



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO MESQUITA FILHO”**  
Campus de Ilha Solteira

**Dissertação de Mestrado**

**Fluxo de Carga Não – Iterativo para a Análise de  
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais e  
Malhados**

**Elson Batista Puger**

**Orientador:** Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores

Ilha Solteira – SP

Fevereiro 2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“ JÚLIO MESQUITA FILHO”**  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Fluxo de Carga Não – Iterativo para a Análise de  
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais e  
Malhados**

**Elson Batista Puger**

**Orientador:** Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha  
Solteira, para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP

Fevereiro 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

P978f Puger, Elson Batista.  
Fluxo de carga não-iterativo para a análise de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais e malhados / Elson Batista Puger. – Ilha Solteira : [s.n.], 2013  
96 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Marcos Julio Rider Flores  
Inclui bibliografia

1. Fluxo de carga não-iterativo. 2. Equações diferenciais lineares. 3. Sistema de equações lineares. 4. GRASP (Sistema operacional de computador). 5. Metaheurística GRASP. 6. Energia elétrica – Distribuição. 7. Reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Fluxo de Carga Não-Iterativo para a Análise de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais e Malhados

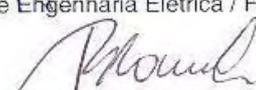
**AUTOR:** ELSON BATISTA PUGER

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES

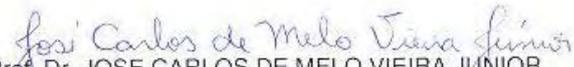
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSE CARLOS DE MELO VIEIRA JUNIOR  
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp

Data da realização: 22 de fevereiro de 2013.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus primeiramente pela força que me tem dado, a minha esposa Geisiane e todos os nossos familiares que tem contribuído para a realização deste trabalho, a todos os professores da pós, a todos os colegas e companheiro de pesquisa e especialmente aos meus amigos: Marlon Borges, Érica Tatiane, Julio Lopes, Victor Alberto, Marcia Cristina que contribuíram muito na elaboração deste trabalho e ao Professor Marcos J. Rider pela paciência e companheirismo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela força e paciência, a qual é o motivo de estar terminado este trabalho.

Também agradeço a minha esposa pela paciência, compreensão e por estar sempre ao meu lado me incentivando a concretizar meu sonho.

Fico grato pela minha família, que mesmo distante me apoiaram e me ajudaram a suportar muitas dificuldades as quais surgem a todo o momento.

Agradeço a professora Márcia Cristina Dal Toé por sua amizade e carisma e pelo apoio, a qual me proporcionou estar aqui.

Também agradeço ao professor Josimar de Souza (professor da Universidade Estadual de Mato Grosso) pelo apoio e por sua amizade.

Também agradeço todos os amigos do laboratório (LaPSEE) pela amizade, pela força que deram de forma direta ou indiretamente para elaborar este trabalho.

Agradeço a todos os professores da pós-graduação por contribuírem de forma gradativa no processo de elaboração deste trabalho, em especial agradeço ao professor Marcos Julio Rider Flores pela força, paciência, compreensão, pelo conhecimento que tem me transmitido e pela excelente orientação a qual vem contribuindo na elaboração deste trabalho e na minha profissão. Nem sempre temos palavras suficientes para caracterizar quão grandes e quão importantes seja a participação destes profissionais na carreira acadêmica de cada um que passa por aqui. Neste caso deixo para que Deus complete as frases as palavras para dar a eles as devidas qualidades merecidas.

Também agradeço por toda a amizade que tenho conquistado aqui nesta cidade (Ilha Solteira - SP), especialmente ao meu grande amigo e parceiro Josué Fernandes de Souza e sua esposa Dalila pelo apoio fraterno e financeiro que me proporcionaram.

Também agradeço a Capes pelo apoio financeiro, pois sem este apoio seria ainda muito mais difícil.

