVC, TCSC e TCPS. Esses dispositivos são caracterizados como reatâncias equivalentes do ponto de vista de atuação no sistema elétrico.

Para a segunda geração de controladores foram abordados os controladores STATCOM, SSSC, UPFC e HVDC-VSC, que tem como base conversores baseados na ação de chaves autocomutadas.

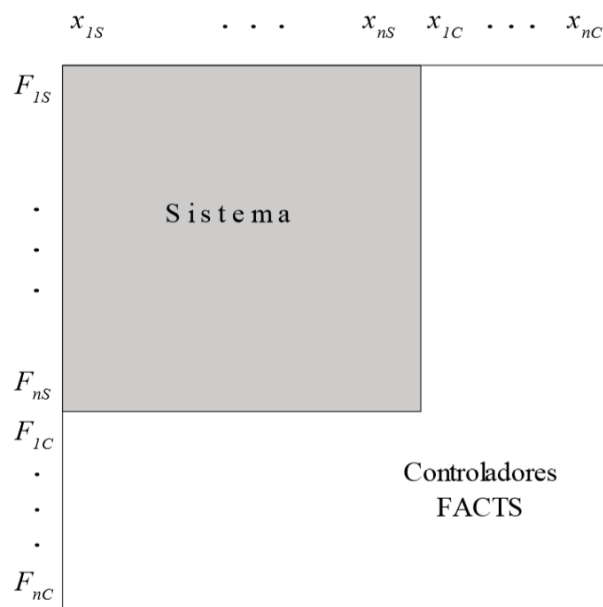
Foi ainda descrito detalhadamente o funcionamento dos controladores SVC da primeira geração e STATCOM da segunda geração de controladores, visando a aplicação ao sistema de distribuição para o controle de tensão.

4 FLUXO DE POTÊNCIA INCLUINDO CONTROLADORES FACTS

4.1 INTRODUÇÃO

Com a inclusão de controladores do sistema de distribuição ocorre um aumento nas dimensões da matriz Jacobiana, que depende do número adicional de equações introduzidas pelos dispositivos D-FACTS em função do número de variáveis que estes dispositivos controlam, conforme pode ser observado na FIGURA 14.

FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DA MATRIZ JACOBIANA COM A INCLUSÃO DE CONTROLADORES



FONTE: Tortelli (2010)

4.2 MODELAGEM DO CONTROLADOR D-FACT SVC

O SVC pode assumir diversas representações para ser incluso no cálculo de fluxo de potência. Uma modelagem possível seria caracterizar o SVC como um gerador com limite de potência reativa e injeção nula de potência ativa e, então, a barra onde o dispositivo está conectado seria tratada como uma barra do tipo PV.

Entretanto, na prática o SVC pode ser tratado como uma reatância ajustável, que é controlada pelo ângulo de disparo dos tiristores (α). Assim, uma maneira de

modelar o SVC para a inclusão no algoritmo de fluxo de potência é considerá-lo uma susceptância *shunt* variável e que através do seu ajuste, é possível especificar uma magnitude de tensão desejada (PALI *et al.*, 2012).

O valor da susceptância B_{SVC} do SVC em função do valor do ângulo de disparo pode ser encontrado por (AMBRIZ-PÉREZ *et al.*, 2000):

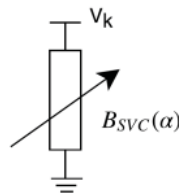
$$B_{SVC}(\alpha) = \frac{X_L - \frac{X_c}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)]}{-X_c \cdot X_L} \quad (4.1)$$

Onde X_c e X_L , são as reatâncias capacitiva e indutiva que constituem o controlador respectivamente.

Quando o SVC é incluído no programa de fluxo de potência, a barra que ele está conectado passa a ser uma barra do tipo PQV. Assim, é uma barra de carga com tensão controlada, onde são especificadas as potências ativa e reativa, e também a magnitude de tensão (TORTELLI, 2010).

A susceptância equivalente variável responsável pelo controle da magnitude da tensão da barra k , onde está conectado o SVC é mostrada na FIGURA 15.

FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DO SVC



FONTE: Tortelli (2010)

A equação que define a injeção de potência reativa do SVC à barra do sistema onde está conectado (k) é dada pela expressão (4.2). Como o SVC é caracterizado como uma reatância pura, não injeta ou absorve potência ativa do sistema, portanto fica evidente a relação entre fluxo de potência reativo e a magnitude de tensão.

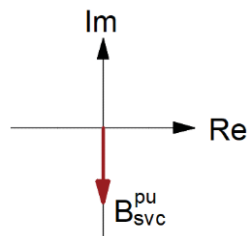
$$Q_k^{SVC} = -V_k^2 \cdot B_{SVC}(\alpha) \quad (4.2)$$

A estrutura da matriz Jacobiana associada à solução do fluxo de potência pelo método Newton-Raphson, será modificada com a inclusão de um controlador SVC na barra k de um determinado sistema, conforme a expressão (4.3). A susceptância variável B_{SVC} será considerada como uma nova variável de estado, no lugar da magnitude de tensão da barra (V_k), que passa a ser um valor especificado. As submatrizes $H = \partial P_k / \partial \theta_m$ e $M = \partial Q_k / \partial \theta_m$ não sofrem alteração com a inclusão do controlador.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & H & 0 & \\ & M & \frac{\partial Q_k}{\partial B_{SVC}} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta B_{SVC} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

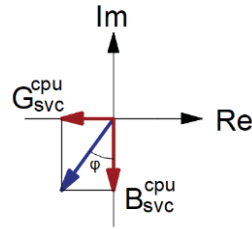
Quando considerada a aplicação da normalização complexa sobre o sistema, com a inclusão do SVC, o dispositivo não será representado somente por uma susceptância variável, conforme pode ser visto na FIGURA 16.

FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO SVC SUSCEPTÊNCIA PURA



FONTE: A autora (2019).

Com a aplicação da cpu passará a ser representado por uma admitância variável, com uma parcela real e imaginária conforme FIGURA 17.

FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO SVC COM *cpu*

FONTE: A autora (2019)

Portanto, susceptância *shunt* variável em pu (B_{SVC}^{pu}) passará a ser representada por:

$$Y_{SVC}^{cpu} = G_{SVC}^{cpu}(\alpha) + jB_{SVC}^{cpu}(\alpha) \quad (4.4)$$

Portanto, deve-se considerar que o SVC também injeta potência ativa à barra em que está conectada. Então a injeção complexa fornecida pelo SVC na barra k será dada pelas equações:

$$P_k^{SVC,cpu} = +V_k^2 \cdot G_{SVC}^{cpu}(\alpha) \quad (4.5)$$

$$Q_k^{SVC,cpu} = -V_k^2 \cdot B_{SVC}^{cpu}(\alpha) \quad (4.6)$$

Com esta consideração, mais uma variável seria acrescentada ao problema de fluxo de potência: a condutância $G_{SVC}^{cpu}(\alpha)$. Assim, seriam duas variáveis independentes no sistema de equações não-lineares em *cpu* para representar somente uma variável do sistema em pu. Desta forma durante a resolução do método, não existiria garantia de que $G_{SVC}^{cpu}(\alpha)$ e $B_{SVC}^{cpu}(\alpha)$, ao serem convertidas para pu, corresponderiam somente a uma susceptância $B_{SVC}^{cpu}(\alpha)$. Com esta formulação não haveria garantia de que $Y_{SVC}^{cpu} = G_{SVC}^{cpu}(\alpha) + jB_{SVC}^{cpu}(\alpha)$ resultaria em $Y_{SVC}^{cpu} = 0 + jB_{SVC}^{cpu}(\alpha)$.

Para resolver este problema o cálculo de $B_{SVC}(\alpha)$ será considerado em pu, enquanto as injeções de potência relacionados ao SVC serão calculadas em *cpu*. Assim, são consideradas as seguintes relações:

$$G_{SVC}^{cpu} = G_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \cos \varphi_{base} + B_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \sin \varphi_{base} \quad (4.7)$$

$$B_{SVC}^{cpu} = -G_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \sin \varphi_{base} + B_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \cos \varphi_{base} \quad (4.8)$$

Como nestas equações tem-se que $G_{SVC}^{pu}(\alpha) = 0$, devido a modelagem do controlador, as seguintes relações são obtidas:

$$G_{SVC}^{cpu} = B_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \sin \varphi_{base} \quad (4.9)$$

$$B_{SVC}^{cpu} = B_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \cos \varphi_{base} \quad (4.10)$$

Assim, substituindo as equações (4.9) e (4.10) em nas equações (4.5) e (4.6) respectivamente, obtém-se:

$$P_k^{SVC,cpu} = +V_k^2 \cdot B_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \sin \varphi_{base} \quad (4.11)$$

$$Q_k^{SVC,cpu} = -V_k^2 \cdot B_{SVC}^{pu}(\alpha) \cdot \cos \varphi_{base} \quad (4.12)$$

Consequentemente, as injeções de potência causadas pela presença do SVC na barra k passam a ser dadas pelas equações (4.11) e (4.12). Ao utilizarmos estas considerações, os sistemas de equações não-lineares para a barra k com presença do SVC resultante será:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k^{cpu} \\ \Delta Q_k^{cpu} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & H^{cpu} & \partial P_k^{cpu} / \partial B_{SVC}^{pu} & \\ & M^{cpu} & \partial Q_k^{cpu} / \partial B_{SVC}^{pu} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta B_{SVC}^{pu} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Onde:

- H^{cpu} e M^{cpu} são as submatrizes da jacobiana do Método de Newton-Raphson, porém, calculadas no sistema por unidade complexa;
- $\partial P_k^{\text{cpu}} / \partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}$ é a derivada parcial da injeção de potência ativa em cpu pela susceptância do SVC em pu. Dada por:

$$\frac{\partial P_k^{\text{cpu}}}{\partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}} = V_k^2 \cdot \sin \varphi_{\text{base}} \quad (4.14)$$

- $\partial Q_k^{\text{cpu}} / \partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}$ é a derivada parcial da injeção de potência reativa em cpu pela susceptância do SVC em pu. Dada por:

$$\frac{\partial Q_k^{\text{cpu}}}{\partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}} = -V_k^2 \cdot \cos \varphi_{\text{base}} \quad (4.15)$$

Como o método considerado para o cálculo de fluxo de potência é o desacoplado-rápido (FPDR), então simplificações adicionais devem ser aplicadas às derivadas da matriz jacobiana. A primeira simplificação é o desacoplamento entre os problemas $P - \theta$ e $Q - V$, assim, o termo $\partial P_k^{\text{cpu}} / \partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}$ pode ser desconsiderado. No termo $\partial Q_k^{\text{cpu}} / \partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}$ considerando a aproximação de todas as tensões para 1 pu, então a equação (4.15) passa a ser:

$$\left(\frac{\partial Q_k^{\text{cpu}}}{\partial B_{\text{SVC}}^{\text{pu}}} \right)_{\text{DR}} = -\cos \varphi_{\text{base}} \quad (4.16)$$

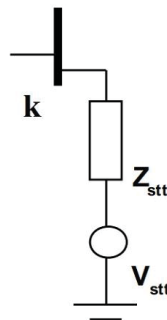
Após cada iteração v , a susceptância $B_{\text{SVC}}(\alpha)$ deve ser atualizada de acordo com a equação:

$$B_{\text{SVC}}^{u+1} = B_{\text{SVC}}^u + \Delta B_{\text{SVC}}^u \quad (4.17)$$

4.3 MODELAGEM DO CONTROLADOR D-STATCOM

O STATCOM caracteriza-se basicamente pela associação de um compensador do tipo VSC conectado como um elemento shunt que controla a magnitude da tensão da barra de carga em que está conectado injetando ou absorvendo potência reativa. O circuito equivalente em regime permanente deste dispositivo pode ser observado na FIGURA 18.

FIGURA 18 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO STATCOM EM REGIME PERMANENTE



FONTE: Tortelli (2010)

A fonte de tensão V_{stt} e a impedância Z_{stt} são de natureza complexa e são representadas pelas equações:

$$\dot{V}_{STT} = V_{STT} \cdot e^{j\theta_{STT}} \quad (4.18)$$

$$\dot{Z}_{STT} = (G_{STT} + jB_{STT})^{-1} \quad (4.19)$$

Ainda, é considerado que o STATCOM não apresenta perdas de potência ativa, implicando que a defasagem angular entre a fonte de tensão que representa o controlador e a tensão na barra k onde está conectado seja também nula, portanto:

$$P_{STT} = 0 \therefore \theta_{STT} = \theta_k \quad (4.20)$$

Assim, as variáveis associadas com a presença do STATCOM no sistema são: injeção ou absorção de potência reativa (Q_{STT}) e sua magnitude de tensão (V_{STT}). Desta forma, a potência reativa pode ser expressa por:

$$Q_{STT} = -V_{STT}^2 \cdot B_{STT} + V_{STT} \cdot V_k \cdot B_{STT} \quad (4.21)$$

Para a implementação do controlador no algoritmo de cálculo de fluxo de potência, sua ação de controle se dá pela especificação do valor desejado para V_k . Dessa forma, como no caso do SVC, a barra de carga passa a ser tratada como uma barra do tipo PQV. A tensão V_{STT} passa a ser a variável de controle (variável de estado) considerada.

Consequentemente as modificações necessárias na matriz jacobiana do método de Newton-Raphson são dadas por (TORTELLI, 2010):

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_{STT} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & H & 0 & \\ & 0 & \frac{\partial Q_{STT}}{\partial V_{STT}} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_{STT} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Analisando a expressão (4.22) percebe-se que não há mudança na dimensão do problema, mas apenas a substituição de uma variável de estado por outra, com a consequente alteração nos elementos associados da matriz Jacobiana.

Ao considerarmos o sistema por unidade complexa (cpu), é preciso considerar a injeção artificial de potência ativa fornecida pelo STATCOM. Pela equação (4.20) a injeção de potência ativa foi considerada nula, portanto a condutância do STATCOM é nula ($G_{STT} = 0$). Mas, se existisse a injeção de potência ativa ela seria dada por:

$$P_{STT} = V_{STT}^2 \cdot G_{STT} - V_{STT} \cdot V_k \cdot G_{STT} \quad (4.23)$$

Consequentemente, com as equações (4.21) e (4.23) adicionadas pelo STATCOM quando considerado a normalização complexa, implica na reformulação da matriz jacobiana que passa a ser dada por:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P'_k \\ \Delta Q'_k \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & H' & N' & \\ & M' & L' & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_{STT} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Comparando (4.22) e (4.24) percebe-se a modificação que ocorre no vetor do lado esquerdo do sistema de equações não-lineares, assim afetando diretamente a formulação da matriz jacobiana. Enquanto que em (4.22) utiliza-se a injeção de potência reativa do STATCOM no lado esquerdo da equação, em (4.24) é utilizada a injeção de potência da barra a qual o STATCOM está conectado, tanto para a injeção ativa quanto reativa, ocasionando a presença dos elementos P'_k , Q'_k , H' , N' , M' e L' em (4.24). Estes elementos são dados por:

$$P'_k = P_k + P_{STT} \quad (4.25)$$

$$Q'_k = Q_k + Q_{STT} \quad (4.26)$$

Assim, para o elemento H'_{kk} :

$$H'_{kk} = \frac{\partial P'_k}{\partial \theta_k} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} + \frac{\partial P_{STT}}{\partial \theta_k}$$

$$H'_{kk} = H_{kk} + V_{STT} \cdot V_k \cdot [G_{STT} \cdot \sin \theta_{STT,k} - B_{STT} \cdot \cos \theta_{STT,k}]$$

Assumindo $\theta_{STT} = \theta_k$:

$$H'_{kk} = H_{kk} + V_{STT} \cdot V_k \cdot B_{STT}$$

O STATCOM tem influência nas injeções de potência apenas na barra em que está conectado, portanto:

$$H'_{km} = \frac{\partial P'_k}{\partial \theta_m} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} + \frac{\partial P_{STT}}{\partial \theta_m} = H_{km} + 0 = H_{km}$$

Logo:

$$\begin{cases} H'_{kk} = H_{kk} + V_{STT} \cdot V_k \cdot B_{STT} \text{ para } k = m \\ H'_{km} = H_{km} \text{ para } k \neq m \end{cases} \quad (4.27)$$

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para os elementos H'_{kk} e H'_{km} , obtém-se:

$$\begin{cases} N'_{kk} = 2 \cdot V_{STT} \cdot G_{STT} + V_k \cdot G_{STT} \text{ para } k = m \\ N'_{km} = 0 \text{ para } k \neq m \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\begin{cases} M'_{kk} = M_{kk} + V_{STT} \cdot V_k \cdot G_{STT} \text{ para } k = m \\ M'_{km} = M_{km} \text{ para } k \neq m \end{cases} \quad (4.29)$$

$$\begin{cases} L'_{kk} = 2 \cdot V_{STT} \cdot B_{STT} + V_k \cdot B_{STT} \text{ para } k = m \\ L'_{km} = 0 \text{ para } k \neq m \end{cases} \quad (4.30)$$

Ao aplicarmos as considerações do FP-DR as equações (4.27), (4.28), (4.29) e (4.30), os elementos N' e M' passam a ser inexistente, devido ao desacoplamento entre os problemas $P - \theta$ e $Q - V$. Já os elementos H' , L' passam a ser dados por, considerando que o STATCOM está conectado à barra k por:

$$\begin{cases} H'_{kk} = B'_{kk} + B_{STT} \text{ para } k = m \\ H'_{km} = B'_{km} \text{ para } k \neq m \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\begin{cases} L'_{kk} = -B_{STT} \text{ para } k = m \\ L'_{km} = 0 \text{ para } k \neq m \end{cases} \quad (4.32)$$

Sendo B'_{kk} e B'_{km} os elementos da matriz jacobiana do FPDR do subproblema ativo. Porém, ao implementar o FPDR devemos desconsiderar a equação (4.31), conforme afirmam Stott e Alsac (1973) os elementos shunt do sistema não devem ser incluídos na matriz B' (matriz jacobiana do subproblema reativo), pois geraria uma piora no processo de convergência.

