



**Carlos Aparecido Ferreira**

**Novo Modelo de Transformador com Tap Variável em  
Regime Permanente**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro

Junho de 2011



**Carlos Aparecido Ferreira**

**Novo Modelo de Transformador com Tap Variável  
em Regime Permanente**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Ricardo Bernardo Prada**

**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Vander Menengoy da Costa**

UFJF

**Prof. Luiz Claudio de Araujo Ferreira**

Operador Nacional do Sistema Elétrico

**Prof. Ricardo Mota Henriques**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

**Prof. Jorge Coelho**

UFSC

**Prof. Jorge Luiz de Araujo Jardim**

UFF

**Prof. Luiz Carlos Pereira da Silva**

Unicamp

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 30 de junho de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Carlos Aparecido Ferreira**

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2002, e Mestre em Engenharia Elétrica, também pela UFJF, em 2003. Atualmente é engenheiro dos quadros da Eletrobras.

#### Ficha Catalográfica

Ferreira, Carlos Aparecido

Novo modelo de transformador com tap variável em regime permanente / Carlos Aparecido Ferreira; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2011.

195 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Transformador com tap variável. 3. LTC. 4. OLTC. 5. ULTC. 6. Estabilidade de tensão. 7. Modelo em regime permanente. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda ciência; mesmo que eu tivesse toda fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver amor não sou nada.*

(Paulo de Tarso)

Dedico esta tese aos meus pais: Carlos Humberto Ferreira e  
Neuza Maria de Lima Ferreira.

## Agradecimentos

Ao Deus salvador.

À intercessão de Nossa Senhora Aparecida.

Aos meus pais: Carlos Humberto Ferreira e Neuza Maria de Lima Ferreira pelo amor, sacrifícios e fé.

Aos meus irmãos: Carla, Cláudia e Caio e ao meu cunhado Luiz Carlos.

Ao meu orientador Ricardo Prada por todos os ensinamentos repassados ao longo desses anos, pela sabedoria acadêmica, segurança técnica, seriedade e atenção.

Às amigas que estão resistindo ao tempo, às distâncias, às diferenças, às dificuldades e às minhas indisponibilidades. Especialmente agradeço ao Pe. Paulo Alves Romão, pela disponibilidade em me ajudar no momento mais difícil.

Aos meus colegas da Eletrobras pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho, especialmente aos amigos do Procel Indústria.

Ao Departamento de Planejamento de Transmissão da Eletrobras e à Eletrobras Cepel, pela utilização do *software* ANAREDE.

Aos meus demais familiares, especialmente à minha avó e madrinha Alaíde Ferreira Ruffo (*in memorian*) e aos meus primos Flavio de Melo Ferreira (*in memorian*) e Luiz Antonio Ferreira de Lima.

## Resumo

Ferreira, Carlos Aparecido; Prada, Ricardo Bernardo (Orientador). **Novo Modelo de Transformador com Tap Variável em Regime Permanente**. Rio de Janeiro, 2011. 195p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O fenômeno de estabilidade de tensão vem despertando grande interesse acadêmico e das principais empresas de energia elétrica do mundo desde que começou a ser observado em sistemas reais, no final da década de setenta. Sua ocorrência está relacionada ao carregamento excessivo das linhas de transmissão. Modelar transformador com *tap* variável adequadamente é fundamental em análises de estabilidade de tensão, tanto no que diz respeito às informações fornecidas ao operador referentes às margens de estabilidade de tensão, quanto aos efeitos de ações de controle de tensão. O modelo de transformador com *tap* variável utilizado mundialmente consiste de uma impedância, obtida através do ensaio em curto-circuito e com *tap* nominal, em série com um transformador ideal. Esta tese mostra que, em estudos de estabilidade de tensão, o uso desse modelo leva a resultados qualitativamente errados. Para demonstração, utiliza-se um circuito pequeno e os conceitos de máxima potência transmitida, impedância equivalente da carga, e efeito do controle de tensão. Propõe-se um novo modelo coerente com os resultados obtidos em laboratório, com as leis de circuitos elétricos e com a teoria de estabilidade de tensão. Esse modelo pode ser utilizado em qualquer estudo em regime permanente. Através de diversas simulações computacionais, diferenças quantitativas e principalmente qualitativas foram obtidas comparando-se os resultados dos dois modelos.