## RESUMO

Nesta dissertação de mestrado propõe-se um fluxo de carga não – iterativo para calcular o ponto de operação em regime permanente de um sistema de distribuição de energia elétrica radial ou malhado. No fluxo de carga proposto, as demandas do sistema de distribuição de energia elétrica são modeladas através de aproximações lineares em termos das partes real e imaginária da magnitude de tensão, tendo em conta que os ângulos de fase das tensões do sistema de distribuição se mantêm dentro de um intervalo relativamente pequeno e limitado para as condições típicas de operação do sistema de distribuição de energia elétrica. Os coeficientes das aproximações lineares são obtidos a partir do método de mínimos quadrados. O fluxo de carga proposto está composto por três fases: 1) estimação da magnitude de tensão mínima e do ângulo máximo e mínimo de fase das tensões; 2) cálculo do ponto de operação em regime permanente inicial; e 3) correção do ponto de operação obtido na fase 2. O fluxo de carga proposto foi implementado na linguagem de programação MATLAB 7.9.0 (R2009a) e testado usando diferentes sistemas de distribuição de energia elétrica de pequeno e grande porte. A partir dos resultados obtidos observou-se a eficiência e precisão do fluxo de carga proposto quando comparados com os métodos de fluxo de carga existentes na literatura. Tendo em conta estas características, foi resolvido o problema de reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica utilizando o fluxo de carga proposto com o auxílio da metaheurística GRASP, com o objetivo de mostrar que o fluxo de carga é eficiente e rápido para resolver outros problemas típicos nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

**Palavras-chaves:** Fluxo de carga não-iterativo. Sistema de equações lineares. Metaheurística GRASP. Reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica.

## **ABSTRACT**

This dissertation proposes a load flow non-iterative to calculate the operating point in steady state of a radial or meshed electric power distribution system. In the proposed load flow, the demands of the electric power distribution system are modeled using linear approximations in terms of the real and imaginary parts of the voltage magnitude, taking into account that the phase angles of the voltages of distribution system remains within of a range relatively small and limited in the typical conditions of electric power distribution system operation. The coefficients of the linear approximations are obtained from the least-squares method. The proposed load flow is composed of three phases: 1) estimate the minimum voltage magnitude and the maximum and minimum phase angle of voltages, 2) calculation of the operating point in steady state initial, and 3) correction of the operating point obtained in phase 2. The proposed load flow was implemented in the programming language MATLAB7.9.0 (R2009a) and tested using several electric power distribution systems. The results obtained showed efficiency and accuracy of the proposed load flow when was compared with the load flow methods existing in the literature. Given these characteristics, the reconfiguration problem of electric power distribution system was solved using the proposed load flow with the help of the GRASP metaheuristic, aiming to show that the load flow is efficient and fast to solve other typical problems in the electric power distribution systems.

**Keywords:** Load flow non-iterative. System of linear equations. GRASP metaheuristic. Reconfiguration of electric power distribution system.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Sistema teste de distribuição de dois nós	34
<b>Figura 2</b> - Comportamento do ângulo $\theta_j$	37
<b>Figura 3</b> - Exemplo ilustrativo para descrever o estado de operação de SDEE	38
<b>Figura 4</b> - Erro percentual da magnitude da corrente do fluxo atual	42
<b>Figura 5</b> - Exemplo de um sistema teste de dois nós	43
<b>Figura 6</b> - Exemplo de um sistema teste malhado de três nós	50
<b>Figura 7</b> - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 33 nós	57
<b>Figura 8</b> - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 70 nós	59
<b>Figura 9</b> - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 136 nós	62
<b>Figura 10</b> - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 202 nós	64
<b>Figura 11</b> - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 400 nós	66
<b>Figura 12</b> - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 1080 nós	69
<b>Figura 13</b> - Perfil de Tensão Sistema 33 Nós malhado	71
<b>Figura 14</b> - Perfil de Tensão Sistema 70 Nós malhado	74
<b>Figura 15</b> - Perfil de Tensão Sistema 136 Nós malhado	76
<b>Figura 16</b> - Perfil de Tensão Sistema 417 Nós malhado	78
<b>Figura 17</b> - Sistema teste 14 nós com configuração inicial	84
<b>Figura 18</b> - Sistema teste 14 nós com a nova configuração	84
<b>Figura 19</b> - Fluxograma da fase construtiva do GRASP	85
<b>Figura 20</b> - Fluxograma da fase de busca local do GRASP	87