Assim, aplicando a normalização complexa ao sistema com a inclusão do STATCOM, pode-se considerar que $G_{STT}^{pu} = 0$, então:

$$G_{STT}^{cpu} = B_{STT}^{pu} \cdot \sin \varphi_{base} \quad (4.33)$$

$$B_{STT}^{cpu} = B_{STT}^{pu} \cdot \cos \varphi_{base} \quad (4.34)$$

E substituindo as equações (4.33) e (4.34) nas equações do FPNR, tem-se:

$$\begin{cases} H'_{kk} = H_{kk} + V_{STT} \cdot V_k \cdot B_{STT}^{pu} \cdot \cos \varphi_{base} & \text{para } k = m \\ H'_{km} = H_{km} & \text{para } k \neq m \end{cases} \quad (4.35)$$

$$\begin{cases} N'_{kk} = 2 \cdot V_{STT} \cdot B_{STT}^{pu} \cdot \sin \varphi_{base} + V_k \cdot B_{STT}^{pu} \cdot \sin \varphi_{base} & \text{para } k = m \\ N'_{km} = 0 & \text{para } k \neq m \end{cases} \quad (4.36)$$

$$\begin{cases} M'_{kk} = M_{kk} + V_{STT} \cdot V_k \cdot B_{STT}^{pu} \cdot \sin \varphi_{base} & \text{para } k = m \\ M'_{km} = M_{km} & \text{para } k \neq m \end{cases} \quad (4.37)$$

$$\begin{cases} L'_{kk} = 2 \cdot V_{STT} \cdot B_{STT}^{pu} \cdot \cos \varphi_{base} + V_k \cdot B_{STT}^{pu} \cdot \cos \varphi_{base} & \text{para } k = m \\ L'_{km} = 0 & \text{para } k \neq m \end{cases} \quad (4.38)$$

Portanto, para o FPDR, tem-se:

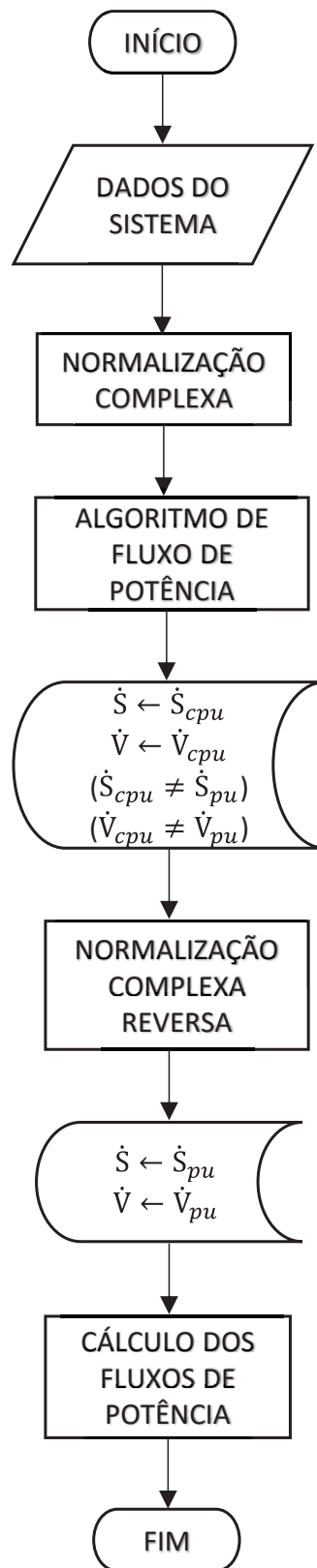
$$\begin{cases} L'_{kk} = -B_{STT}^{pu} \cdot \cos \varphi_{base} & \text{para } k = m \\ L'_{km} = 0 & \text{para } k \neq m \end{cases} \quad (4.39)$$

4.4 METODOLOGIA PROPOSTA

A aplicação da normalização complexa permite ajustar as relações X/R do sistema de distribuição para valores típicos de sistemas de transmissão. Para isso é necessário adotar um valor de ângulo base para o sistema todo, pois para cada sistema de distribuição esse ângulo base terá valores diferentes.

A metodologia proposta consiste na aplicação da normalização complexa aos dados originais do sistema, com a modelagem dos controladores, que serão incluídos no fluxo de potência desacoplado rápido. Por fim, é determinada a solução do fluxo de potência pelas versões BX e XB. Após a convergência ser obtida, as variáveis de estado encontradas terão o mesmo valor que seriam obtidos pela aplicação da normalização convencional. Consequentemente o fluxo de potência pode então ser calculado para todos os elementos do sistema após a aplicação da normalização complexa reversa. A FIGURA 19 resume o algoritmo utilizado.

FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO



FONTE: A autora (2019)

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo tratou-se da incorporação dos modelos de Controladores D-SVC e D-STATCOM alternadamente e simultaneamente à rotina de cálculo de fluxo de potência baseado no método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido.

Foram descritas de maneira detalhada as alterações proporcionadas no equacionamento geral do problema convencional, bem como as novas variáveis associadas à ação dos controladores.

Finalmente, foi apresentada a metodologia proposta para a incorporação da normalização complexa na solução do fluxo de potência juntamente com a modelagem dos controladores D-FACTS e sua inserção do fluxo de potência desacoplado rápido. Com a aplicação da cpu os valores dos fluxos de potência calculados são diferentes dos valores em pu, sendo portanto necessário realizar a normalização complexa reversa para se determinar os valores de fluxo de potência do sistema. Uma vantagem da normalização complexa é sua fácil incorporação a qualquer problema do sistema de potência.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os sistemas-teste utilizados para as simulações, bem como os resultados obtidos. As metodologias apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas em ambiente MATLAB®.

Para realizar as simulações foram escolhidos dois sistemas de distribuição: de 69 barras e de 136 barras radiais. Para testar a eficiência da metodologia, eles serão alterados de forma a apresentarem topologias malhadas e com inserção de geração distribuída. A geração distribuída acrescentada será de 200 kW em cada barra dos sistemas-teste, exceto na barra de referência de cada sistema. Essa elevada participação de GD é considerada para indicar um caso de extrema geração no sistema de distribuição. O número máximo de iterações considerado para a convergência das simulações foi 100. Foram utilizados diferentes casos denominados de:

- Caso A: sem GD e sem a inserção de controlador;
- Caso B: sem GD e com inserção de controlador;
- Caso C: com GD e com inserção de controlador;
- Caso D: com GD e sem inserção de controlador.

Segundo Van Amerongen (1989), o fluxo de potência desacoplado rápido deve ser aplicado prioritariamente em redes elétricas com elevadas relações X/R , tipicamente maiores que 3,0. Para os sistemas considerados a relação X/R média é de 2,07 (sistema 69 barras) e 1,58 (sistema 136 barras). Ainda, para Monticelli *et al.* (1990), para redes elétricas que apresentam baixas relações X/R , são indicadas as versões BX e XB para o método desacoplado rápido por apresentarem boas características de convergência. Portanto, as simulações realizadas no trabalho consideram estas duas versões.

Com relação à aplicação da normalização complexa, foi feita uma avaliação exaustiva inicial para todos os sistemas com diferentes ângulos base, variando-o desde 0° até 90° , em ângulos múltiplos de 5. Após essa varredura inicial, é possível

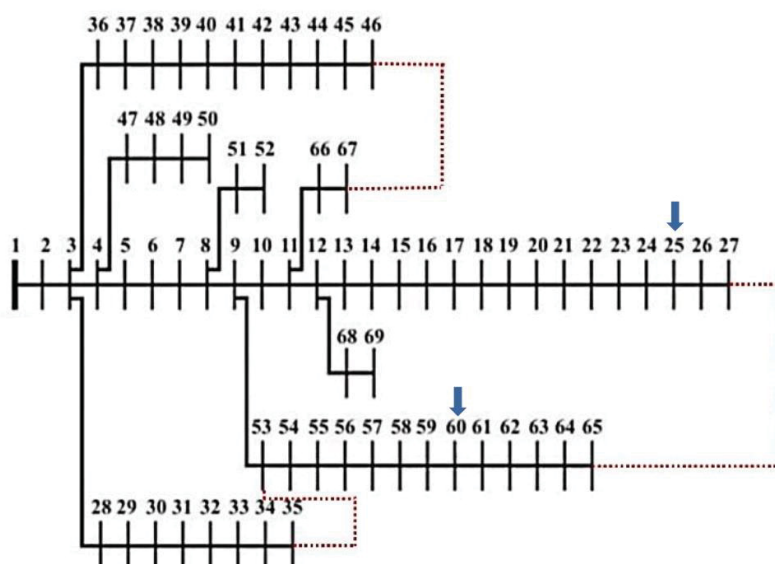
identificar para qual região angular houve melhor convergência para os sistemas estudados.

Em ambos os sistemas foi considerada a inserção de dois controladores SVC e STATCOM. Para a escolha das barras onde os controladores seriam alocados, levou-se em conta o estabelecido pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST - Módulo 8) (ANEEL, 2018), que considera para pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV, a tensão de atendimento adequada quando a faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR) está na faixa de $0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$. Portanto, as barras que não atenderam este critério foram selecionadas como candidatas.

5.2 SISTEMA TESTE DE 69 BARRAS

Na FIGURA 20 é apresentado o sistema de 69 barras radial com relações X/R típicas de sistema de distribuição. Seus dados podem ser encontrados no artigo de Eminoglu *et al* (2010). Também são mostradas as três malhas que foram consideradas, indicadas pelas linhas tracejadas.

FIGURA 20 – SISTEMA-TESTE 69 BARRAS RADIAL



FONTE: Adaptado de Durce (2012)

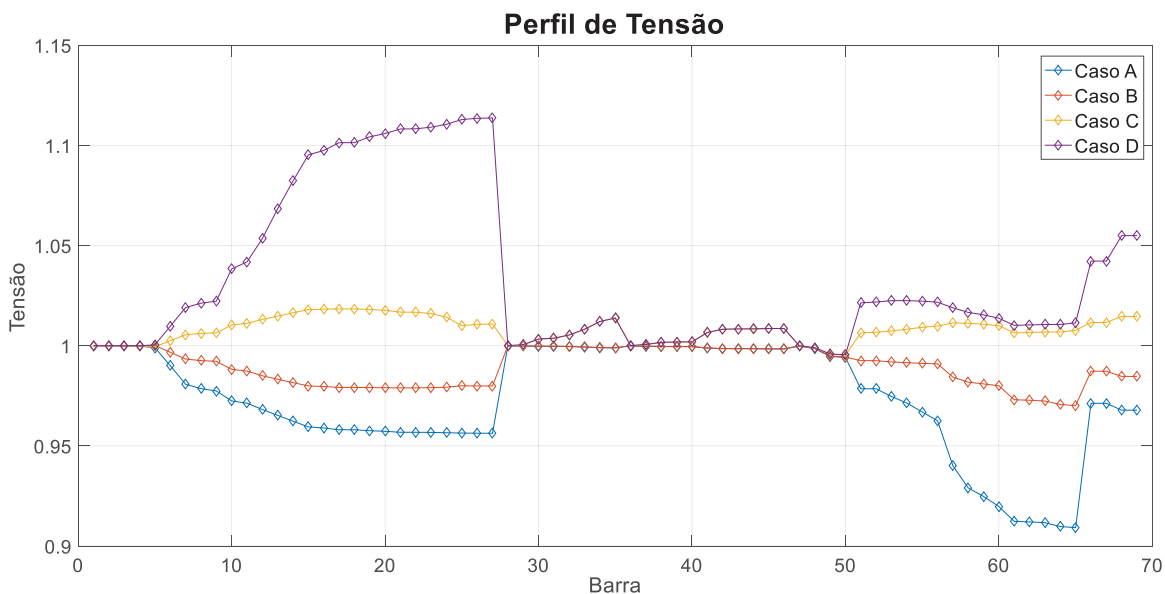
Para determinar a barra onde seria inserido o controlador, foi realizado o cálculo do fluxo de potência para o Caso A. Então verificou-se que, na região das barras 15 - 27 e na região das barras 57 – 65, existia uma maior diminuição da tensão. Assim, foi definido que os controladores seriam inseridos nas barras 25 e 60, cujos valores de tensão são respectivamente iguais a 0,9564 pu e 0,9197 pu. Portanto, nestas barras ficou definido que o controlador que fosse inserido na barra 25 teria a tensão de 0,98 pu, e o controlador da barra 60 teria como tensão definida 1,01 pu. Esses valores de tensão foram arbitrados para que os valores originais de tensão das barras escolhidas ficassem próximos de 1 pu.

Com o objetivo de verificar a ação dos dois controladores e a efetividade da modelagem proposta, foram realizadas as seguintes combinações para a inserção destes dispositivos:

- Dois SVC um em cada barra selecionada (25,60);
- Dois STATCOM um em cada barra selecionada (25,60);
- Um SVC na barra 25 e um STATCOM na barra 60;
- Um SVC na barra 60 e um STATCOM na barra 25.

Realizando as simulações com os quatro casos indicados anteriormente, e com os valores de tensão especificados para controle nas barras selecionadas como definido acima, obteve-os perfis de tensão apresentados na FIGURA 21. É importante salientar que os valores de tensão obtidos são os mesmos independente da combinação de controladores considerada.

FIGURA 21 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA RADIAL

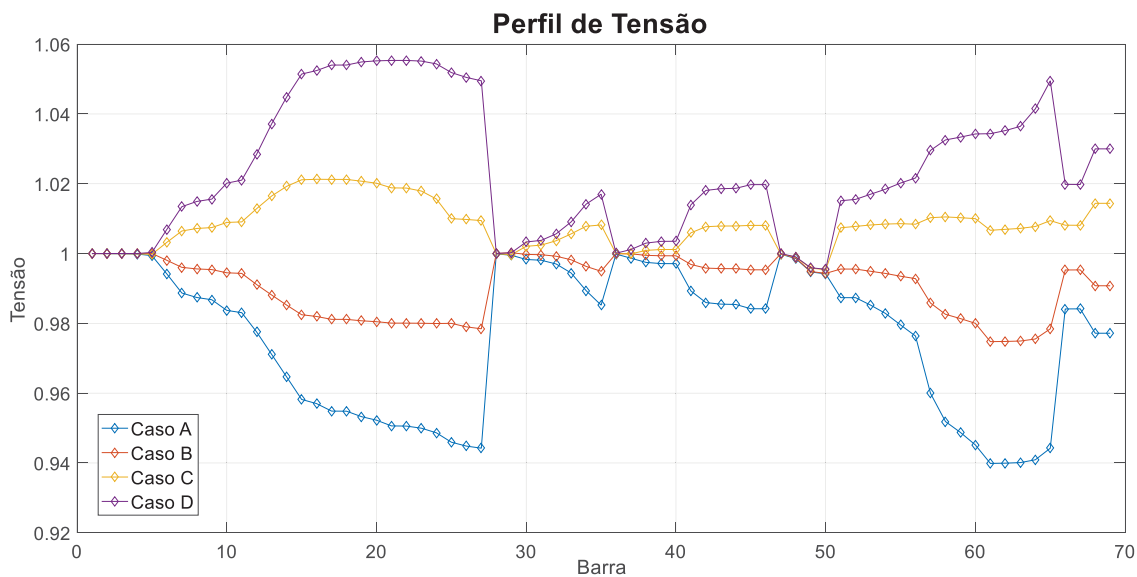


FONTE: A autora (2019).

A alta participação de GD considerada nos casos B e C, faz do alimentador um sistema ativo que injeta energia através do barramento de conexão com o sistema de transmissão, ao invés de absorvê-la, como nos casos A e D. Como pode ser visto, na FIGURA 21 em todos os casos, com e sem a participação de GD, os controladores são capazes de reduzir o desvio de tensão, ajudando a manter os níveis de tensão do alimentador mais próximos do valor nominal.

Como o sistema de distribuição original é radial, para simular uma operação em rede malhada foram fechada três malhas que podem ser observado na FIGURA 20, indicadas pelas linhas tracejadas vermelhas. Na FIGURA 22 é apresentado o perfil de tensão para a topologia malhada, referente aos mesmos quatro casos teste.