## Palavras-chave

Transformador com *tap* variável; LTC; OLTC; ULTC; estabilidade de tensão; modelo em regime permanente.

## Abstract

Ferreira, Carlos Aparecido; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **An Improved Steady-State Model for Tap-Changing Transformer**. Rio de Janeiro, 2011. 195p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The voltage stability phenomenon is of interest since it began to be observed in real systems in the late seventies. It happens due to excessive loading of transmission lines. The modeling of tap-changing transformers is fundamental in voltage stability analysis, in terms of the information provided to the operator about voltage stability margins and the effects of voltage control actions. The model for tap-changing transformers currently in widespread use consists of an impedance, measured in a short-circuit test with a nominal tap, in series with an ideal transformer. The use of this model in voltage stability studies leads to qualitatively incorrect results, as shown in this thesis. For demonstration purpose a small circuit and the concepts of maximum load, equivalent load impedance and voltage control effects are used. An improved model that takes into account laboratory results, circuit laws and voltage stability theory is proposed. This model can be used in any steady-state study. It gives results that are not only more accurate than those obtained with the conventional model, but also, as shown in this thesis, qualitatively different.

## Keywords

Tap-changing transformer; LTC; OLTC; ULTC; voltage stability; steady-state model.

# Sumário

<b>1. Introdução</b>	<b>21</b>
1.1. Considerações Gerais	21
1.2. Motivação	22
1.3. Objetivo	22
1.4. Estrutura da Tese	23
<b>2. Estabilidade de Tensão</b>	<b>25</b>
2.1. Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão	25
2.1.1. Introdução	25
2.1.2. Curvas $\phi_l$ Constante no Plano $S_1 V_1$	30
2.1.3. Ações para Aumento da Máxima Capacidade de Transmissão e de Controle de Tensão	31
2.1.4. Problema de Estabilidade de Tensão Devido ao Suporte Excessivo de Potência Reativa	34
2.1.5. Impedância Equivalente da Carga no Ponto de Máximo Carregamento	36
2.1.6. Existência de uma Potência “Maximum Maximorum”	38
2.1.7. Resumo	39
2.2. Avaliação e Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão	40
<b>3. Avaliação do Modelo Usual de Transformador com Tap Variável em Estabilidade de Tensão</b>	<b>42</b>
3.1. Modelo Usual de Transformador com Tap Variável	42
3.1.1. Transformadores em Regime Permanente	42
3.1.2. Transformador com Tap Variável	43
3.1.3. Representação de Transformadores em Por Unidade	44
3.1.3.1. Exemplo: Vantagem da Representação em p.u.	44
3.1.3.2. Modelo Usual de Transformador com Tap Variável: Transformador em Série com Impedância	45
3.1.3.3. Exemplo: Reintrodução do Transformador Ideal	47
3.1.3.4. Circuito $\Pi$ Equivalente ao Modelo Usual	51
3.1.3.5 Referências Iniciais sobre o Modelo Usual	53
3.2. Modelo Usual de Transformador com Tap Variável em Estudos de Estabilidade de Tensão	53
<b>4. Modelo Proposto para Transformador com Tap Variável e Impactos em Estudos de Estabilidade de Tensão</b>	<b>57</b>
4.1. Modelo Proposto	57
4.2. Exemplo	60
4.3. Circuito $\pi$ Equivalente ao Modelo Proposto	62
4.4. Modelo Proposto em Estudos de Estabilidade de Tensão	64
4.5. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto em Estudos de Estabilidade de Tensão	66