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Resultados do sistema teste de 2 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	44
<b>Tabela 2</b> - Resultados do sistema teste de 2 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	46
<b>Tabela 3</b> - Resultados do sistema teste de 2 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	49
<b>Tabela 4</b> - Resultados do sistema teste de 3 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4	51
<b>Tabela 5</b> - Resultados do sistema teste de 3 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5	52
<b>Tabela 6</b> - Resultados do sistema teste de 3 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6	52
<b>Tabela 7</b> - Resultados do sistema teste de 33 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	55
<b>Tabela 8</b> - Resultados do sistema teste de 33 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	56
<b>Tabela 9</b> - Resultados do sistema teste de 33 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	57
<b>Tabela 10</b> - Resultados do sistema teste de 70 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	58
<b>Tabela 11</b> - Resultados do sistema teste de 70 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	58
<b>Tabela 12</b> - Resultados do sistema teste de 70 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	59
<b>Tabela 13</b> - Resultados do sistema teste de 136 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	60
<b>Tabela 14</b> - Resultados do sistema teste de 136 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	61
<b>Tabela 15</b> - Resultados do sistema teste de 136 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	61

<b>Tabela 16</b> - Resultados do sistema teste de 202 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	62
<b>Tabela 17</b> - Resultados do sistema teste de 202 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	63
<b>Tabela 18</b> - Resultados do sistema teste de 202 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	63
<b>Tabela 19</b> - Resultados do sistema teste de 400 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	65
<b>Tabela 20</b> - Resultados do sistema teste de 400 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	65
<b>Tabela 21</b> - Resultados do sistema teste de 400 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	66
<b>Tabela 22</b> - Resultados do sistema teste de 1080 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4	67
<b>Tabela 23</b> - Resultados do sistema teste de 1080 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5	68
<b>Tabela 24</b> - Resultados do sistema teste de 1080 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6	68
<b>Tabela 25</b> - Resultados do sistema teste de 33 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4	70
<b>Tabela 26</b> - Resultados do sistema teste de 33 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5	70
<b>Tabela 27</b> - Resultados do sistema teste de 33 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6	71
<b>Tabela 28</b> - Resultados do sistema teste de 70 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4	72
<b>Tabela 29</b> - Resultados do sistema teste de 70 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5	73
<b>Tabela 30</b> - Resultados do sistema teste de 70 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6	73
<b>Tabela 31</b> - Resultados do sistema teste de 136 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4	74
<b>Tabela 32</b> - Resultados do sistema teste de 136 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5	75

<b>Tabela 33</b> - Resultados do sistema teste de 136 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6	75
<b>Tabela 34</b> - Resultados do sistema teste de 417 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4	77
<b>Tabela 35</b> - Resultados do sistema teste de 417 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5	77
<b>Tabela 36</b> - Resultados do sistema teste de 417 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6	78
<b>Tabela 37</b> - Resultados do sistema teste de 14 nós com a fase construtiva do GRASP	84
<b>Tabela 38</b> - Resultados do sistema teste de 14 nós com a metaheurística completa	86
<b>Tabela 39</b> - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual	88
<b>Tabela 40</b> - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual	89
<b>Tabela 41</b> - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual	89
<b>Tabela 42</b> - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual	90

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

FC	Fluxo de Carga
NR	Newton-Raphson
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
p.u.	Por Unidade
MP	Metodologia proposta
FC NR	Fluxo de Carga de Newton-Raphson

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Conjuntos:

$\Omega_b$	Conjuntos de barras (nós)
$\Omega_l$	Conjuntos dos circuitos (ramos)

### Variáveis:

$P_{per1}$	Perda de potência ativa do sistema
$I_{km}$	Fluxo de corrente no circuito $k-m$
$I_{kr}$	Parte real da corrente no nó $k$
$I_{ki}$	Parte imaginária da corrente no nó $k$
$V_{kr}$	Parte real da tensão no nó $k$
$V_{ki}$	Parte imaginária da tensão no nó $k$
$V_m$	Magnitude da tensão no nó $m$
$S_m^e$	Valor da potência aparente no nó $m$
$P_t$	Perda de potência ativa do sistema
$\Delta P_{per}$	Variação da perda de potência ativa do sistema
$P_{kmp}$	Perda ativa no circuito
$Q_{kmp}$	Perda reativa no circuito
$I_{km}^o$	Corrente inicial do circuito $k-m$
$I_{kmr}^o$	Parte real da corrente inicial no circuito $k-m$
$I_{kmi}^o$	Parte imaginária da corrente inicial no circuito $k-m$
$I_{kmr}$	Parte real da corrente no circuito $k-m$
$I_{kmi}$	Parte imaginária da corrente no circuito $k-m$
$\rho_1$	Componente real da tensão $V_m$
$\rho_2$	Componente imaginária da tensão $V_m$
$P_{oo}$	Potência ativa que sai da subestação