FIGURA 22 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA MALHADO



FONTES: A autora (2019).

Os valores de tensão obtidos nas barras com controlador, nas operações radial e em malha, podem ser vistos na TABELA 1.

TABELA 1– TENSÕES NAS BARRAS COM CONTROLADORES (BARRA 25-SVC / BARRA 60-STATCOM)

Topologia	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
RADIAL	0,9564/0,9197	0,98/1,01	0,98/1,01	1,1129/1,0137
MALHADO	0,9459/0,9451	0,98/1,01	0,98/1,01	1,0518/1,03427

FONTES: A autora (2019).

Como esperado, as formas alternativas criadas pelas malhas contribuem para um melhor perfil de tensão. Ao mesmo tempo, esses resultados reforçam a eficácia da proposta em avaliar a participação de controladores em alimentadores de distribuição ativa em qualquer condição topológica.

Para destacar a relevância da normalização da *cpu* em relação à eficiência de convergência da análise de fluxo de potência foram realizadas diversas simulações com as possíveis combinações para a inserção de dois controladores na rede de distribuição analisada, e também com duas topologias: radial e malhada.

Para determinar o ângulo base para a *cpu*, foram de 5° em 5° graus, o ângulo que apresentou o menor número de iterações foi o de 65°, que foi adotado como ângulo base ideal para o sistema todo.

A TABELA 2 apresenta o caso em que dois controladores SVC são inseridos nas barras 25 e 60 do sistema. Para a versão BX considerando o sistema radial, para os quatro casos o sistema convergiu. Porém, ao se utilizar a normalização complexa o número de iterações sofreu uma redução significativa para os Casos A, C e D. O que demonstra a eficiência no ajuste da relação X/R com o uso da *cpu*. Já para a versão XB quando considerado o fluxo de potência convencional para os Casos B e C, o sistema não converge. Porém, com a utilização da normalização complexa ocorre a convergência para todos os casos, além de apresentar uma redução próxima de 50% nos casos em que já ocorria a convergência sem a utilização da *cpu*. Para a simulação do sistema malhado para versão BX ocorre uma redução mais evidente do número de iterações para os Casos C e D, e também para os outros casos. Com a aplicação da *cpu*, o número de iterações para todos os casos sofre uma redução novamente. Novamente, na versão XB para os Casos B e C no método convencional o sistema não converge, mas com a utilização da normalização complexa para os quatro casos o sistema converge.

TABELA 2 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NAS BARRAS 25 E 60 SISTEMA 69 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com <i>cpu</i> (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com <i>cpu</i> (XB) n° P/n° Q
Radial	A	16/15	9/8	20/20	9/8
	B	28/27	25/24	nc	25/24
	C	80/80	24/23	nc	23/22
	D	30/29	10/9	15/15	9/9
Malhado	A	16/15	9/8	16/16	9/9
	B	28/27	25/24	nc	17/16
	C	80/80	15/14	nc	13/13
	D	30/29	9/8	14/14	9/8

FONTE: O autora (2019).

Para a combinação de dois STATCOM nas barras 25 e 60 do sistema, a mais expressiva, foi quando a rede considerada é malhada e sem utilizar a *cpu* ocorre uma diminuição no número de iterações. Isto se deve ao fato do sistema ter ficado malhado, o que atende um dos critérios para o uso do método de Newton-Raphson desacoplado rápido, ou seja, ser um sistema em malha, conforme pode ser observado na TABELA 3.

TABELA 3 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM STATCOM NAS BARRAS 25 E 60 SISTEMA 69 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	16/15	9/8	20/20	9/8
	B	28/27	25/24	nc	25/24
	C	80/80	26/25	nc	24/24
	D	30/29	10/9	15/15	9/9
Malhado	A	15/14	9/8	16/16	9/9
	B	19/18	21/20	nc	16/15
	C	24/23	11/11	nc	13/13
	D	21/20	8/8	14/14	9/8

FONTE: O autora (2019).

Nas tabelas TABELA 4 e TABELA 5, são apresentados os resultados da simulações quando são utilizados um SVC e um STATCOM nas barras selecionadas alternadamente. Os resultados são iguais quando um SVC na barra 25 e um STATCOM na barra 60, da mesma forma que se for inserido um SVC na barra 60 e um STATCOM na barra 25. Novamente, para esta situação, percebe-se que para a versão BX, tanto convencional quanto com cpu para os quatro casos o sistema, converge com uma diminuição neste número para os casos C e D. Para a versão XB, sem utilizar cpu, os casos B e C não convergiram, porém, com a aplicação da normalização complexa, todos os casos convergiram. E para os casos em que ocorreu convergência sem cpu o número de iterações diminuiram.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 25 E STATCOM NA BARRA 60 SISTEMA 69 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	16/15	9/8	20/20	9/8
	B	28/27	31/30	nc	25/24
	C	80/80	15/14	nc	23/22
	D	30/29	10/9	15/15	9/9
Malhado	A	15/14	9/8	16/16	9/9
	B	19/18	16/15	nc	16/15
	C	24/23	13/12	nc	13/13
	D	21/20	8/8	14/14	9/8

FONTE: O autora (2019).

TABELA 5 COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 60 E STATCOM NA BARRA 25 SISTEMA 69 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	16/15	9/8	20/20	9/8
	B	28/27	25/24	nc	25/24
	C	80/80	26/25	nc	24/24
	D	30/29	10/9	15/15	9/9
Malhado	A	15/14	9/8	16/16	9/9
	B	19/18	16/15	nc	16/15
	C	24/23	13/12	nc	13/13
	D	21/20	8/8	14/14	9/8

FONTE: O autora (2019).

Os valores obtidos para as variáveis de estado para os controladores SVC e STATCOM para os casos em que os dispositivos estavam ativos são mostrados nas TABELA 6, TABELA 7, TABELA 8 e TABELA 9:

TABELA 6 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 25	Barra 60
Dois SVC	$B_{SVC,25} = 56,1080$	$B_{SVC,60} = 531,3707$
Dois STATCOM	$V_{STT,25} = 0,9785$	$V_{STT,60} = 0,9660$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,25} = 56,1080$	$V_{STT,60} = 0,9600$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,25} = 0,9785$	$B_{SVC,60} = 531,3707$

FONTE: O autora (2019).

TABELA 7 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 25	Barra 60
Dois SVC	$B_{SVC,25} = -428,6046$	$B_{SVC,60} = 124,6286$
Dois STATCOM	$V_{STT,25} = 1,0213$	$V_{STT,60} = 1,0067$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,25} = -428,6046$	$V_{STT,60} = 1,0067$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,25} = 1,0213$	$B_{SVC,60} = 124,6286$

FONTE: O autora (2019).

TABELA 8 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 25	Barra 60
Dois SVC	$B_{SVC,25} = 166,2869$	$B_{SVC,60} = 305,5912$
Dois STATCOM	$V_{STT,25} = 0,9757$	$V_{STT,60} = 0,9720$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,25} = 166,2869$	$V_{STT,60} = 0,9720$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,25} = 0,9757$	$B_{SVC,60} = 305,5912$

FONTE: O autora (2019).

TABELA 9 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 25	Barra 60
Dois SVC	$B_{SVC,25} = -380,7623$	$B_{SVC,60} = 54,9904$
Dois STATCOM	$V_{STT,25} = 1,0201$	$V_{STT,60} = 1,0085$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,25} = -380,7623$	$V_{STT,60} = 1,0085$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,25} = 1,0201$	$B_{SVC,60} = 54,9904$

FONTE: O autora (2019).

Os valores obtidos para a susceptância shunt do SVC e a tensão do STATCOM são os mesmos quando são utilizados um de cada controlador em barras diferentes, ou seja, alternando as barras em que estão inseridos. Isto ocorre tanto para a topologia radial quanto para a malhada.

Como foi considerada uma elevada participação de GD fotovoltaica, o nível de penetração para o sistema de 69 barras, sabendo que a:

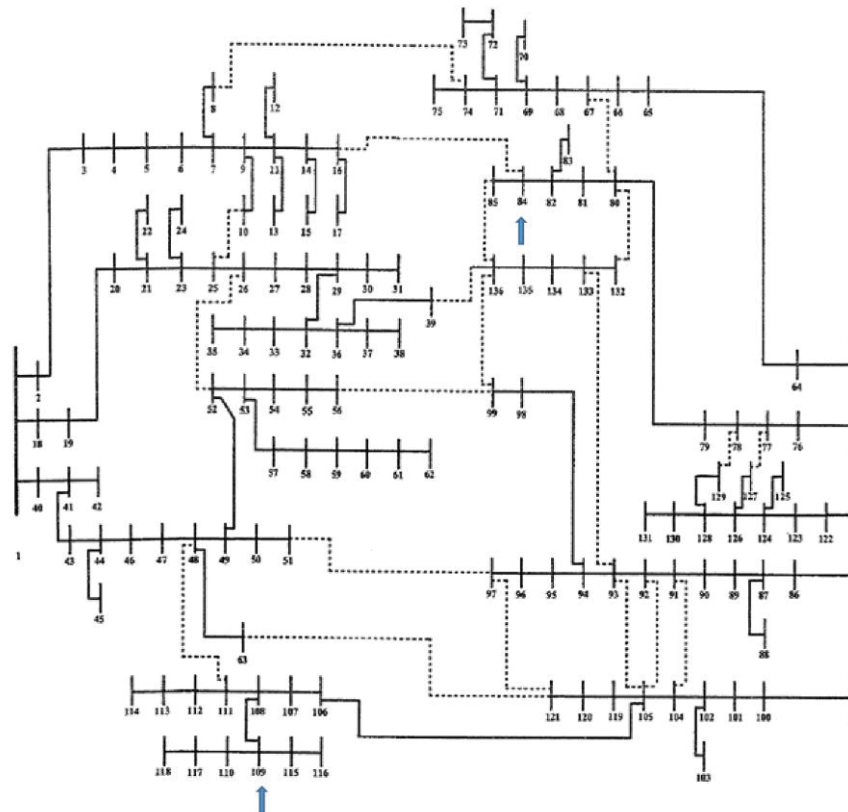
- Potência da geração fotovoltaica = 13,6 MW;
- Potência demandada pelo sistema = 4,56 MW.

Portanto o percentual de penetração para este sistema foi de 298,25 %.

5.3 SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS

Na FIGURA 23 é apresentado o sistema de 136 barras radial com relações X/R típicas de sistema de distribuição e seus dados de topologia podem ser encontrados em Lorenzetti (2004). Também são mostradas as malhas que foram incluídas, que estão indicadas pelas linhas tracejadas.

FIGURA 23 – SISTEMA-TESTE 139 BARRAS RADIAL



FONTE: Lorenzetti (2004)

Para determinar a barra onde seria inserido o controlador, foi realizado o cálculo do fluxo de potência para o Caso A. Com isso, então verificou-se que na região das barras 106 -118 existia uma diminuição da tensão. A barra 84, também está associada a segunda região do sistema considerado com maior queda de tensão. Como na simulação anterior, foi considerada a alocação de dois controladores. Dessa forma, foi definido que os controladores seriam inseridos nas barras 84 e 109 cujos valores de tensão são respectivamente iguais a 0,9720 pu e 0,9335 pu. Portanto, nestas barras ficou definido que o controlador que fosse inserido na barra 84 teria a tensão de 0,99 pu para o Caso B e de 1,00 pu para o Caso C, já o controlador da barra 109 teria como tensão definida de 0,95 pu para o Caso B e de 1,00 pu para o Caso C.

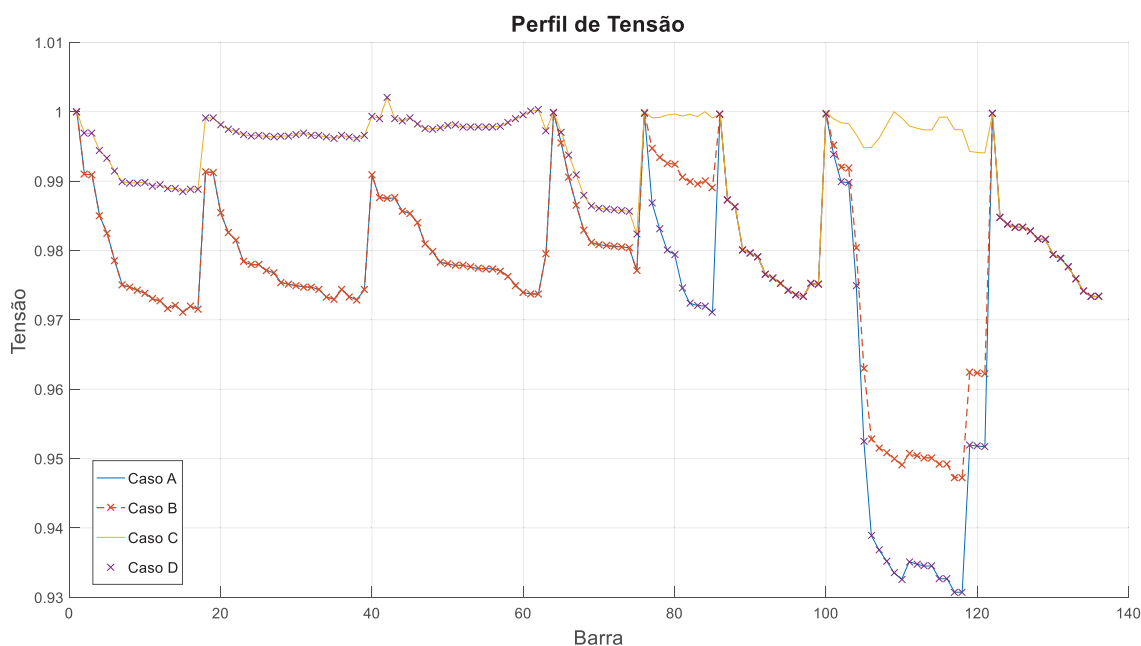
Além disso, como no estudo anterior, foram realizadas as seguintes combinações para a inserção destes dispositivos:

- Dois SVC um em cada barra selecionada (84,109);
- Dois STATCOM um em cada barra selecionada (84,109);

- Um SVC na barra 84 e um STATCOM na barra 109;
- Um SVC na barra 109 e um STATCOM na barra 84.

As simulações com os quatro casos citados anteriormente, e com as barras e valores de tensão controlados indicado acima, pode-se verificar os perfis de tensão apresentados na FIGURA 24.

FIGURA 24 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA RADIAL

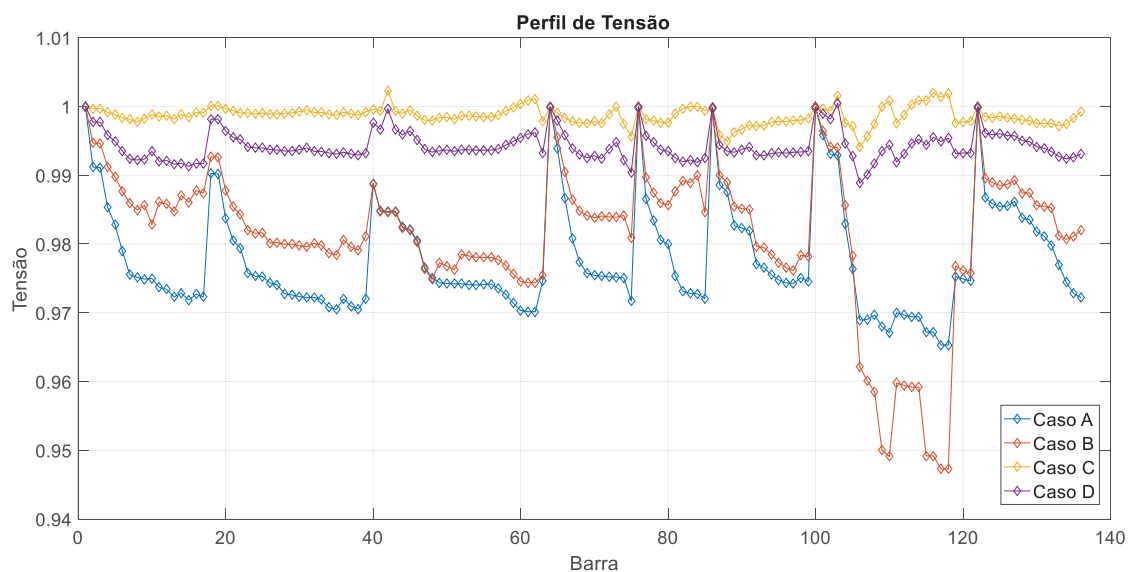


FONTE: A autora (2019).

A alta participação de GD considerada nos casos B e C, faz do alimentador um sistema ativo que injeta energia através do barramento de conexão com o sistema de transmissão, ao invés de absorvê-la, como nos casos A e D. Como pode ser visto, na FIGURA 24 em todos os casos, com e sem a participação de GD, os controladores são capazes de reduzir o desvio de tensão, ajudando a manter os níveis de tensão do alimentador mais próximos do valor nominal.