<b>5 Controle de Tensão através de Transformador com <i>Tap</i> Variável no Problema de Fluxo de Potência</b>	<b>72</b>
5.1. Introdução	72
5.2. Modelagem Matemática	73
5.2.1. Controle de Tensão no Modelo Usual	74
5.2.2. Controle de Tensão no Modelo Proposto	76
5.3. Limites dos <i>Taps</i>	80
<b>6. Resultados</b>	<b>81</b>
6.1. Teste em Laboratório	81
6.1.1. Fluxo de Potência do Lado de Baixa para o Lado de Alta Tensão	81
6.1.2. Fluxo de Potência do Lado de Alta para o Lado de Baixa Tensão	82
6.2. Simulações Computacionais	85
6.2.1. Sistemas Radiais	85
6.2.1.1. Sistema de 2 Barras	85
6.2.1.2. Sistema de 4 Barras	90
6.2.2. Sistemas Malhados	95
6.2.2.1. IEEE 14 Barras	95
6.2.2.2. IEEE 118 Barras	97
6.2.2.3. IEEE 30, 57 e 300 Barras	100
6.2.3. Controle de Tensão através de Transformador com <i>Tap</i> Variável	102
6.2.3.1. IEEE 14 Barras	103
6.2.3.2. IEEE 30 Barras	104
6.2.3.3. IEEE 57 Barras	109
6.2.3.4. IEEE 118 Barras	111
6.2.3.5. IEEE 300 Barras	113
6.2.4. Sistemas Brasileiros	114
6.2.4.1. Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	114
6.2.4.2. Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	121
6.2.4.3. Controle de Tensão por Meio de Transformador com <i>Tap</i> Variável	131
6.2.4.3.1. Representação do Modelo Proposto	131
6.2.4.3.2. Controle de Tensão no Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	132
6.2.4.3.3. Controle de Tensão no Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	138
6.2.4.4. Índices de Estabilidade de Tensão	147
6.2.4.4.1. Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	147
6.2.4.4.2. Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	149
6.3. Conclusões, Recomendação e Trabalhos Futuros	151
<b>7. Conclusões e Próximos Estudos</b>	<b>152</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>155</b>
<b>Apêndice I - Circuitos <math>\Pi</math> Equivalente de Transformador com <i>Tap</i> Variável</b>	<b>161</b>
I.1. Circuito $\Pi$ Equivalente ao Modelo Usual de Transformador com <i>Tap</i> Variável	161
I.2. Circuito $\Pi$ Equivalente ao Modelo Proposto de Transformador com <i>Tap</i> Variável	163

<b>Apêndice II - Exemplos da Literatura sobre Variação de <i>Tap</i> de Transformador com <i>Tap</i> Variável</b>	<b>165</b>
II.1. Exemplos de Artigos	165
II.2. Exemplo de Relatório IEEE	166
<b>Apêndice III - Impedâncias do Modelo Físico de Transformador com <i>Tap</i> Variável</b>	<b>170</b>
III.1. Obtenção das Impedâncias através do Teste de Curto-Circuito no Transformador	170
III.2. Tentativa de Obtenção das Impedâncias através de Dois Testes de Curto-Circuito no Transformador	173
<b>Apêndice IV - Impedâncias do Modelo Físico de Autotransformador com <i>Tap</i> Variável</b>	<b>175</b>
IV.1. Conceitos Básicos sobre Autotransformador	175
IV.1.1. Autotransformador Ideal	175
IV.1.2. Autotransformador Real	178
IV.2. Determinação das Impedâncias do Circuito Equivalente	181
<b>Apêndice V - Tensões Críticas para Sistema de 2 Barras</b>	<b>181</b>
V.1. Modelo Usual	181
V.2. Modelo Proposto	182
<b>Apêndice VI - Comparação entre os Modelos Usual e Proposto de Transformador com <i>Tap</i> Variável nos Programas ORGANON e PSAT</b>	<b>185</b>
VI.1. Comparação entre os Modelos através do Programa ORGANON	185
VI.2. Comparação entre os Modelos através do Programa PSAT	188