$Q_{oo}$	Potência reativa que sai da subestação
$P_{on}$	Potência ativa que está saindo no nó terminal $n$
$Q_{on}$	Potência reativa que está saindo no nó terminal $n$
$P_{i+1}$	Potência ativa que está saindo no nó terminal $i$
$Q_{i+1}$	Potência reativa que está saindo no terminal $i$
$P_{L,i+1}$	Potência ativa que está saindo do nó $m$
$Q_{L,i+1}$	Potência reativa que está saindo do nó $m$
$P_i$	Potência ativa no nó $i$
$Q_i$	Potência reativa no nó $i$
$V_i$	Magnitude da tensão no nó $i$
$P_o$	Potência ativa na subestação
$Q_o$	Potência reativa na subestação
$z_{oo}$	Submatriz da matriz que é obtida ao derivar $x_{on}$ com respeito à $x_{oo}$
$V_j$	Magnitude da tensão no nó $j$
$\theta_j$	Ângulo de fase no nó $j$
$V_i$	Magnitude da tensão no nó $i$
$V_i^{re}$	Parte real da tensão no nó $i$
$V_i^{im}$	Parte imaginária da tensão no nó $i$
$V_j^{re}$	Parte real da tensão no nó $j$
$V_j^{im}$	Parte imaginária da tensão no nó $j$
$\vec{I}_{ij}$	Corrente fasorial no circuito $ij$
$I_{Gk}^{re}$	Parte real da corrente na subestação
$I_{Gk}^{im}$	Parte imaginária da corrente na subestação
$I_{Di}^{re}$	Parte real da demanda de corrente no nó $i$
$I_{Di}^{im}$	Parte imaginária da demanda de corrente no nó $i$
$I_{Dj}^{re}$	Parte real da demanda de corrente no nó $j$
$I_{Dj}^{im}$	Parte imaginária da demanda de corrente no nó $j$

$I_{ki}^{re}$	Parte real da corrente no circuito $k-i$
$I_{ki}^{im}$	Parte imaginária da corrente no circuito $k-i$
$I_{ij}^{re}$	Parte real da corrente no circuito $i-j$
$I_{ij}^{im}$	Parte imaginária da corrente no circuito $i-j$
$I_{si}^{re}$	Parte real da corrente do gerador no nó $i$
$I_{si}^{im}$	Parte imaginária da corrente do gerador no nó $i$
$\vec{I}_{Di}$	Corrente fasorial de demanda no nó $i$
$\vec{V}_i$	Tensão fasorial no nó $i$
$\vec{V}_j$	Tensão fasorial no nó $j$

### Constantes:

$V_k$	Nó de referência (subestação)
$ V_{ref} $	Magnitude da tensão no nó de referência
$\varepsilon$	Tolerância de convergência especificada (épsilon)
$r_{km}$	Resistência do circuito $k-m$
$x_{km}$	Reatância do circuito $k-m$
$P_k$	Potência ativa de carga no nó $k$
$Q_k$	Potência reativa de carga no nó $k$
$S_m$	Potência aparente no nó $m$
$P_m$	Potência ativa de carga no nó $m$
$Q_m$	Potência reativa de carga no nó $m$
$P_{Dj}$	Potência de demanda no nó $j$
$Q_{Dj}$	Potência reativa de demanda no nó $j$
$R_{ij}$	Resistência no circuito $i-j$
$X_{ij}$	Reatância no circuito $i-j$
$Z_{ij}$	Impedância no circuito $i-j$
$S_{Dj}$	Potência aparente de demanda no nó $j$