Como o sistema de distribuição original é radial, para simular uma operação em rede malhada foram fechadas 21 malhas, como pode ser observado na FIGURA 23, indicadas pelas linhas tracejadas pretas. Na FIGURA 25 é apresentado o perfil de tensão para a topologia malhada, referente aos mesmos quatro casos teste.

FIGURA 25 – PERFIL DE TENSÃO SISTEMA MALHADO



FONTE: A autora (2019).

Os valores de tensão obtidos nas barras controladas nas duas situações topológicas, podem ser vistos na TABELA 10.

TABELA 10 – TENSÕES NAS BARRAS COM CONTROLADORES

Topologia	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
RADIAL	0,9720/0,9335	0,99/0,95	1,00/1,00	0,9884/0,9803
MALHADO	0,9730/0,9679	0,99/0,95	1,00/1,00	0,9919/0,9935

FONTE: A autora (2019).

Como esperado, as formas alternativas criadas pelas malhas contribuem para um melhor perfil de tensão. Ao mesmo tempo, esses resultados reforçam a eficácia da proposta em avaliar a participação de controladores em alimentadores de distribuição ativa em qualquer condição topológica.

Para destacar a relevância da normalização da cpu em relação à eficiência de convergência da análise de fluxo de potência foram realizadas diversas simulações com as possíveis combinações para a inserção de dois controladores na rede de distribuição analisada, e também com duas topologias: radial e malhada.

Para determinar o ângulo base para a cpu, foram realizadas simulações de 5° em 5°. O ângulo base adotado foi de 40° por apresentar menor número de iterações para todos os casos de teste. Além disso, para ângulos base maiores que 65°, não foi obtida a convergência.

A TABELA 11 apresenta o caso em que dois controladores SVC são inseridos nas barras 84 e 109 do sistema. Tanto para a versão BX quanto para a versão XB para o sistema radial para os quatro casos o sistema convergiu. Cabe enfatizar que, tanto para o Caso B quanto para ambas as versões, ocorreu uma redução de 30% no número de iterações quando utilizada a normalização complexa.

Para a simulação do sistema malhado para versão BX ocorre uma redução para o Caso B quando utilizada a cpu. Para a versão XB para os Casos B e C foi obtida uma redução de 30% quando adotada a normalização complexa.

TABELA 11 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NAS BARRAS 84 E 109 SISTEMA 136 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	10/9	7/6	7/6	7/6
	B	12/11	8/8	15/15	7/7
	C	7/6	9/8	11/11	7/6
	D	7/6	6/5	7/7	5/5
Malhado	A	9/8	7/7	9/9	6/6
	B	12/12	9/8	29/29	10/10
	C	8/8	7/7	26/25	8/8
	D	8/7	6/6	9/9	6/5

FONTE: A autora (2019).

Para a combinação de dois STATCOM nas barras 84 e 109, a redução mais significativa para o número de iteração foram nos Casos B e C malhado com cpu, apresentando redução em torno de 40% do número de iterações, conforme mostra a TABELA 12.

TABELA 12 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM STATCOM NAS BARRAS 84 E 109 SISTEMA 136 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	10/9	7/6	7/6	7/6
	B	12/11	14/14	15/15	12/12
	C	9/8	11/14	11/11	13/13
	D	7/6	6/5	7/7	5/5
Malhado	A	9/8	6/6	9/9	6/6
	B	12/12	13/13	30/29	13/13
	C	9/9	14/14	26/26	14/13
	D	8/7	6/5	9/6	6/5

FONTE: A autora (2019).

Nas tabelas TABELA 13 e TABELA 14, são apresentados os resultados da simulações quando são utilizados um SVC e um STATCOM nas barras selecionadas, alternadamente. O número de iterações P e Q são praticamente o mesmo quando foi inserido um SVC na barra 25 e um STATCOM na barra 60, ou quando foi inserido um SVC na barra 60 e um STATCOM na barra 25, a diferença no número de iterações era em alguns casos de apenas uma unidade. E os resultados obtidos para as versões BX e XB. A redução mais significativa obtida foi para o caso malhado sem cpu, na versão BX ocorreu uma redução próxima de 34% para os Casos B e C.

TABELA 13 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 84 E STATCOM NA BARRA 109 SISTEMA 136 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	10/9	7/6	7/6	7/6
	B	12/11	14/14	15/15	12/12
	C	9/8	15/14	11/11	13/13
	D	7/6	6/5	7/7	5/5
Malhado	A	9/8	7/7	9/9	6/6
	B	12/12	15/14	30/29	13/13
	C	9/9	16/15	26/26	14/13
	D	8/7	6/6	9/9	6/5

FONTE: A autora (2019).

TABELA 14 – COMPARAÇÃO NÚMERO DE ITERAÇÕES COM SVC NA BARRAS 109 E STATCOM NA BARRA 84 SISTEMA 136 BARRAS

	Caso	FPDR (BX) n° P/n° Q	FPDR com cpu (BX) n° P/n° Q	FPDR (XB) n° P/n° Q	FPDR com cpu (XB) n° P/n° Q
Radial	A	10/9	7/6	7/6	7/6
	B	12/11	14/14	15/14	12/13
	C	9/8	15/14	11/11	13/13
	D	7/6	6/5	7/7	5/5
Malhado	A	9/8	7/7	9/9	6/6
	B	11/10	14/13	32/32	12/12
	C	9/9	16/15	26/26	14/13
	D	8/7	6/6	9/9	5/5

FONTE: A autora (2019).

Os valores obtidos para as variáveis de estado para os controladores SVC e STATCOM (em pu) para os casos em que os dispositivos estavam ativos são mostrados nas TABELA 15, TABELA 16, TABELA 17 e TABELA 18.

TABELA 15 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 84	Barra 109
Dois SVC	$B_{SVC,84} = 0,8810$	$B_{SVC,109} = 0,6082$
Dois STATCOM	$V_{STT,84} = 0,9881$	$V_{STT,109} = 0,9487$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,84} = 0,8810$	$V_{STT,109} = 0,9487$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,84} = 0,9881$	$B_{SVC,109} = 0,6082$

FONTE: A autora (2019).

TABELA 16 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA RADIAL CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 84	Barra 109
Dois SVC	$B_{SVC,84} = 0,5613$	$B_{SVC,109} = 0,6952$
Dois STATCOM	$V_{STT,84} = 0,9987$	$V_{STT,109} = 0,9984$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,84} = 0,5613$	$V_{STT,109} = 0,9984$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,84} = 0,9987$	$B_{SVC,109} = 0,6952$

FONTE: A autora (2019).

TABELA 17 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO B (SEM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 84	Barra 109
Dois SVC	$B_{SVC,84} = 7,7688$	$B_{SVC,109} = -4,6615$
Dois STATCOM	$V_{STT,84} = 0,9725$	$V_{STT,109} = 0,9598$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,84} = 7,7688$	$V_{STT,109} = 0,9589$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,84} = 0,9725$	$B_{SVC,109} = -4,6615$

FONTE: A autora (2019).

TABELA 18 VALORES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O SISTEMA MALHADO CASO C (COM GD E COM CONTROLADOR)

	Barra 84	Barra 109
Dois SVC	$B_{SVC,84} = 2,4353$	$B_{SVC,109} = 0,4761$
Dois STATCOM	$V_{STT,84} = 0,9945$	$V_{STT,109} = 0,9989$
Um SVC e um STATCOM	$B_{SVC,84} = 2,4353$	$V_{STT,109} = 0,9989$
Um STATCOM e um SVC	$V_{STT,84} = 0,9945$	$B_{SVC,109} = 0,4761$

FONTE: A autora (2019).

Os valores obtidos para a susceptância *shunt* do SVC e a tensão do STATCOM são os mesmos quando são utilizados um de cada controlador em barras diferentes, ou seja, alternando as barras em que estão inseridos. Isto ocorre tanto para a topologia radial quanto para a malhada.

Como foi considerada uma elevada participação de GD fotovoltaica, o nível de penetração para o sistema de 136 barras, sabendo que a:

- Potência da geração fotovoltaica = 27 MW;
- Potência demandada pelo sistema = 21,97 MW.

Portanto o percentual de penetração para este sistema foi de 122,89 %.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Neste documento é apresentado a modelagem matemática dos controladores FACTS e a sua inserção no método desacoplado rápido de solução do fluxo de potência associado à técnica de normalização complexa do sistema de potência, visando a análise da ação de controle desses dispositivos em redes de distribuição emergentes.

A normalização complexa permite ajustar artificialmente as relações X/R dos sistemas de distribuição a fim de tornar possível a utilização do método desacoplado rápido para a solução do fluxo de potência em redes com a dada topologia.

O presente trabalho foi capaz de verificar a ação de controle dos dispositivos FACTS frente a inserção de geração distribuída em todas as barras do sistema.

A utilização da normalização complexa permite a convergência do método desacoplado rápido em sistemas de distribuição com elevada relação X/R, mesmo em sistemas em que através da normalização convencional não é obtida convergência. A normalização complexa pode diminuir significativamente o número de iterações necessárias para a convergência do método conforme a escolha do ângulo base. A adequação das relações X/R depende da escolha deste ângulo adotado para a base de potência do sistema, possuindo diferentes pontos ótimos para diferentes sistemas de distribuição.

Dessa maneira, pode-se afirmar que a combinação da normalização complexa com o método Desacoplado Rápido se constitui em uma promissora ferramenta para análise de fluxo de potência em sistemas de distribuição com inserção de geração distribuída e com a participação de dispositivos de controle de tensão.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia apresentada neste trabalho pode contribuir com diferentes áreas de estudo do sistema de potência. Em sequência são apresentadas algumas sugestões para a continuidade da presente proposta:

- Incorporar dispositivos de controle série, para verificar sua ação em sistemas de distribuição malhados;
- Implementar o cálculo do ângulo base ótimo de maneira automatizada para cada tipo de sistema teste;
- Aprimoramento da metodologia para alocação de controladores na rede de distribuição;
- Aprimoramento da estratégia da modelagem do controlador SVC.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8. , 2018.

ALHEJJI, A. K.; SALEM, F.; MOSAAD, M. I. Optimal Location and Size of SVC Devices in Interconnected Electrical Power System Using Quadratic Adaptive Bacterial Foraging Algorithm. **IEEE International Conference on Electro Information Technology**, v. 2018-May, p. 817–821, 2018. IEEE.

AMBRIZ-PÉREZ, H.; ACHA, E.; FUERTE-ESQUIVEL, C. R. Advanced SVC models for Newton-Raphson load flow and Newton optimal power flow studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 1, p. 129–136, 2000.

VAN AMERONGEN, R. A. M. A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 4, n. 2, p. 760–770, 1989.

ANEEL, A. N. DE E. E. Caderno Temático Micro e minigeração distribuídas. **Cadernos Temáticos ANEEL**, p. 34, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false>.

ASEA BROWN BOVERI-ABB. Cerro Navia: FACTS for grid voltage stabilization and increased power transmission capability in Chile. Disponível em: <https://new.abb.com/facts/references/reference_cerro_navia>. Acesso em: 7/7/2019.

ASEA BROWN BOVERI-ABB. Extremoz: SVC para integração de energia eólica em uma rede de 230 kV. Disponível em: <<https://new.abb.com/facts/references/reference-extremoz>>. Acesso em: 6/7/2019.

ASLAM, W.; XU, Y.; SIDDIQUE, A.; *et al.* Numerical examination of 132/11 KV sub station through SVC FACTS device for voltage enhancement. **2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, iCoMET 2019**, p. 1–7, 2019. IEEE.

D. SHIRMOHAMMADI, H. W. HONG, A. SEMLEY, G. X. L. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. **Power**, v. 35, n. 3, p. 531–537, 1988.

DEEPMALA; KUMAR, A. Impact of load models on distribution system performance and impact of D-STATCOM. **Proceedings of 6th IEEE Power India International Conference, PIICON 2014**, 2014.

DURCE, C. C. **Normalização Complexa e Cálculo de Fluxo de Potência Para Sistemas Elétricos Emergentes**, 2012a. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012a.

DURCE, C. C. **Normalização Complexa e Cálculo De Fluxo de Potência para Sistemas Elétricos Emergentes**, 2012b.

EI-ELA, A. A. A.; MOUWAFI, M. T.; SHAMMAH, A. E. S.; ABDEL-GHANY, D. Y. Optimal Placement of D-STATCOM in Distribution Systems Using JAYA Algorithm. **2018 20th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2018 - Proceedings**, p. 834–838, 2018. IEEE.

EMINOGLU, U.; GÖZEL, T.; HOCAOGLU, M. H. DSPFAP: Distribution systems power flow analysis package using matlab graphical user interface (GUI). , v. 18, n. 1, p. 1–13, 2010. *Computer Applications in Engineering Education*.

GARCIA, A. , MONTICELLI, A. Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido. , 1984. IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Bahia, Set. 1984.

GHAHREMANI, E.; KAMWA, I. Maximizing transmission capacity through a minimum set of distributed multi-type FACTS. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–8, 2012.

GITIBIN, R.; HOSEINZADEH, F. Comparison of D-SVC and D-STATCOM for performance enhancement of the distribution networks connected WECS including voltage dependent load models. **20th Electrical Power Distribution Conference, EPDC 2015**, , n. April, p. 90–100, 2015.

GUPTA, A. R.; JAIN, A.; KUMAR, A. Optimal D-STATCOM placement in radial distribution system based on power loss index approach. **2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth, ICEPE 2015**, p. 0–4, 2015.

HINGORANI, N. G. High Power Electronics and Flexible AC Transmission System. **IEEE Power Engineering Review**, v. 8, n. 7, p. 3–4, 1988.

HINGORANI, N. G. Introducing Custom Power. **IEEE Spectrum**, v. 32, n. 6, p. 41–52, 1995.

JAIN, A.; GUPTA, A. R.; KUMAR, A. An efficient method for D-STATCOM placement in radial distribution system. **India International Conference on Power Electronics, IICPE**, v. 2015-May, 2015.

JAISWAL, S. P.; SHRIVASTAVA, V. Allocation of UPFC in distribution system to minimize the losses. **Proceedings of the International Conference on Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with Their Impact on Humanity, CIPECH 2014**, , n. November, p. 202–205, 2014.

KAKKAR, V.; AGARWAL, N. K. Recent trends on FACTS and D-FACTS. **2010 Modern Electric Power Systems**, p. 1–8, 2010.

KEANE, A.; OCHOA, L. F.; VITTAL, E.; DENT, C. J.; HARRISON, G. P. Enhanced utilization of voltage control resources with distributed generation. **IEEE**

Transactions on Power Systems, v. 26, n. 1, p. 252–260, 2011. IEEE.

KECHROUD, A.; MYRZIK, J. M. A.; KLING, W. Taking the experience from flexible AC transmission systems to flexible AC distribution systems. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**, , n. 1, p. 687–692, 2007.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Raton ed. CRC Press, 2001.

KHAN, B.; KASSAS, M. FSIG-Based wind power plant transient stability margin improvement, a STATCOM/SVC Comparison. **2019 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2019**, p. 1–6, 2019. IEEE.

LAKKIREDDY, J.; RASTGOUFARD, R.; LEEVONGWAT, I.; RASTGOUFARD, P. Steady state voltage stability enhancement using shunt and series FACTS devices. **2015 Clemson University Power Systems Conference, PSC 2015**, 2015.

LORENZETI, J. F. C. **Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para a Melhoria das Condições de Operação com Relação à Estabilidade de Tensão**, 2004. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MARINOPOULOS, A. G.; ALEXIADIS, M. C.; DOKOPOULOS, P. S. Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 10, p. 1986–1994, 2011. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.06.006>>.

MASUDA, M. **Aplicação do Dispositivo Facts (Flexible Ac Transmission Systems) em Sistema de Distribuição - Simulação de Desempenho**, 2006. 68 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2006.

MONTICELLI, A; GARCIA, A.; SAAVEDRA, O. **Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testing**. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 4, p. 1425–1431, 1990.

MONTICELLI, J. A. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. , 1983. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

PADIYAR, K. R. **Facts Controllers in Power Transmission Distribution**. [S.l.]: New Age International Publisher, 2007.

PALI, B. S.; BHOWMICK, S.; KUMAR, N. Power flow models of static VAR compensator and static synchronous compensator. **2012 IEEE 5th Power India Conference, PICONF 2012**, p. 1–5, 2012. IEEE.

PORTELINHA, R. K. Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Trifásico para Redes de Distribuição, 2016. 138 f. Dissertação – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RAMADAN, A.; EBEED, M.; KAMEL, S. Performance Assessment of a Realistic Egyptian Distribution Network Including PV Penetration with D-STATCOM. **Proceedings of 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE 2019**, p. 426–431, 2019.

ROGERS, K M; OVERBYE, T. J. Some Applications of Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices in Power Systems. **Power Symposium, NAPS '08. 40th North American**, p. 1–8, 2008.

ROGERS, K M; OVERBYE, T. J. Power Flow Control with Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS). **41 st North American Power Symposium**, v. 61801, n. May, 2012.