## Lista de figuras

Figura 2.1. Sistema de 2 Barras sem Qualquer Limitação	25
Figura 2.2. Curvas $P_I$ Constante no plano $\theta_I V_I$	26
Figura 2.3. Curvas $Q_I$ Constante no plano $\theta_I V_I$	27
Figura 2.4. Curvas $\phi_I$ Constante no plano $\theta_I V_I$	28
Figura 2.5. Curvas $P_I$ , $Q_I$ e $\phi_I$ Constantes no Plano $\theta_I V_I$	29
Figura 2.6. Curvas $P_{I_{max}}$ , $Q_{I_{max}}$ e $\phi_I$ Constantes no Plano $\theta_I V_I$	29
Figura 2.7. Curvas $P_I$ , $Q_I$ e $\phi_I$ Constante no Plano $\theta_I V_I$ com Carregamento Maior que o Máximo	30
Figura 2.8. Curvas $\phi_I$ Constante no Plano $S_I V_I$	31
Figura 2.9. Sistema de 2 Barras com Capacitor	32
Figura 2.10. Curvas para as Situações Com e Sem Capacitor e Análise da Ação de Controle de Tensão com Ponto de Operação na Região Normal	33
Figura 2.11. Curvas para as Situações Com e Sem Capacitor e Análise da Ação de Controle de Tensão com Ponto de Operação na Região Anormal	33
Figura 2.12. Excesso de Compensação de Potência Reativa Levando o Ponto de Máximo Carregamento e a Região Anormal para a Faixa Usual de Operação das Tensões	35
Figura 2.13. Sistema de 2 Barras com Carga Modelada como Impedância Constante	36
Figura 2.14. Sistema Genérico de 2 barras	37
Figura 2.15. Equivalente de Thevenin do Sistema Genérico	37
Figura 2.16. Sistema de 2 Barras com Capacitor com Carga Modelada como Impedância Constante	37
Figura 2.17. Indicação das Impedâncias no Ponto de Máximo Carregamento nas Situações Sem e Com Capacitor	38
Figura 2.18. Existência de uma Potência Máxima mesmo com Capacidade Infinita de Suporte de Potência Reativa	39
Figura 3.1. Modelo de um Transformador Operando em Regime Permanente	42
Figura 3.2. Modelo Simplificado de Transformador Operando em Regime Permanente	43
Figura 3.3. Representação de Transformadores em p.u. quando Valores-Base de Tensão obedecem a Relação de Transformação	45
Figura 3.4. Modelo Usual de Transformador com $Tap$ Variável	46
Figura 3.5. Sistema de 3 Barras	47
Figura 3.6. Sistema de 3 Barras em p.u.	48
Figura 3.7. Sistema de 3 Barras em p.u. Modificado devido a Alteração do $Tap$	49
Figura 3.8. Sistema de 3 Barras em p.u. com Inserção do Transformador Ideal	50

Figura 3.9. Circuito $\pi$ (com Impedâncias) Equivalente ao Modelo Usual de Transformador com <i>Tap</i> Variável	51
Figura 3.10. Circuito $\pi$ (com Admitâncias) Equivalente ao Modelo Usual de Transformador com <i>Tap</i> Variável	52
Figura 3.11. Curvas $\phi$ e $Z$ Constante para Dois Valores de <i>Tap</i> com o Modelo Usual e com Fluxo da Barra $k$ para a Barra $m$	55
Figura 3.12. Curvas $\phi$ e $Z$ Constantes para dois Valores de <i>Tap</i> com o Modelo Usual e com Fluxo da Barra $m$ para a Barra $k$	55
Figura 4.1. Modelo Físico de Transformador com <i>Tap</i> Variável	58
Figura 4.2. Modelo Físico de Transformador com <i>Tap</i> Variável em p.u com $\dot{Z}_k(p.u.) = \dot{Z}_m(p.u.)$	58
Figura 4.3. Modelo Proposto para Transformador com <i>Tap</i> Variável	59
Figura 4.4. Modelo Proposto para Transformador com <i>Tap</i> Variável com Reflexão de Impedância	60
Figura 4.5. Variação da Impedância com o <i>Tap</i> do Transformador para os Modelos Usual e Proposto	60
Figura 4.6. Sistema de 3 Barras com Modelo Físico do Transformador	61
Figura 4.7. Sistema de 3 Barras em p.u. com Modelo Proposto do Transformador com <i>Tap</i> Variável	61
Figura 4.8. Circuito $\pi$ (com Impedâncias) Equivalente ao Modelo Proposto	62
Figura 4.9. Circuito $\pi$ (com Admitâncias) Equivalente ao Modelo Proposto	63
Figura 4.10. Curvas $\phi$ e $Z$ Constante para Dois Valores de <i>Tap</i> com o Modelo Proposto e com Fluxo da Barra $k$ para a Barra $m$	65
Figura 4.11. Curvas $\phi$ e $Z$ Constantes para dois Valores de <i>Tap</i> com o Modelo Proposto e com Fluxo da Barra $m$ para a Barra $k$	66
Figura 4.12. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra $k$ para barra $m$	67
Figura 4.13. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra $k$ para barra $m$	67
Figura 5.1. Controle de Tensão Através de Transformador com <i>Tap</i> Variável	73
Figura 5.2. Modelo Usual com Admitância	74
Figura 5.3. Modelo Proposto Representado Através de Admitâncias	76
Figura 5.4. Modelo Proposto com Reflexão de Admitância	77
Figura 6.1. Curvas $\phi$ Constante para Dois Valores de <i>Tap</i> Obtidas em Laboratório e com Fluxo de Potência do Lado de Baixa para o Lado de Alta Tensão	82
Figura 6.2. Curvas $\phi$ Constante para Dois Valores de <i>Tap</i> Obtidas em Laboratório e com Fluxo de Potência do Lado de Alta para o Lado de Baixa Tensão	83
Figura 6.3. Sistema de 2 Barras	85
Figura 6.4. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 2	87
Figura 6.5. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 2 para Barra 1	87
Figura 6.6. Sistema de 4 barras	90

Figura 6.7. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 4 / Curvas Referentes à Barra 4	91
Figura 6.8. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 4 / Curvas Referentes à Barra 3	92
Figura 6.9. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 1 para Barra 4 / Curvas Referentes à Barra 2	92
Figura 6.10. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 4 para Barra 1 / Curvas Referentes à Barra 1	93
Figura 6.11. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 4 para Barra 1 / Curvas Referentes à Barra 2	94
Figura 6.12. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto com Fluxo da Barra 4 para Barra 1 / Curvas Referentes à Barra 3	94
Figura 6.13. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 5 / IEEE14 Barras	96
Figura 6.14. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 6 / IEEE14 Barras	96
Figura 6.15. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 17 / IEEE 118 Barras	98
Figura 6.16. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 30 / IEEE 118 Barras	98
Figura 6.17. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 37 / IEEE 118 Barras	99
Figura 6.18. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 38 / IEEE 118 Barras	99
Figura 6.19. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 30 / IEEE 30 Barras	100
Figura 6.20. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 31 / IEEE 57 Barras	101
Figura 6.21. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9033 / IEEE 300 Barras	101
Figura 6.22. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9 / Controle de Tensão / IEEE 14 Barras	103
Figura 6.23. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 4 e 9 / Controle de Tensão / IEEE 14 Barras	104
Figura 6.24. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	105
Figura 6.25. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 6 e 9 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	105
Figura 6.26. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 12 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	106
Figura 6.27. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 4 e 12 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	106
Figura 6.28. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 24 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	107
Figura 6.29. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 27 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	108