ROGERS, K. M.; MEMBER, S.; OVERBYE, T. J. Some Applications of Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices in Power Systems. **40th North American Power Symposium**, p. 1–8, 2008.

S. BURANA, P. THARANAK, P. JIRAPONG, K. M. Optimal allocation of distributed generation with FACTS controller for electrical power loss reduction using genetic algorithm. 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Phuket, Thailand. **Anais...** . p.1–6, 2017.

SAAFIN, Z. A.; ZARO, F.; JAWADEH, M. Voltage profile improvement using D-STATCOM based on artificial intelligent techniques. **2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology, JEEIT 2019 - Proceedings**, p. 773–778, 2019. IEEE.

SALEEM, D.; MAJEED, R. Reactive power management in distributed generation. **2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies, ICEET 2019**, p. 1–7, 2019. IEEE.

SANAM, J.; GANGULY, S. Impact of distribution STATCOM allocation on radial distribution networks. **2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth, ICEPE 2015**, 2016.

SAYED, M. A.; TAKESHITA, T. All nodes voltage regulation and line loss minimization in loop distribution systems using UPFC. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 6, p. 1694–1703, 2011.

SELIM, A.; KAMEL, S.; JURADO, F. Hybrid Optimization Technique for Optimal Placement of DG and D-STATCOM in Distribution Networks. **2018 20th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2018 - Proceedings**, p. 689–693, 2018. IEEE.

SHEYKHOLESLAMI, A.; ROYA AHMADI., A.; NIAKI, S. A. N.; GHAFARI, H. Power flow modeling/calculation for power systems with dynamic flow controller. **2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008**, , n. 1, p. 1–5, 2008.

STOTT, B; ALSAÇ, O. Fast decoupled load flow b. stott 0. , , n. 3, p. 859–869, 1973.

STOTT, B.; ALSAC, O. Fast decoupled load flow. **IEEE Transactions on Power**

Apparatus and Systems, v. PAS-93, n. 3, p. 859–869, 1974.

TIWARI, D.; GHATAK, S. R. Performance enhancement of distribution system using optimal allocation of distributed generation & D-STATCOM. **IEEE International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications, ICIMIA 2017 - Proceedings**, , n. Icimia, p. 533–538, 2017.

TORTELLI, O. L. **Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência**, 2010. 158 f. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

TORTELLI, O. L.; LOURENCO, E. M.; GARCIA, A. V.; PAL, B. C. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex PU normalization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 3, p. 1351–1358, 2015.

VENKATESWARARAO, K.; AGARWAL, P. K. Distribution Systems Voltage Profile Improvement with Series FACTS Devices Using Line Flow-Based Equations. **16th NATIONAL POWER SYSTEMS CONFERENCE, 15th-17th DECEMBER, 2010**, p. 1–7, 2010.

YOUSSEF, H.; KAMEL, S.; ALY, M. M. Optimal allocation and size of appropriate compensation devices for voltage stability enhancement of power systems. **Proceedings of 2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering, ITCE 2018**, v. 2018-March, p. 305–310, 2018. IEEE.

ZHANG, X.-P.; YAO, L.; CHONG, B.; SASSE, C.; GODFREY, K. R. FACTS and HVDC technologies for the development of future power systems. **2005 International Conference on Future Power Systems**, p. 6 pp. – 6, 2005.

APÊNDICE 1 – resultados das simulações sistema 69 barras

TABELA 19 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS RADIAL

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
3	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000
4	0,9998	1,0000	0,9999	1,0000	0,9998	1,0000	0,9999	1,0000
5	0,9990	1,0002	0,9995	1,0005	0,9990	1,0002	0,9995	1,0005
6	0,9901	0,9968	1,0025	1,0097	0,9901	0,9968	1,0025	1,0097
7	0,9808	0,9934	1,0055	1,0191	0,9808	0,9934	1,0055	1,0191
8	0,9786	0,9926	1,0062	1,0212	0,9786	0,9926	1,0062	1,0212
9	0,9774	0,9922	1,0064	1,0223	0,9774	0,9922	1,0064	1,0223
10	0,9724	0,9882	1,0103	1,0383	0,9724	0,9882	1,0103	1,0383
11	0,9713	0,9873	1,0112	1,0418	0,9713	0,9873	1,0112	1,0418
12	0,9682	0,9850	1,0131	1,0535	0,9682	0,9850	1,0131	1,0535
13	0,9653	0,9833	1,0148	1,0684	0,9653	0,9833	1,0148	1,0684
14	0,9624	0,9816	1,0164	1,0823	0,9624	0,9816	1,0164	1,0823
15	0,9595	0,9800	1,0181	1,0953	0,9595	0,9800	1,0181	1,0953
16	0,9590	0,9797	1,0183	1,0975	0,9590	0,9797	1,0183	1,0975
17	0,9581	0,9792	1,0184	1,1014	0,9581	0,9792	1,0184	1,1014
18	0,9581	0,9792	1,0184	1,1014	0,9581	0,9792	1,0184	1,1014
19	0,9576	0,9791	1,0181	1,1043	0,9576	0,9791	1,0181	1,1043
20	0,9573	0,9791	1,0177	1,1059	0,9573	0,9791	1,0177	1,1059
21	0,9568	0,9790	1,0168	1,1082	0,9568	0,9790	1,0168	1,1082
22	0,9568	0,9790	1,0167	1,1083	0,9568	0,9790	1,0167	1,1083
23	0,9567	0,9791	1,0161	1,1091	0,9567	0,9791	1,0161	1,1091
24	0,9566	0,9793	1,0143	1,1106	0,9566	0,9793	1,0143	1,1106
25	0,9564	0,9800	1,0100	1,1129	0,9564	0,9800	1,0100	1,1129
26	0,9563	0,9799	1,0107	1,1136	0,9563	0,9799	1,0107	1,1136
27	0,9563	0,9799	1,0109	1,1137	0,9563	0,9799	1,0109	1,1137
28	0,9999	1,0000	1,0000	1,0001	0,9999	1,0000	1,0000	1,0001
29	0,9999	0,9999	1,0005	1,0005	0,9999	0,9999	1,0005	1,0005
30	0,9997	0,9998	1,0033	1,0034	0,9997	0,9998	1,0033	1,0034
31	0,9997	0,9998	1,0037	1,0038	0,9997	0,9998	1,0037	1,0038
32	0,9996	0,9997	1,0053	1,0054	0,9996	0,9997	1,0053	1,0054
33	0,9993	0,9994	1,0082	1,0083	0,9993	0,9994	1,0082	1,0083
34	0,9990	0,9991	1,0121	1,0121	0,9990	0,9991	1,0121	1,0121
35	0,9989	0,9990	1,0138	1,0139	0,9989	0,9990	1,0138	1,0139
36	0,9999	1,0000	1,0000	1,0001	0,9999	1,0000	1,0000	1,0001
37	0,9997	0,9998	1,0006	1,0007	0,9997	0,9998	1,0006	1,0007

TABELA 19 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS RADIAL
(conclusão)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
38	0,9996	0,9997	1,0016	1,0017	0,9996	0,9997	1,0016	1,0017
39	0,9995	0,9996	1,0019	1,0019	0,9995	0,9996	1,0019	1,0019
40	0,9995	0,9996	1,0019	1,0019	0,9995	0,9996	1,0019	1,0019
41	0,9988	0,9989	1,0066	1,0066	0,9988	0,9989	1,0066	1,0066
42	0,9986	0,9986	1,0082	1,0083	0,9986	0,9986	1,0082	1,0083
43	0,9985	0,9986	1,0084	1,0084	0,9985	0,9986	1,0084	1,0084
44	0,9985	0,9986	1,0084	1,0084	0,9985	0,9986	1,0084	1,0084
45	0,9984	0,9985	1,0086	1,0086	0,9984	0,9985	1,0086	1,0086
46	0,9984	0,9985	1,0086	1,0086	0,9984	0,9985	1,0086	1,0086
47	0,9998	1,0000	0,9998	1,0000	0,9998	1,0000	0,9998	1,0000
48	0,9985	0,9987	0,9989	0,9990	0,9985	0,9987	0,9989	0,9990
49	0,9947	0,9949	0,9958	0,9959	0,9947	0,9949	0,9958	0,9959
50	0,9942	0,9944	0,9954	0,9955	0,9942	0,9944	0,9954	0,9955
51	0,9785	0,9926	1,0064	1,0214	0,9785	0,9926	1,0064	1,0214
52	0,9785	0,9926	1,0068	1,0218	0,9785	0,9926	1,0068	1,0218
53	0,9747	0,9919	1,0074	1,0225	0,9747	0,9919	1,0074	1,0225
54	0,9714	0,9916	1,0083	1,0225	0,9714	0,9916	1,0083	1,0225
55	0,9669	0,9912	1,0092	1,0223	0,9669	0,9912	1,0092	1,0223
56	0,9626	0,9910	1,0099	1,0218	0,9626	0,9910	1,0099	1,0218
57	0,9401	0,9843	1,0114	1,0190	0,9401	0,9843	1,0114	1,0190
58	0,9290	0,9818	1,0112	1,0167	0,9290	0,9818	1,0112	1,0167
59	0,9248	0,9810	1,0108	1,0154	0,9248	0,9810	1,0108	1,0154
60	0,9197	0,9800	1,0100	1,0137	0,9197	0,9800	1,0100	1,0137
61	0,9123	0,9731	1,0064	1,0102	0,9123	0,9731	1,0064	1,0102
62	0,9121	0,9728	1,0067	1,0104	0,9121	0,9728	1,0067	1,0104
63	0,9117	0,9724	1,0068	1,0106	0,9117	0,9724	1,0068	1,0106
64	0,9098	0,9706	1,0069	1,0106	0,9098	0,9706	1,0069	1,0106
65	0,9092	0,9701	1,0077	1,0114	0,9092	0,9701	1,0077	1,0114
66	0,9713	0,9873	1,0116	1,0423	0,9713	0,9873	1,0116	1,0423
67	0,9713	0,9873	1,0116	1,0423	0,9713	0,9873	1,0116	1,0423
68	0,9678	0,9847	1,0146	1,0550	0,9678	0,9847	1,0146	1,0550
69	0,9678	0,9847	1,0146	1,0550	0,9678	0,9847	1,0146	1,0550

FONTE: O autor (2019).

TABELA 20 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS MALHADO

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
3	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000
4	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000
5	0,9994	1,0000	0,9998	1,0003	0,9994	1,0000	0,9998	1,0003
6	0,9942	0,9981	1,0032	1,0069	0,9942	0,9981	1,0032	1,0069
7	0,9887	0,9960	1,0065	1,0134	0,9887	0,9960	1,0065	1,0134
8	0,9874	0,9956	1,0072	1,0149	0,9874	0,9956	1,0072	1,0149
9	0,9868	0,9954	1,0074	1,0156	0,9868	0,9954	1,0074	1,0156
10	0,9837	0,9945	1,0089	1,0202	0,9837	0,9945	1,0089	1,0202
11	0,9831	0,9943	1,0091	1,0210	0,9831	0,9943	1,0091	1,0210
12	0,9775	0,9911	1,0129	1,0285	0,9775	0,9911	1,0129	1,0285
13	0,9711	0,9881	1,0165	1,0372	0,9711	0,9881	1,0165	1,0372
14	0,9646	0,9852	1,0193	1,0448	0,9646	0,9852	1,0193	1,0448
15	0,9582	0,9825	1,0211	1,0514	0,9582	0,9825	1,0211	1,0514
16	0,9570	0,9820	1,0213	1,0524	0,9570	0,9820	1,0213	1,0524
17	0,9549	0,9811	1,0212	1,0540	0,9549	0,9811	1,0212	1,0540
18	0,9548	0,9811	1,0212	1,0540	0,9548	0,9811	1,0212	1,0540
19	0,9533	0,9807	1,0207	1,0549	0,9533	0,9807	1,0207	1,0549
20	0,9523	0,9805	1,0202	1,0552	0,9523	0,9805	1,0202	1,0552
21	0,9506	0,9801	1,0188	1,0553	0,9506	0,9801	1,0188	1,0553
22	0,9506	0,9801	1,0188	1,0553	0,9506	0,9801	1,0188	1,0553
23	0,9500	0,9800	1,0179	1,0551	0,9500	0,9800	1,0179	1,0551
24	0,9486	0,9800	1,0156	1,0543	0,9486	0,9800	1,0156	1,0543
25	0,9459	0,9800	1,0100	1,0519	0,9459	0,9800	1,0100	1,0519
26	0,9448	0,9790	1,0098	1,0505	0,9448	0,9790	1,0098	1,0505
27	0,9442	0,9784	1,0095	1,0495	0,9442	0,9784	1,0095	1,0495
28	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000
29	0,9995	1,0003	0,9997	1,0002	0,9995	1,0003	0,9997	1,0002
30	0,9983	0,9998	1,0021	1,0033	0,9983	0,9998	1,0021	1,0033
31	0,9981	0,9997	1,0024	1,0038	0,9981	0,9997	1,0024	1,0038
32	0,9970	0,9992	1,0037	1,0056	0,9970	0,9992	1,0037	1,0056
33	0,9944	0,9982	1,0056	1,0091	0,9944	0,9982	1,0056	1,0091
34	0,9894	0,9963	1,0078	1,0142	0,9894	0,9963	1,0078	1,0142
35	0,9852	0,9949	1,0082	1,0170	0,9852	0,9949	1,0082	1,0170
36	0,9998	1,0000	1,0000	1,0001	0,9998	1,0000	1,0000	1,0001
37	0,9987	0,9999	0,9999	1,0012	0,9987	0,9999	0,9999	1,0012
38	0,9975	0,9995	1,0009	1,0030	0,9975	0,9995	1,0009	1,0030
39	0,9971	0,9994	1,0012	1,0035	0,9971	0,9994	1,0012	1,0035
40	0,9971	0,9994	1,0012	1,0035	0,9971	0,9994	1,0012	1,0035

TABELA 20 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS MALHADO

(conclusão)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
41	0,9893	0,9969	1,0059	1,0140	0,9893	0,9969	1,0059	1,0140
42	0,9859	0,9958	1,0077	1,0181	0,9859	0,9958	1,0077	1,0181
43	0,9855	0,9957	1,0079	1,0186	0,9855	0,9957	1,0079	1,0186
44	0,9854	0,9957	1,0079	1,0187	0,9854	0,9957	1,0079	1,0187
45	0,9842	0,9953	1,0081	1,0197	0,9842	0,9953	1,0081	1,0197
46	0,9842	0,9953	1,0081	1,0198	0,9842	0,9953	1,0081	1,0198
47	0,9998	0,9999	0,9999	1,0000	0,9998	0,9999	0,9999	1,0000
48	0,9986	0,9987	0,9989	0,9990	0,9986	0,9987	0,9989	0,9990
49	0,9947	0,9949	0,9958	0,9959	0,9947	0,9949	0,9958	0,9959
50	0,9942	0,9943	0,9954	0,9955	0,9942	0,9943	0,9954	0,9955
51	0,9874	0,9956	1,0074	1,0151	0,9874	0,9956	1,0074	1,0151
52	0,9874	0,9956	1,0078	1,0155	0,9874	0,9956	1,0078	1,0155
53	0,9852	0,9949	1,0082	1,0170	0,9852	0,9949	1,0082	1,0170
54	0,9828	0,9943	1,0085	1,0184	0,9828	0,9943	1,0085	1,0184
55	0,9795	0,9935	1,0086	1,0202	0,9795	0,9935	1,0086	1,0202
56	0,9764	0,9928	1,0084	1,0217	0,9764	0,9928	1,0084	1,0217
57	0,9599	0,9858	1,0103	1,0296	0,9599	0,9858	1,0103	1,0296
58	0,9519	0,9826	1,0105	1,0326	0,9519	0,9826	1,0105	1,0326
59	0,9487	0,9814	1,0103	1,0334	0,9487	0,9814	1,0103	1,0334
60	0,9452	0,9800	1,0100	1,0343	0,9452	0,9800	1,0100	1,0343
61	0,9399	0,9748	1,0067	1,0343	0,9399	0,9748	1,0067	1,0343
62	0,9399	0,9748	1,0069	1,0352	0,9399	0,9748	1,0069	1,0352
63	0,9401	0,9749	1,0072	1,0364	0,9401	0,9749	1,0072	1,0364
64	0,9409	0,9755	1,0077	1,0414	0,9409	0,9755	1,0077	1,0414
65	0,9442	0,9784	1,0094	1,0495	0,9442	0,9784	1,0094	1,0495
66	0,9841	0,9953	1,0081	1,0198	0,9841	0,9953	1,0081	1,0198
67	0,9842	0,9953	1,0081	1,0198	0,9842	0,9953	1,0081	1,0198
68	0,9772	0,9908	1,0144	1,0300	0,9772	0,9908	1,0144	1,0300
69	0,9772	0,9908	1,0144	1,0300	0,9772	0,9908	1,0144	1,0300

FONTE: O autor (2019).

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES SISTEMA 136 BARRAS

TABELA 21 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS RADIAL

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,9910	0,9910	0,9969	0,9969	0,9910	0,9910	0,9969	0,9969
3	0,9909	0,9909	0,9969	0,9969	0,9909	0,9909	0,9969	0,9969
4	0,9850	0,9850	0,9944	0,9944	0,9850	0,9850	0,9944	0,9944
5	0,9824	0,9824	0,9933	0,9933	0,9824	0,9824	0,9933	0,9933
6	0,9785	0,9785	0,9915	0,9915	0,9785	0,9785	0,9915	0,9915
7	0,9750	0,9750	0,9899	0,9899	0,9750	0,9750	0,9899	0,9899
8	0,9747	0,9747	0,9897	0,9897	0,9747	0,9747	0,9897	0,9897
9	0,9743	0,9743	0,9897	0,9897	0,9743	0,9743	0,9897	0,9897
10	0,9738	0,9738	0,9899	0,9899	0,9738	0,9738	0,9899	0,9899
11	0,9730	0,9730	0,9893	0,9893	0,9730	0,9730	0,9893	0,9893
12	0,9727	0,9727	0,9894	0,9894	0,9727	0,9727	0,9894	0,9894
13	0,9716	0,9716	0,9889	0,9889	0,9716	0,9716	0,9889	0,9889
14	0,9721	0,9721	0,9889	0,9889	0,9721	0,9721	0,9889	0,9889
15	0,9711	0,9711	0,9885	0,9885	0,9711	0,9711	0,9885	0,9885
16	0,9719	0,9719	0,9889	0,9889	0,9719	0,9719	0,9889	0,9889
17	0,9716	0,9716	0,9888	0,9888	0,9716	0,9716	0,9888	0,9888
18	0,9913	0,9913	0,9991	0,9991	0,9913	0,9913	0,9991	0,9991
19	0,9913	0,9913	0,9991	0,9991	0,9913	0,9913	0,9991	0,9991
20	0,9854	0,9854	0,9981	0,9981	0,9854	0,9854	0,9981	0,9981
21	0,9826	0,9826	0,9975	0,9975	0,9826	0,9826	0,9975	0,9975
22	0,9815	0,9815	0,9972	0,9972	0,9815	0,9815	0,9972	0,9972
23	0,9784	0,9784	0,9967	0,9967	0,9784	0,9784	0,9967	0,9967
24	0,9780	0,9780	0,9965	0,9965	0,9780	0,9780	0,9965	0,9965
25	0,9780	0,9780	0,9966	0,9966	0,9780	0,9780	0,9966	0,9966
26	0,9771	0,9771	0,9964	0,9964	0,9771	0,9771	0,9964	0,9964
27	0,9768	0,9768	0,9964	0,9964	0,9768	0,9768	0,9964	0,9964
28	0,9754	0,9754	0,9965	0,9965	0,9754	0,9754	0,9965	0,9965
29	0,9751	0,9751	0,9965	0,9965	0,9751	0,9751	0,9965	0,9965
30	0,9749	0,9749	0,9967	0,9967	0,9749	0,9749	0,9967	0,9967
31	0,9748	0,9748	0,9970	0,9970	0,9748	0,9748	0,9970	0,9970
32	0,9747	0,9747	0,9966	0,9966	0,9747	0,9747	0,9966	0,9966
33	0,9744	0,9744	0,9966	0,9966	0,9744	0,9744	0,9966	0,9966
34	0,9733	0,9733	0,9963	0,9963	0,9733	0,9733	0,9963	0,9963
35	0,9730	0,9730	0,9962	0,9962	0,9730	0,9730	0,9962	0,9962
36	0,9744	0,9744	0,9966	0,9966	0,9744	0,9744	0,9966	0,9966
37	0,9733	0,9733	0,9963	0,9963	0,9733	0,9733	0,9963	0,9963

TABELA 21 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS RADIAL

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
38	0,9729	0,9729	0,9962	0,9962	0,9729	0,9729	0,9962	0,9962
39	0,9744	0,9744	0,9966	0,9966	0,9744	0,9744	0,9966	0,9966
40	0,9909	0,9909	0,9994	0,9994	0,9909	0,9909	0,9994	0,9994
41	0,9876	0,9876	0,9990	0,9990	0,9876	0,9876	0,9990	0,9990
42	0,9875	0,9875	1,0020	1,0020	0,9875	0,9875	1,0020	1,0020
43	0,9876	0,9876	0,9990	0,9990	0,9876	0,9876	0,9990	0,9990
44	0,9857	0,9857	0,9986	0,9986	0,9857	0,9857	0,9986	0,9986
45	0,9853	0,9853	0,9992	0,9992	0,9853	0,9853	0,9992	0,9992
46	0,9841	0,9841	0,9982	0,9982	0,9841	0,9841	0,9982	0,9982
47	0,9810	0,9810	0,9976	0,9976	0,9810	0,9810	0,9976	0,9976
48	0,9798	0,9798	0,9975	0,9975	0,9798	0,9798	0,9975	0,9975
49	0,9783	0,9783	0,9977	0,9977	0,9783	0,9783	0,9977	0,9977
50	0,9781	0,9781	0,9980	0,9980	0,9781	0,9781	0,9980	0,9980
51	0,9778	0,9778	0,9981	0,9981	0,9778	0,9778	0,9981	0,9981
52	0,9779	0,9779	0,9978	0,9978	0,9779	0,9779	0,9978	0,9978
53	0,9776	0,9776	0,9978	0,9978	0,9776	0,9776	0,9978	0,9978
54	0,9774	0,9774	0,9978	0,9978	0,9774	0,9774	0,9978	0,9978
55	0,9774	0,9774	0,9978	0,9978	0,9774	0,9774	0,9978	0,9978
56	0,9774	0,9774	0,9978	0,9978	0,9774	0,9774	0,9978	0,9978
57	0,9771	0,9771	0,9979	0,9979	0,9771	0,9771	0,9979	0,9979
58	0,9762	0,9762	0,9985	0,9985	0,9762	0,9762	0,9985	0,9985
59	0,9750	0,9750	0,9990	0,9990	0,9750	0,9750	0,9990	0,9990
60	0,9739	0,9739	0,9996	0,9996	0,9739	0,9739	0,9996	0,9996
61	0,9737	0,9737	1,0001	1,0001	0,9737	0,9737	1,0001	1,0001
62	0,9737	0,9737	1,0003	1,0003	0,9737	0,9737	1,0003	1,0003
63	0,9795	0,9795	0,9973	0,9973	0,9795	0,9795	0,9973	0,9973
64	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000
65	0,9955	0,9955	0,9988	0,9988	0,9955	0,9955	0,9988	0,9988
66	0,9906	0,9906	0,9980	0,9980	0,9906	0,9906	0,9980	0,9980
67	0,9866	0,9866	0,9972	0,9972	0,9866	0,9866	0,9972	0,9972
68	0,9829	0,9829	0,9963	0,9963	0,9829	0,9829	0,9963	0,9963
69	0,9811	0,9811	0,9959	0,9959	0,9811	0,9811	0,9959	0,9959
70	0,9808	0,9808	0,9962	0,9962	0,9808	0,9808	0,9962	0,9962
71	0,9807	0,9807	0,9958	0,9958	0,9807	0,9807	0,9958	0,9958
72	0,9806	0,9806	0,9971	0,9971	0,9806	0,9806	0,9971	0,9971
73	0,9805	0,9805	0,9982	0,9982	0,9805	0,9805	0,9982	0,9982
74	0,9804	0,9804	0,9956	0,9956	0,9804	0,9804	0,9956	0,9956
75	0,9771	0,9771	0,9937	0,9937	0,9771	0,9771	0,9937	0,9937
76	0,9998	0,9999	1,0000	0,9999	0,9998	0,9999	1,0000	0,9999
77	0,9869	0,9948	0,9994	0,9943	0,9869	0,9948	0,9994	0,9943

TABELA 21 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS RADIAL

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
78	0,9832	0,9935	0,9993	0,9926	0,9832	0,9935	0,9993	0,9926
79	0,9801	0,9926	0,9992	0,9911	0,9801	0,9926	0,9992	0,9911
80	0,9794	0,9924	0,9992	0,9907	0,9794	0,9924	0,9992	0,9907
81	0,9746	0,9906	0,9996	0,9893	0,9746	0,9906	0,9996	0,9893
82	0,9724	0,9899	0,9999	0,9886	0,9724	0,9899	0,9999	0,9886
83	0,9721	0,9896	1,0001	0,9889	0,9721	0,9896	1,0001	0,9889
84	0,9720	0,9900	1,0000	0,9884	0,9720	0,9900	1,0000	0,9884
85	0,9711	0,9891	0,9997	0,9881	0,9711	0,9891	0,9997	0,9881
86	0,9997	0,9997	0,9998	0,9998	0,9997	0,9997	0,9998	0,9998
87	0,9873	0,9873	0,9934	0,9934	0,9873	0,9873	0,9934	0,9934
88	0,9863	0,9863	0,9926	0,9926	0,9863	0,9863	0,9926	0,9926
89	0,9801	0,9801	0,9914	0,9914	0,9801	0,9801	0,9914	0,9914
90	0,9796	0,9796	0,9917	0,9917	0,9796	0,9796	0,9917	0,9917
91	0,9790	0,9790	0,9919	0,9919	0,9790	0,9790	0,9919	0,9919
92	0,9766	0,9766	0,9923	0,9923	0,9766	0,9766	0,9923	0,9923
93	0,9760	0,9760	0,9924	0,9924	0,9760	0,9760	0,9924	0,9924
94	0,9753	0,9753	0,9925	0,9925	0,9753	0,9753	0,9925	0,9925
95	0,9743	0,9743	0,9924	0,9924	0,9743	0,9743	0,9924	0,9924
96	0,9737	0,9737	0,9923	0,9923	0,9737	0,9737	0,9923	0,9923
97	0,9734	0,9734	0,9923	0,9923	0,9734	0,9734	0,9923	0,9923
98	0,9752	0,9752	0,9926	0,9926	0,9752	0,9752	0,9926	0,9926
99	0,9751	0,9751	0,9927	0,9927	0,9751	0,9751	0,9927	0,9927
100	0,9997	0,9997	1,0000	0,9999	0,9997	0,9997	1,0000	0,9999
101	0,9939	0,9951	0,9999	0,9983	0,9939	0,9951	0,9999	0,9983
102	0,9899	0,9920	0,9997	0,9971	0,9899	0,9920	0,9997	0,9971
103	0,9898	0,9919	1,0020	0,9994	0,9898	0,9919	1,0020	0,9994
104	0,9750	0,9804	0,9986	0,9920	0,9750	0,9804	0,9986	0,9920
105	0,9525	0,9630	0,9962	0,9835	0,9525	0,9630	0,9962	0,9835
106	0,9389	0,9528	0,9935	0,9768	0,9389	0,9528	0,9935	0,9768
107	0,9368	0,9515	0,9951	0,9774	0,9368	0,9515	0,9951	0,9774
108	0,9352	0,9508	0,9971	0,9784	0,9352	0,9508	0,9971	0,9784
109	0,9335	0,9500	1,0000	0,9803	0,9335	0,9500	1,0000	0,9803
110	0,9326	0,9491	1,0008	0,9812	0,9326	0,9491	1,0008	0,9812
111	0,9351	0,9507	0,9972	0,9785	0,9351	0,9507	0,9972	0,9785
112	0,9348	0,9504	0,9983	0,9797	0,9348	0,9504	0,9983	0,9797
113	0,9345	0,9501	0,9999	0,9813	0,9345	0,9501	0,9999	0,9813
114	0,9345	0,9501	1,0005	0,9819	0,9345	0,9501	1,0005	0,9819
115	0,9327	0,9492	1,0008	0,9812	0,9327	0,9492	1,0008	0,9812
116	0,9327	0,9492	1,0020	0,9823	0,9327	0,9492	1,0020	0,9823
117	0,9307	0,9473	1,0013	0,9817	0,9307	0,9473	1,0013	0,9817

TABELA 21 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS RADIAL

(conclusão)

118	0,9307	0,9473	1,0018	0,9822	0,9307	0,9473	1,0018	0,9822
119	0,9519	0,9625	0,9966	0,9839	0,9519	0,9625	0,9966	0,9839
120	0,9518	0,9623	0,9968	0,9841	0,9518	0,9623	0,9968	0,9841
121	0,9517	0,9622	0,9969	0,9842	0,9517	0,9622	0,9969	0,9842
122	0,9997	0,9997	0,9999	0,9999	0,9997	0,9997	0,9999	0,9999
123	0,9848	0,9848	0,9948	0,9948	0,9848	0,9848	0,9948	0,9948
124	0,9838	0,9838	0,9945	0,9945	0,9838	0,9838	0,9945	0,9945
125	0,9834	0,9834	0,9947	0,9947	0,9834	0,9834	0,9947	0,9947
126	0,9834	0,9834	0,9943	0,9943	0,9834	0,9834	0,9943	0,9943
127	0,9828	0,9828	0,9944	0,9944	0,9828	0,9828	0,9944	0,9944
128	0,9817	0,9817	0,9936	0,9936	0,9817	0,9817	0,9936	0,9936
129	0,9816	0,9816	0,9936	0,9936	0,9816	0,9816	0,9936	0,9936
130	0,9794	0,9794	0,9924	0,9924	0,9794	0,9794	0,9924	0,9924
131	0,9788	0,9788	0,9921	0,9921	0,9788	0,9788	0,9921	0,9921
132	0,9776	0,9776	0,9914	0,9914	0,9776	0,9776	0,9914	0,9914
133	0,9759	0,9759	0,9905	0,9905	0,9759	0,9759	0,9905	0,9905
134	0,9742	0,9742	0,9899	0,9899	0,9742	0,9742	0,9899	0,9899
135	0,9734	0,9734	0,9900	0,9900	0,9734	0,9734	0,9900	0,9900
136	0,9734	0,9734	0,9903	0,9903	0,9734	0,9734	0,9903	0,9903

FONTE: O autor (2019).

TABELA 22 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS MALHADO

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,9912	0,9947	0,9997	0,9977	0,9912	0,9947	0,9997	0,9977
3	0,9912	0,9947	0,9997	0,9977	0,9912	0,9947	0,9997	0,9977
4	0,9854	0,9913	0,9991	0,9958	0,9854	0,9913	0,9991	0,9958
5	0,9829	0,9898	0,9988	0,9950	0,9829	0,9898	0,9988	0,9950
6	0,9791	0,9877	0,9983	0,9935	0,9791	0,9877	0,9983	0,9935
7	0,9757	0,9860	0,9982	0,9924	0,9757	0,9860	0,9982	0,9924
8	0,9753	0,9850	0,9978	0,9922	0,9753	0,9850	0,9978	0,9922
9	0,9750	0,9857	0,9983	0,9924	0,9750	0,9857	0,9983	0,9924
10	0,9751	0,9830	0,9989	0,9935	0,9751	0,9830	0,9989	0,9935
11	0,9739	0,9862	0,9985	0,9920	0,9739	0,9862	0,9985	0,9920
12	0,9736	0,9859	0,9987	0,9922	0,9736	0,9859	0,9987	0,9922
13	0,9725	0,9848	0,9981	0,9916	0,9725	0,9848	0,9981	0,9916
14	0,9731	0,9871	0,9989	0,9918	0,9731	0,9871	0,9989	0,9918
15	0,9721	0,9861	0,9984	0,9913	0,9721	0,9861	0,9984	0,9913
16	0,9729	0,9878	0,9992	0,9918	0,9729	0,9878	0,9992	0,9918
17	0,9726	0,9874	0,9991	0,9917	0,9726	0,9874	0,9991	0,9917