Figura 6.30. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 28 e 27 / Controle de Tensão / IEEE 30 Barras	108
Figura 6.31. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 32 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras	109
Figura 6.32. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 32 e 34 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras.	110
Figura 6.33. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 50 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras	110
Figura 6.34. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 10 e 51 / Controle de Tensão / IEEE 57 Barras	111
Figura 6.35. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 38 / Controle de Tensão / IEEE 118 Barras	112
Figura 6.36. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 37 e 38 / Controle de Tensão / IEEE 118 Barras	112
Figura 6.37. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 9003 / Controle de Tensão / IEEE 300 Barras	113
Figura 6.38. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Transformador entre as Barras 9001 e 9006 / Controle de Tensão / IEEE 300 Barras	113
Figura 6.39. Sistema-Teste de 16 Barras	114
Figura 6.40. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 4 / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	119
Figura 6.41. Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Continuo / Modelo Usual / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	120
Figura 6.42. Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Continuo / Modelo Proposto / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras	120
Figura 6.43. Sistema-Teste de 33 Barras	121
Figura 6.44. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto / Barra 960 / Sistema Teste Brasileiro de 33 Barras	129
Figura 6.45. Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Continuo / Modelo Usual / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	130
Figura 6.46. Número de Iterações para Obtenção de cada Ponto do Fluxo de Potência Continuo / Modelo Proposto / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	131
Figura 6.47. Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras com Barras Fictícias	133
Figura I.1. Circuito $\Pi$ Genérico	161
Figura II.1. Efeito da Variação de <i>Tap</i> de Transformador com <i>Tap</i> Variável [36]	165
Figura II.2. Efeito da Variação de <i>Tap</i> de de Transformador com <i>Tap</i> Variável [37]	166
Figura II.3. Circuito do Exemplo	167
Figura II.4. Efeitos da Variação do <i>Tap</i> [38]	168
Figura II.5. Efeitos da Variação do <i>Tap</i> a Partir de (II.1)	168

Figura III.1. Curto-Circuito para Determinação do Valor Total da Impedância apresentado em [24]	171
Figura III.2. Triângulo Referente ao Curto-Circuito Apresentado em [24]	171
Figura IV.1. Autotransformador Ideal	176
Figura IV.2. (A) – Autotransformador (B) – Transformador Equivalente	177
Figura IV.3. Circuito Equivalente de um Autotransformador	178
Figura IV.4. Circuito Equivalente de um Autotransformador Obtido através do Teste de Curto-Circuito	179
Figura IV.5. Circuito Equivalente de um Transformador Convencional (Sem Ligação Entre as Bobinas) obtido através do Teste de Curto-Circuito	179
Figuras IV.6. Transformador Convencional Equivalente ao Autotransformador	180
Figura VI.1. Sistema de 9 Barras apresentado em [50] com Barras Fictícias	185
Figura VI.2. Sistema de 14 Barras Apresentado em [51] com Barras Fictícias	189

## Lista de tabelas

Tabela 4.1. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto Relativa à Margem de Estabilidade de Tensão	69
Tabela 4.2. Comparação entre os Modelos Usual e Proposto Relativa às Ações de Controle de Tensão	71
Tabela 6.1. Grandezas Referentes ao Caso-Base (A) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o Tap para 1.1 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 1 para a Barra 2	88
Tabela 6.2. Grandezas Referentes ao Caso-Base (B) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o Tap para 1.1 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 1 para a Barra 2	88
Tabela 6.3. Grandezas Referentes ao Caso-Base (A) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o Tap para 0.9 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 2 para a Barra 1	89
Tabela 6.4. Grandezas Referentes ao Caso-Base (B) e Comparação entre os Modelos Usual e Proposto ao Alterar o Tap para 0.9 p.u., com Fluxo de Potência da Barra 2 para a Barra 1	89
Tabela 6.5. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual	115
Tabela 6.6. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual	116
Tabela 6.7. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto	117
Tabela 6.8. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto	117
Tabela 6.9. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual	122
Tabela 6.10. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual	123
Tabela 6.11. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Barra / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto	125
Tabela 6.12. Relatório com Solução do Fluxo de Potência / Dados de Linha / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto	126
Tabela 6.13. Relatório do ANAREDE para Solução do Fluxo de Potência / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual	134
Tabela 6.14. Relatório do ANAREDE para Solução do Fluxo de Potência / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto	136
Tabela 6.15. Informações sobre os Transformadores do Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	139
Tabela 6.16. Relatório do ANAREDE para Solução do Fluxo de Potência / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual	140
Tabela 6.17. Relatório do ANAREDE para Solução do Fluxo de Potência / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto	143
Tabela 6.18. Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Usual	148