TABELA 22 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS MALHADO

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
18	0,9903	0,9928	1,0001	0,9981	0,9903	0,9928	1,0001	0,9981
19	0,9902	0,9927	1,0001	0,9981	0,9902	0,9927	1,0001	0,9981
20	0,9837	0,9879	0,9997	0,9965	0,9837	0,9879	0,9997	0,9965
21	0,9805	0,9856	0,9994	0,9955	0,9805	0,9856	0,9994	0,9955
22	0,9794	0,9845	0,9991	0,9952	0,9794	0,9845	0,9991	0,9952
23	0,9758	0,9822	0,9991	0,9941	0,9758	0,9822	0,9991	0,9941
24	0,9753	0,9817	0,9990	0,9940	0,9753	0,9817	0,9990	0,9940
25	0,9753	0,9818	0,9991	0,9940	0,9753	0,9818	0,9991	0,9940
26	0,9744	0,9804	0,9989	0,9937	0,9744	0,9804	0,9989	0,9937
27	0,9741	0,9803	0,9989	0,9937	0,9741	0,9803	0,9989	0,9937
28	0,9730	0,9799	0,9990	0,9936	0,9730	0,9799	0,9990	0,9936
29	0,9729	0,9798	0,9990	0,9936	0,9729	0,9798	0,9990	0,9936
30	0,9726	0,9796	0,9992	0,9938	0,9726	0,9796	0,9992	0,9938
31	0,9725	0,9794	0,9995	0,9940	0,9725	0,9794	0,9995	0,9940
32	0,9726	0,9799	0,9991	0,9935	0,9726	0,9799	0,9991	0,9935
33	0,9723	0,9795	0,9991	0,9935	0,9723	0,9795	0,9991	0,9935
34	0,9712	0,9784	0,9988	0,9933	0,9712	0,9784	0,9988	0,9933
35	0,9708	0,9781	0,9987	0,9931	0,9708	0,9781	0,9987	0,9931
36	0,9725	0,9802	0,9991	0,9934	0,9725	0,9802	0,9991	0,9934
37	0,9715	0,9791	0,9988	0,9932	0,9715	0,9791	0,9988	0,9932
38	0,9710	0,9787	0,9987	0,9930	0,9710	0,9787	0,9987	0,9930
39	0,9727	0,9806	0,9991	0,9934	0,9727	0,9806	0,9991	0,9934
40	0,9887	0,9889	0,9996	0,9976	0,9887	0,9889	0,9996	0,9976
41	0,9848	0,9849	0,9994	0,9967	0,9848	0,9849	0,9994	0,9967
42	0,9847	0,9848	1,0024	0,9997	0,9847	0,9848	1,0024	0,9997
43	0,9847	0,9849	0,9994	0,9966	0,9847	0,9849	0,9994	0,9966
44	0,9824	0,9826	0,9990	0,9959	0,9824	0,9826	0,9990	0,9959
45	0,9820	0,9822	0,9996	0,9964	0,9820	0,9822	0,9996	0,9964
46	0,9804	0,9806	0,9987	0,9952	0,9804	0,9806	0,9987	0,9952
47	0,9765	0,9767	0,9981	0,9938	0,9765	0,9767	0,9981	0,9938
48	0,9749	0,9752	0,9981	0,9933	0,9749	0,9752	0,9981	0,9933
49	0,9742	0,9778	0,9985	0,9935	0,9742	0,9778	0,9985	0,9935
50	0,9741	0,9773	0,9986	0,9936	0,9741	0,9773	0,9986	0,9936
51	0,9740	0,9768	0,9983	0,9934	0,9740	0,9768	0,9983	0,9934
52	0,9741	0,9790	0,9988	0,9937	0,9741	0,9790	0,9988	0,9937
53	0,9739	0,9790	0,9988	0,9937	0,9739	0,9790	0,9988	0,9937
54	0,9737	0,9792	0,9988	0,9936	0,9737	0,9792	0,9988	0,9936
55	0,9736	0,9794	0,9988	0,9936	0,9736	0,9794	0,9988	0,9936
56	0,9737	0,9795	0,9989	0,9936	0,9737	0,9795	0,9989	0,9936
57	0,9733	0,9784	0,9990	0,9938	0,9733	0,9784	0,9990	0,9938

TABELA 22 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS MALHADO

(continua)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
58	0,9725	0,9776	0,9995	0,9944	0,9725	0,9776	0,9995	0,9944
59	0,9712	0,9763	1,0000	0,9949	0,9712	0,9763	1,0000	0,9949
60	0,9701	0,9753	1,0006	0,9954	0,9701	0,9753	1,0006	0,9954
61	0,9699	0,9751	1,0011	0,9959	0,9699	0,9751	1,0011	0,9959
62	0,9699	0,9751	1,0013	0,9962	0,9699	0,9751	1,0013	0,9962
63	0,9745	0,9759	0,9979	0,9932	0,9745	0,9759	0,9979	0,9932
64	0,9998	0,9999	1,0000	1,0000	0,9998	0,9999	1,0000	1,0000
65	0,9939	0,9955	0,9990	0,9979	0,9939	0,9955	0,9990	0,9979
66	0,9867	0,9905	0,9984	0,9958	0,9867	0,9905	0,9984	0,9958
67	0,9808	0,9866	0,9978	0,9939	0,9808	0,9866	0,9978	0,9939
68	0,9774	0,9849	0,9976	0,9930	0,9774	0,9849	0,9976	0,9930
69	0,9758	0,9842	0,9975	0,9926	0,9758	0,9842	0,9975	0,9926
70	0,9755	0,9839	0,9978	0,9929	0,9755	0,9839	0,9978	0,9929
71	0,9755	0,9842	0,9975	0,9924	0,9755	0,9842	0,9975	0,9924
72	0,9753	0,9840	0,9989	0,9938	0,9753	0,9840	0,9989	0,9938
73	0,9753	0,9840	0,9999	0,9948	0,9753	0,9840	0,9999	0,9948
74	0,9752	0,9842	0,9975	0,9922	0,9752	0,9842	0,9975	0,9922
75	0,9719	0,9810	0,9957	0,9904	0,9719	0,9810	0,9957	0,9904
76	0,9998	0,9998	1,0000	0,9999	0,9998	0,9998	1,0000	0,9999
77	0,9866	0,9898	0,9982	0,9957	0,9866	0,9898	0,9982	0,9957
78	0,9835	0,9876	0,9980	0,9948	0,9835	0,9876	0,9980	0,9948
79	0,9806	0,9861	0,9977	0,9937	0,9806	0,9861	0,9977	0,9937
80	0,9800	0,9858	0,9976	0,9935	0,9800	0,9858	0,9976	0,9935
81	0,9755	0,9877	0,9990	0,9925	0,9755	0,9877	0,9990	0,9925
82	0,9734	0,9892	0,9997	0,9920	0,9734	0,9892	0,9997	0,9920
83	0,9731	0,9889	1,0000	0,9923	0,9731	0,9889	1,0000	0,9923
84	0,9730	0,9900	1,0000	0,9919	0,9730	0,9900	1,0000	0,9919
85	0,9726	0,9842	0,9993	0,9926	0,9726	0,9842	0,9993	0,9926
86	0,9997	0,9997	0,9999	0,9999	0,9997	0,9997	0,9999	0,9999
87	0,9886	0,9901	0,9958	0,9944	0,9886	0,9901	0,9958	0,9944
88	0,9876	0,9891	0,9950	0,9935	0,9876	0,9891	0,9950	0,9935
89	0,9827	0,9856	0,9963	0,9933	0,9827	0,9856	0,9963	0,9933
90	0,9823	0,9853	0,9967	0,9937	0,9823	0,9853	0,9967	0,9937
91	0,9819	0,9852	0,9973	0,9941	0,9819	0,9852	0,9973	0,9941
92	0,9770	0,9800	0,9972	0,9929	0,9770	0,9800	0,9972	0,9929
93	0,9764	0,9799	0,9973	0,9929	0,9764	0,9799	0,9973	0,9929
94	0,9752	0,9793	0,9979	0,9931	0,9752	0,9793	0,9979	0,9931
95	0,9745	0,9780	0,9980	0,9932	0,9745	0,9780	0,9980	0,9932
96	0,9741	0,9772	0,9980	0,9932	0,9741	0,9772	0,9980	0,9932
97	0,9741	0,9767	0,9981	0,9933	0,9741	0,9767	0,9981	0,9933

TABELA 22 – RESULTADO DAS TENSÕES PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS MALHADO
(conclusão)

Barra	Versão BX				Versão XB			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
98	0,9746	0,9796	0,9983	0,9933	0,9746	0,9796	0,9983	0,9933
99	0,9737	0,9800	0,9987	0,9934	0,9737	0,9800	0,9987	0,9934
100	0,9998	0,9998	1,0000	1,0000	0,9998	0,9998	1,0000	1,0000
101	0,9958	0,9965	0,9997	0,9989	0,9958	0,9965	0,9997	0,9989
102	0,9930	0,9942	0,9994	0,9982	0,9930	0,9942	0,9994	0,9982
103	0,9929	0,9941	1,0016	1,0004	0,9929	0,9941	1,0016	1,0004
104	0,9829	0,9858	0,9976	0,9946	0,9829	0,9858	0,9976	0,9946
105	0,9762	0,9786	0,9972	0,9928	0,9762	0,9786	0,9972	0,9928
106	0,9688	0,9624	0,9942	0,9888	0,9688	0,9624	0,9942	0,9888
107	0,9689	0,9603	0,9956	0,9901	0,9689	0,9603	0,9956	0,9901
108	0,9695	0,9587	0,9975	0,9917	0,9695	0,9587	0,9975	0,9917
109	0,9679	0,9500	1,0000	0,9935	0,9679	0,9500	1,0000	0,9935
110	0,9670	0,9491	1,0008	0,9944	0,9670	0,9491	1,0008	0,9944
111	0,9699	0,9599	0,9976	0,9919	0,9699	0,9599	0,9976	0,9919
112	0,9696	0,9596	0,9988	0,9931	0,9696	0,9596	0,9988	0,9931
113	0,9693	0,9593	1,0003	0,9946	0,9693	0,9593	1,0003	0,9946
114	0,9693	0,9593	1,0009	0,9952	0,9693	0,9593	1,0009	0,9952
115	0,9671	0,9492	1,0008	0,9944	0,9671	0,9492	1,0008	0,9944
116	0,9671	0,9492	1,0020	0,9955	0,9671	0,9492	1,0020	0,9955
117	0,9652	0,9473	1,0013	0,9949	0,9652	0,9473	1,0013	0,9949
118	0,9652	0,9473	1,0018	0,9954	0,9652	0,9473	1,0018	0,9954
119	0,9751	0,9772	0,9977	0,9931	0,9751	0,9772	0,9977	0,9931
120	0,9748	0,9766	0,9979	0,9932	0,9748	0,9766	0,9979	0,9932
121	0,9745	0,9762	0,9979	0,9932	0,9745	0,9762	0,9979	0,9932
122	0,9998	0,9998	1,0000	0,9999	0,9998	0,9998	1,0000	0,9999
123	0,9867	0,9897	0,9985	0,9961	0,9867	0,9897	0,9985	0,9961
124	0,9859	0,9890	0,9984	0,9959	0,9859	0,9890	0,9984	0,9959
125	0,9855	0,9886	0,9986	0,9960	0,9855	0,9886	0,9986	0,9960
126	0,9855	0,9888	0,9984	0,9958	0,9855	0,9888	0,9984	0,9958
127	0,9862	0,9894	0,9983	0,9957	0,9862	0,9894	0,9983	0,9957
128	0,9838	0,9875	0,9980	0,9951	0,9838	0,9875	0,9980	0,9951
129	0,9835	0,9875	0,9980	0,9949	0,9835	0,9875	0,9980	0,9949
130	0,9818	0,9858	0,9975	0,9941	0,9818	0,9858	0,9975	0,9941
131	0,9811	0,9856	0,9976	0,9939	0,9811	0,9856	0,9976	0,9939
132	0,9799	0,9854	0,9976	0,9935	0,9799	0,9854	0,9976	0,9935
133	0,9769	0,9814	0,9972	0,9927	0,9769	0,9814	0,9972	0,9927
134	0,9746	0,9805	0,9974	0,9924	0,9746	0,9805	0,9974	0,9924
135	0,9733	0,9806	0,9982	0,9927	0,9733	0,9806	0,9982	0,9927
136	0,9729	0,9813	0,9991	0,9932	0,9729	0,9813	0,9991	0,9932

FONTE: O autor (2019).

ANEXO 1 – DADOS DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS

TABELA 23 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS

(continua)

Barra	Tipo	Pg	Pd (MW)	Qg	Qd (Mvar)	Nominal	Qmin	Qmax	bshunt	Vesp (pu)
1	1	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
2	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
3	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
4	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
5	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
6	3	0	0,0026	0	0,0022	12,66	-inf	inf	0	1
7	3	0	0,0404	0	0,03	12,66	-inf	inf	0	1
8	3	0	0,075	0	0,054	12,66	-inf	inf	0	1
9	3	0	0,03	0	0,022	12,66	-inf	inf	0	1
10	3	0	0,028	0	0,019	12,66	-inf	inf	0	1
11	3	0	0,145	0	0,104	12,66	-inf	inf	0	1
12	3	0	0,145	0	0,104	12,66	-inf	inf	0	1
13	3	0	0,008	0	0,0055	12,66	-inf	inf	0	1
14	3	0	0,008	0	0,0055	12,66	-inf	inf	0	1
15	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
16	3	0	0,0455	0	0,03	12,66	-inf	inf	0	1
17	3	0	0,06	0	0,035	12,66	-inf	inf	0	1
18	3	0	0,06	0	0,035	12,66	-inf	inf	0	1
19	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
20	3	0	0,001	0	0,0006	12,66	-inf	inf	0	1
21	3	0	0,114	0	0,081	12,66	-inf	inf	0	1
22	3	0	0,0053	0	0,0035	12,66	-inf	inf	0	1
23	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
24	3	0	0,028	0	0,02	12,66	-inf	inf	0	1
25	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
26	3	0	0,014	0	0,01	12,66	-inf	inf	0	1
27	3	0	0,014	0	0,01	12,66	-inf	inf	0	1
28	3	0	0,026	0	0,0185	12,66	-inf	inf	0	1
29	3	0	0,026	0	0,0185	12,66	-inf	inf	0	1
30	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
31	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
32	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
33	3	0	0,014	0	0,01	12,66	-inf	inf	0	1
34	3	0	0,0195	0	0,014	12,66	-inf	inf	0	1
35	3	0	0,006	0	0,004	12,66	-inf	inf	0	1
36	3	0	0,026	0	0,0186	12,66	-inf	inf	0	1
37	3	0	0,026	0	0,0186	12,66	-inf	inf	0	1
38	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1

TABELA 23 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS

(conclusão)

Barra	Tipo	Pg	Pd (MW)	Qg	Qd (Mvar)	Nominal	Qmin	Qmax	bshunt	Vesp (pu)
39	3	0	0,024	0	0,017	12,66	-inf	inf	0	1
40	3	0	0,024	0	0,017	12,66	-inf	inf	0	1
41	3	0	0,0012	0	0,001	12,66	-inf	inf	0	1
42	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
43	3	0	0,006	0	0,0043	12,66	-inf	inf	0	1
44	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
45	3	0	0,0392	0	0,0263	12,66	-inf	inf	0	1
46	3	0	0,0392	0	0,0263	12,66	-inf	inf	0	1
47	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
48	3	0	0,079	0	0,0564	12,66	-inf	inf	0	1
49	3	0	0,3847	0	0,2745	12,66	-inf	inf	0	1
50	3	0	0,3847	0	0,2745	12,66	-inf	inf	0	1
51	3	0	0,0405	0	0,0283	12,66	-inf	inf	0	1
52	3	0	0,0405	0	0,0027	12,66	-inf	inf	0	1
53	3	0	0,0043	0	0,0035	12,66	-inf	inf	0	1
54	3	0	0,0264	0	0,019	12,66	-inf	inf	0	1
55	3	0	0,024	0	0,0172	12,66	-inf	inf	0	1
56	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
57	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
58	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
59	3	0	0,1	0	0,072	12,66	-inf	inf	0	1
60	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
61	3	0	1,244	0	0,888	12,66	-inf	inf	0	1
62	3	0	0,032	0	0,023	12,66	-inf	inf	0	1
63	3	0	0	0	0	12,66	-inf	inf	0	1
64	3	0	0,227	0	0,162	12,66	-inf	inf	0	1
65	3	0	0,059	0	0,042	12,66	-inf	inf	0	1
66	3	0	0,018	0	0,013	12,66	-inf	inf	0	1
67	3	0	0,018	0	0,013	12,66	-inf	inf	0	1
68	3	0	0,028	0	0,02	12,66	-inf	inf	0	1
69	3	0	0,028	0	0,02	12,66	-inf	inf	0	1

FONTE: Eminoglu *et al.* (2010).

TABELA 24 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS

(continua)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
1	2	0,0005	0,0012
2	3	0,0005	0,0012
3	4	0,0015	0,0036
4	5	0,0251	0,0294
5	6	0,366	0,1864
6	7	0,3811	0,1941
7	8	0,0922	0,047
8	9	0,0493	0,0251
9	10	0,819	0,2707
10	11	0,1872	0,0619
11	12	0,7114	0,2351
12	13	1,03	0,34
13	14	1.044	0,345
14	15	1.058	0,3496
15	16	0,1966	0,065
16	17	0,3744	0,1238
17	18	0,0047	0,0016
18	19	0,3276	0,1083
19	20	0,2106	0,0696
20	21	0,3416	0,1129
21	22	0,014	0,0046
22	23	0,1591	0,0526
23	24	0,3463	0,1145
24	25	0,7488	0,2475
25	26	0,3089	0,1021
26	27	0,1732	0,0572
3	28	0,0044	0,0108
28	29	0,064	0,1565
29	30	0,3978	0,1315
30	31	0,0702	0,0232
31	32	0,351	0,116
32	33	0,839	0,2816
33	34	1,708	0,5646
34	35	1,474	0,4873
3	36	0,0044	0,0108
36	37	0,064	0,1565
37	38	0,1053	0,123
38	39	0,0304	0,0355
39	40	0,0018	0,0021
40	41	0,7283	0,8509
41	42	0,31	0,3623

TABELA 24 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 69 BARRAS
(conclusão)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
42	43	0,041	0,0478
43	44	0,0092	0,0116
44	45	0,1089	0,1373
45	46	0,0009	0,0012
4	47	0,0034	0,0084
47	48	0,0851	0,2083
48	49	0,2898	0,7091
49	50	0,0822	0,2011
8	51	0,0928	0,0473
51	52	0,3319	0,1114
9	53	0,174	0,0886
53	54	0,203	0,1034
54	55	0,2841	0,1447
55	56	0,2813	0,1433
56	57	1,59	0,5337
57	58	0,7837	0,263
58	59	0,3041	0,1006
59	60	0,3861	0,1172
60	61	0,5075	0,2585
61	62	0,0974	0,0496
62	63	0,145	0,0738
63	64	0,7105	0,3619
64	65	1.041	0,5302
11	66	0,2012	0,0611
66	67	0,0047	0,0014
12	68	0,7394	0,2444
68	69	0,0047	0,0016
27	65	0,0047	0,0016
35	53	0,0047	0,0016
46	67	0,0047	0,0016

FONTE: Eminoglu *et al.* (2010).