Tabela 6.19. Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 16 Barras / Modelo Proposto	148
Tabela 6.20. Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Usual	149
Tabela 6.21. Relatório com Índices de Estabilidade de Tensão / Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras / Modelo Proposto	150
Tabela VI.1. Tensões nas Barras do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Usual	186
Tabela VI.2. Carregamento dos Ramos da Rede do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Usual	186
Tabela VI.3. Resultados da Áreas do Sistema / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Usual	186
Tabela VI.4. Tensões do Relatório de Fluxo de Potência [43] para Sistema de 9 Barras	187
Tabela VI.5. Tensões nas Barras do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Proposto	187
Tabela VI.6. Carregamento dos Ramos da Rede do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Proposto	187
Tabela VI.7. Resultados da Áreas do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Proposto	187
Tabela VI.8. Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT / Dados de Barra / Sistema de 14 Barras / Modelo Usual	190
Tabela VI.9. Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT / Dados de Linha / Sistema de 14 Barras / Modelo Usual	191
Tabela VI.10. Tensões do Relatório de Fluxo de Potência [43] para Sistema de 14 Barras	192
Tabela VI.11. Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT / Dados de Barra / Sistema de 14 Barras / Modelo Proposto	193
Tabela VI.12. Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT / Dados de Linha / Sistema de 14 Barras / Modelo Proposto	194

## Simbologia e Siglas

$V_k$	Módulo da tensão na barra $k$ ;
$\theta_k$	Ângulo da tensão na barra $k$ ;
$P_k$	Potência ativa na barra $k$
$Q_k$	Potência reativa na barra $k$
$S_k$	Potência aparente na barra $k$
$Z_t$	Módulo da impedância da linha de transmissão
$\alpha_t$	Ângulo da impedância da linha de transmissão
$\phi_l$	Ângulo do fator de potência
$X_c$	Reatância capacitiva
$\dot{Z}_{th}$	Impedância de Thevenin
$\dot{Z}_{sh}$	Impedância <i>shunt</i>
$R_k + jX_k$	Impedância série do lado $k$ do transformador, composta pela resistência do enrolamento e pela reatância de dispersão do referido lado
$R'_k + jX'_k$	Impedância série do lado $k$ do transformador referida para o outro lado
$R_f$	Resistência <i>shunt</i> do transformador referente às perdas no ferro
$X_{mag}$	Reatância de magnetização
$N_k$	Número de espiras do lado $k$ do transformador
$a$	<i>Tap</i> do transformador em p.u.
$\Delta P_k$	Resíduo de potência ativa líquida na barra $k$ ;
$\Delta Q_k$	Resíduo de potência reativa líquida na barra $k$ ;
$I_{km}$	Corrente elétrica no ramo $km$ no sentido de $k$ para $m$ ;
$I_{mk}$	Corrente elétrica no ramo $km$ no sentido de $m$ para $k$ ;
$P_{mk}$	Fluxo de potência ativa da barra $m$ para a barra $k$ ;
$Q_{km}$	Fluxo de potência reativa da barra $k$ para a barra $m$ ;
$\gamma$	Carregamento adicional utilizado no fluxo de potência continuado.
$P_{D_k}$	Potência ativa demandada de uma barra $k$ qualquer
$Q_{D_k}$	Potência reativa demandada de uma barra $k$ qualquer

$P_{D_k}^0$	Potência ativa demandada de uma barra $k$ qualquer no caso-base
$Q_{D_k}^0$	Potência reativa demandada de uma barra $k$ qualquer no caso-base
LTC	Load <i>Tap</i> Changer
OLTC	On-Load Tap Changing
ULTC	Under-Load Tap Changing
NLTC	No-Load Tap Changing