ANEXO 2 – DADOS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

TABELA 25 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

Barra	Tipo	Pg	Pd (MW)	Qg	Qd (Mvar)	Nominal	Qmin	Qmax	bshunt	Vesp (pu)
1	1	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
2	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
3	3	0	0,04778	0	0,019009	13,8	-inf	inf	0	1
4	3	0	0,042551	0	0,016929	13,8	-inf	inf	0	1
5	3	0	0,087022	0	0,034622	13,8	-inf	inf	0	1
6	3	0	0,311131	0	0,123855	13,8	-inf	inf	0	1
7	3	0	0,148869	0	0,059228	13,8	-inf	inf	0	1
8	3	0	0,238672	0	0,094956	13,8	-inf	inf	0	1
9	3	0	0,062299	0	0,024786	13,8	-inf	inf	0	1
10	3	0	0,124598	0	0,049571	13,8	-inf	inf	0	1
11	3	0	0,140175	0	0,055768	13,8	-inf	inf	0	1
12	3	0	0,116813	0	0,046474	13,8	-inf	inf	0	1
13	3	0	0,291447	0	0,099145	13,8	-inf	inf	0	1
14	3	0	0,291447	0	0,115592	13,8	-inf	inf	0	1
15	3	0	0,30372	0	0,120835	13,8	-inf	inf	0	1
16	3	0	0,215396	0	0,085695	13,8	-inf	inf	0	1
17	3	0	0,198586	0	0,079007	13,8	-inf	inf	0	1
18	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
19	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
20	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
21	3	0	0,030127	0	0,079007	13,8	-inf	inf	0	1
22	3	0	0,230972	0	0,11292	13,8	-inf	inf	0	1
23	3	0	0,060256	0	0,029459	13,8	-inf	inf	0	1
24	3	0	0,230972	0	0,11292	13,8	-inf	inf	0	1
25	3	0	0,120507	0	0,058915	13,8	-inf	inf	0	1
26	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
27	3	0	0,056981	0	0,027857	13,8	-inf	inf	0	1
28	3	0	0,364665	0	0,178281	13,8	-inf	inf	0	1
29	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
30	3	0	0,124647	0	0,060939	13,8	-inf	inf	0	1
31	3	0	0,056981	0	0,027857	13,8	-inf	inf	0	1
32	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
33	3	0	0,085473	0	0,041787	13,8	-inf	inf	0	1
34	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
35	3	0	0,396735	0	0,19396	13,8	-inf	inf	0	1
36	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
37	3	0	0,181152	0	0,088563	13,8	-inf	inf	0	1
38	3	0	0,242172	0	0,118395	13,8	-inf	inf	0	1

TABELA 25 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

Barra	Tipo	Pg	Pd (MW)	Qg	Qd (Mvar)	Nominal	Qmin	Qmax	bshunt	Vesp (pu)
39	3	0	0,075316	0	0,036821	13,8	-inf	inf	0	1
40	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
41	3	0	0,001254	0	0,000531	13,8	-inf	inf	0	1
42	3	0	0,006274	0	0,00266	13,8	-inf	inf	0	1
43	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
44	3	0	0,11788	0	0,049971	13,8	-inf	inf	0	1
45	3	0	0,062668	0	0,025566	13,8	-inf	inf	0	1
46	3	0	0,172285	0	0,073034	13,8	-inf	inf	0	1
47	3	0	0,458556	0	0,194388	13,8	-inf	inf	0	1
48	3	0	0,262962	0	0,111473	13,8	-inf	inf	0	1
49	3	0	0,235761	0	0,099942	13,8	-inf	inf	0	1
50	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
51	3	0	0,109215	0	0,046298	13,8	-inf	inf	0	1
52	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
53	3	0	0,072809	0	0,030865	13,8	-inf	inf	0	1
54	3	0	0,258473	0	0,10957	13,8	-inf	inf	0	1
55	3	0	0,069169	0	0,029322	13,8	-inf	inf	0	1
56	3	0	0,021843	0	0,00926	13,8	-inf	inf	0	1
57	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
58	3	0	0,020527	0	0,008702	13,8	-inf	inf	0	1
59	3	0	0,150548	0	0,063819	13,8	-inf	inf	0	1
60	3	0	0,220687	0	0,093552	13,8	-inf	inf	0	1
61	3	0	0	0	0,039163	13,8	-inf	inf	0	1
62	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
63	3	0	0,226693	0	0,096098	13,8	-inf	inf	0	1
64	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
65	3	0	0,294016	0	0,116974	13,8	-inf	inf	0	1
66	3	0	0,083015	0	0,033028	13,8	-inf	inf	0	1
67	3	0	0,083015	0	0,033028	13,8	-inf	inf	0	1
68	3	0	0,10377	0	0,041285	13,8	-inf	inf	0	1
69	3	0	0,176408	0	0,070184	13,8	-inf	inf	0	1
70	3	0	0,083015	0	0,033028	13,8	-inf	inf	0	1
71	3	0	0,217917	0	0,086698	13,8	-inf	inf	0	1
72	3	0	0,023294	0	0,009267	13,8	-inf	inf	0	1
73	3	0	0,005075	0	0,002019	13,8	-inf	inf	0	1
74	3	0	0,072638	0	0,028899	13,8	-inf	inf	0	1
75	3	0	0,40599	0	0,161523	13,8	-inf	inf	0	1
76	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
77	3	0	0,100182	0	0,042468	13,8	-inf	inf	0	1
78	3	0	0,142523	0	0,060417	13,8	-inf	inf	0	1
79	3	0	0,096042	0	0,040713	13,8	-inf	inf	0	1

TABELA 25 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

Barra	Tipo	Pg	Pd (MW)	Qg	Qd (Mvar)	Nominal	Qmin	Qmax	bshunt	Vesp (pu)
80	3	0	0,300454	0	0,127366	13,8	-inf	inf	0	1
81	3	0	0,141238	0	0,059873	13,8	-inf	inf	0	1
82	3	0	0,279847	0	0,118631	13,8	-inf	inf	0	1
83	3	0	0,087312	0	0,037013	13,8	-inf	inf	0	1
84	3	0	0,243849	0	0,103371	13,8	-inf	inf	0	1
85	3	0	0,24775	0	0,105025	13,8	-inf	inf	0	1
86	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
87	3	0	0,089878	0	0,038101	13,8	-inf	inf	0	1
88	3	0	1,13728	0	0,482108	13,8	-inf	inf	0	1
89	3	0	0,458339	0	0,194296	13,8	-inf	inf	0	1
90	3	0	0,385197	0	0,16329	13,8	-inf	inf	0	1
91	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
92	3	0	0,079608	0	0,033747	13,8	-inf	inf	0	1
93	3	0	0,087312	0	0,037013	13,8	-inf	inf	0	1
94	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
95	3	0	0,074001	0	0,03137	13,8	-inf	inf	0	1
96	3	0	0,23205	0	0,098369	13,8	-inf	inf	0	1
97	3	0	0,141819	0	0,060119	13,8	-inf	inf	0	1
98	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
99	3	0	0,076449	0	0,032408	13,8	-inf	inf	0	1
100	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
101	3	0	0,051322	0	0,021756	13,8	-inf	inf	0	1
102	3	0	0,059874	0	0,025381	13,8	-inf	inf	0	1
103	3	0	0,009065	0	0,003843	13,8	-inf	inf	0	1
104	3	0	0,002092	0	0,000887	13,8	-inf	inf	0	1
105	3	0	0,016735	0	0,007094	13,8	-inf	inf	0	1
106	3	0	1,506522	0	0,638634	13,8	-inf	inf	0	1
107	3	0	0,313023	0	0,132694	13,8	-inf	inf	0	1
108	3	0	0,079831	0	0,033842	13,8	-inf	inf	0	1
109	3	0	0,051322	0	0,021756	13,8	-inf	inf	0	1
110	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
111	3	0	0,202435	0	0,085815	13,8	-inf	inf	0	1
112	3	0	0,060823	0	0,025874	13,8	-inf	inf	0	1
113	3	0	0,045618	0	0,019338	13,8	-inf	inf	0	1
114	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
115	3	0	0,15707	0	0,066584	13,8	-inf	inf	0	1
116	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
117	3	0	0,250148	0	0,106041	13,8	-inf	inf	0	1
118	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
119	3	0	0,068809	0	0,028593	13,8	-inf	inf	0	1
120	3	0	0,032072	0	0,013596	13,8	-inf	inf	0	1

TABELA 25 – DADOS DE BARRAS DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(conclusão)

Barra	Tipo	Pg	Pd (MW)	Qg	Qd (Mvar)	Nominal	Qmin	Qmax	bshunt	Vesp (pu)
121	3	0	0,061084	0	0,025894	13,8	-inf	inf	0	1
122	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1
123	3	0	0,094622	0	0,04626	13,8	-inf	inf	0	1
124	3	0	0,049858	0	0,024375	13,8	-inf	inf	0	1
125	3	0	0,123164	0	0,060214	13,8	-inf	inf	0	1
126	3	0	0,07835	0	0,038304	13,8	-inf	inf	0	1
127	3	0	0,145475	0	0,071121	13,8	-inf	inf	0	1
128	3	0	0,021369	0	0,010447	13,8	-inf	inf	0	1
129	3	0	0,074789	0	0,036564	13,8	-inf	inf	0	1
130	3	0	0,227926	0	0,111431	13,8	-inf	inf	0	1
131	3	0	0,035614	0	0,017411	13,8	-inf	inf	0	1
132	3	0	0,249295	0	0,121877	13,8	-inf	inf	0	1
133	3	0	0,316722	0	0,154842	13,8	-inf	inf	0	1
134	3	0	0,333817	0	0,163199	13,8	-inf	inf	0	1
135	3	0	0,249295	0	0,121877	13,8	-inf	inf	0	1
136	3	0	0	0	0	13,8	-inf	inf	0	1

FONTE: Lorenzetti (2004).

TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
1	2	0,33204928	0,766530522
2	3	0,001879643	0,004330606
3	4	0,223399451	0,515349684
4	5	0,099430628	0,229529714
5	6	0,155709457	0,359449787
7	8	0,114439205	0,26417075
7	9	0,056749216	0,056659709
9	10	0,521239993	0,274180277
9	11	0,108769806	0,108600314
11	12	0,398029122	0,209369736
11	13	0,917440891	0,314690674
11	14	0,118230865	0,118049947
14	15	0,502279787	0,264210743
14	16	0,056749216	0,056659709
16	17	0,293789884	0,154540156
1	18	0,33204928	0,766530522
18	19	0,001879643	0,004330606
19	20	0,223239481	0,515349684

TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
20	21	0,108809798	0,251180838
21	22	0,710779212	0,373879426
21	23	0,181969229	0,42008017
23	24	0,303260465	0,159520162
23	25	0,024389651	0,056299777
25	26	0,045020016	0,103940248
26	27	0,018760244	0,043309865
27	28	0,118230865	0,112300564
28	29	0,023650744	0,023610751
29	30	0,189539219	0,099699149
30	31	0,398029122	0,209369736
29	32	0,056749216	0,056659709
32	33	0,094770562	0,049849574
33	34	0,416989328	0,21933927
34	35	0,113719342	0,059819108
32	36	0,075659908	0,075549452
36	37	0,369600239	0,194420196
37	38	0,265359096	0,139579189
36	39	0,056749216	0,056600672
1	40	0,33204928	0,766530522
40	41	0,118190873	0,272830057
41	42	2,962880755	1,016279251
41	43	0,001879643	0,004330606
43	44	0,069409667	0,160240025
44	45	0,815020355	0,428720432
44	46	0,06378026	0,14724059
46	47	0,131319806	0,30315001
47	48	0,06191014	0,142909985
48	49	0,114439205	0,26417075
49	50	0,283740365	0,28330997
50	51	0,283740365	0,283210942
49	52	0,045020016	0,103940248
52	53	0,026259772	0,060630383
53	54	0,060030497	0,138579379
54	55	0,030019057	0,06928969
55	56	0,020639887	0,04764047
53	57	0,108809798	0,251180838
57	58	0,255880897	0,134599183
58	59	0,416989328	0,21933927
59	60	0,502279787	0,264210743
60	61	0,331700774	0,174479224

TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
61	62	0,208489903	0,109670587
48	63	0,138819334	0,320470528
1	64	0,007499527	0,017320518
64	65	0,27013914	0,623620537
65	66	0,382700606	0,883460682
66	67	0,330179159	0,762199916
67	68	0,328299516	0,757869311
68	69	0,170719938	0,394090823
69	70	0,559139458	0,294119345
69	71	0,058160376	0,134250678
71	72	0,701299109	0,36889942
72	73	102.351.978	0,538389115
71	74	0,067539546	0,155909419
74	75	1,323519912	0,453970872
1	76	0,011260717	0,025979825
76	77	0,729760367	1684639858
77	78	0,225119124	0,51968029
78	79	0,208240427	0,480710552
79	80	0,046899659	0,108270853
80	81	0,619499416	0,618570068
81	82	0,34048958	0,339979201
82	83	0,568619561	0,299110777
82	84	0,108769806	0,108600314
84	85	0,568619561	0,299110777
1	86	0,011260717	0,025979825
86	87	0,41834907	0,965749806
87	88	0,104989572	0,136410268
87	89	0,438979435	1,013380754
89	90	0,075200947	0,025789385
90	91	0,07692062	0,177560543
91	92	0,33204928	0,766530522
92	93	0,084420148	0,194879156
93	94	0,133199449	0,307480615
94	95	0,29319952	0,292759603
95	96	0,21753009	0,217210151
96	97	0,264820151	0,264429749
94	98	0,103180392	0,238190926
98	99	0,13506957	0,311809316
1	100	0,00937917	0,021649219
100	101	0,168840295	0,389760217
101	102	0,118190873	0,272830057

TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(continua)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
102	103	2286079848	0,784140509
102	104	0,455869559	1,052360014
104	105	0,695999164	1,606690861
105	106	0,45773968	1,056690619
106	107	0,202980474	0,263730834
107	108	0,213479431	0,277370147
108	109	0,549670781	0,289139339
109	110	0,540190678	0,284149811
108	111	0,045499925	0,059110672
111	112	0,473850904	0,249259298
112	113	0,862409444	0,453639506
113	114	0,568619561	0,299110777
109	115	0,777109464	0,40877946
115	116	1,080379451	0,568299622
110	117	1,066330692	0,578269156
117	118	0,473850904	0,249259298
105	119	0,32267011	0,744879398
119	120	0,146330287	0,337789141
120	121	0,123820279	0,285829492
1	122	0,011260717	0,025979825
122	123	0,649099505	1,498420008
123	124	0,045020016	0,103940248
124	125	0,526400917	0,180559973
124	126	0,020639887	0,04764047
126	127	0,530710574	0,279169805
126	128	0,097549081	0,225199109
128	129	0,118190873	0,272830057
128	130	0,138819334	0,320470528
130	131	0,043149895	0,099609642
131	132	0,091919675	0,212199674
132	133	0,161340768	0,372439699
133	134	0,378320486	0,377749166
134	135	0,3972407	0,396640814
135	136	0,29319952	0,292759603
8	74	0,131319806	0,30315001
10	25	0,265359096	0,139579189
16	84	0,141870182	0,141660698
39	136	0,085119062	0,084989563
26	52	0,045020016	0,103940248
51	97	0,141870182	0,141660698
56	99	0,141870182	0,141660698

TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA-TESTE DE 136 BARRAS

(conclusão)

De	Para	r (Ω)	x (Ω)
63	121	0,039400132	0,090940813
67	80	0,129440164	0,298819404
80	132	0,016880602	0,038979259
85	136	0,331700774	0,174479224
92	105	0,141870182	0,171660712
91	130	0,07692062	0,177560543
91	104	0,07692062	0,177560543
93	105	0,07692062	0,177560543
93	133	0,07692062	0,177560543
97	121	0,264820151	0,264429749
111	48	0,496960798	0,64566968
127	77	0,170590439	0,089729615
129	78	0,052529065	0,121260766
136	99	0,29319952	0,292759603

FONTE: Lorenzetti (2004).