$S_j$	Potência aparente no nó $j$
$P_{Di}$	Potência ativa de demanda no nó $i$
$Q_{Di}$	Potência reativa de demanda no nó $i$
$a_i, b_i, c_i$	Coefficientes usados na linearização da parte real da corrente de demanda no nó $i$
$d_i, e_i, f_i$	Coefficientes usados na linearização da parte imaginária da corrente de demanda no nó $i$
$\underline{V}$	Tensão mínima estimada para o cálculo do ângulo máximo e mínimo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	ALGORITMOS DE FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	21
1.1.1	<i>Algoritmo de fluxo de carga radial de varredura</i>	21
1.1.2	<i>Método de soma de potências no fluxo de carga radial</i>	22
1.1.3	<i>Fluxo de carga radial de Goswani-Basu</i>	24
1.1.4	<i>Fluxo de carga radial de Baran-Wu</i>	26
1.1.5	<i>Análise comparativa</i>	28
1.1.6	<i>Fluxo de carga Newton-Raphson</i>	28
1.2	OBJETIVOS	31
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	31
<b>2</b>	<b>CÁLCULO DO PONTO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>33</b>
2.1	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	33
2.2	EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA DESCREVER O ESTADO DE OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE DE UM SDEE	37
2.3	LINEARIZAÇÃO	39
2.3.1	<i>Método dos mínimos quadrados</i>	40
2.3.2	<i>Exemplo ilustrativo para o cálculo dos coeficientes de linearização</i>	41
2.4	EXEMPLO ILUSTRATIVO PARA O CÁLCULO DA OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE DE UM SDEE	42
2.5	ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE TENSÃO MÍNIMA E DO ÂNGULO MÁXIMO E MÍNIMO DE FASE DE UM SDEE	45
2.5.1	<i>Exemplo ilustrativo para o cálculo do ângulo máximo e mínimo de fase de um SDEE</i>	45
2.6	FASE DE CORREÇÃO	47
2.6.1	<i>Exemplo ilustrativo considerando a fase de correção</i>	48

2.7	PONTO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MALHADO	49
2.7.1	<i>Exemplo ilustrativo considerando um sistema malhado</i>	51
2.8	TÉCNICA DE IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	54
<b>3</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b>	<b>55</b>
3.1	SISTEMA TESTE DE 33 NÓS RADIAL	55
3.2	SISTEMA TESTE DE 70 NÓS RADIAL	57
3.3	SISTEMA TESTE DE 136 NÓS RADIAL	60
3.4	SISTEMA TESTE DE 202 NÓS RADIAL	62
3.5	SISTEMA TESTE DE 400 NÓS RADIAL	64
3.6	SISTEMA TESTE DE 1080 NÓS RADIAL	67
3.7	SISTEMA TESTE DE 33 NÓS MALHADO	69
3.8	SISTEMA TESTE DE 70 NÓS MALHADO	72
3.9	SISTEMA TESTE DE 136 NÓS MALHADO	74
3.10	SISTEMA TESTE DE 417 NÓS MALHADO	76
<b>4</b>	<b>RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>79</b>
4.1	INTRODUÇÃO	79
4.2	PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	80
4.3	METAHEURÍSTICA	81
4.3.1	<i>Fase construtiva</i>	82
4.3.2	<i>Fase de busca local</i>	85
<b>5</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b>	<b>88</b>
5.1	SISTEMA TESTE DE 33 NÓS MALHADO	88

5.2	SISTEMA TESTE DE 70 NÓS MALHADO	88
5.3	SISTEMA TESTE DE 136 NÓS MALHADO	89
5.4	SISTEMA TESTE DE 417 NÓS MALHADO	89
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>93</b>
	<b>Apêndice A.1 – Dados dos Sistemas Testes de Distribuição</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O problema de fluxo de carga (FC) tem como objetivo principal determinar o estado de operação em regime permanente de um sistema (de distribuição ou transmissão) de energia elétrica, calculando a magnitude da tensão e o ângulo de fase em todos os nós do sistema e ainda outras grandezas que são derivadas destas, como magnitudes das correntes nos circuitos, fluxo de potência ativa e reativa nos circuitos, perdas de potência ativa e reativa no sistema. (MONTICELLI, 1983).

O FC nos dias de hoje tornou-se uma ferramenta muito importante para os sistemas de energia elétrica, fornecendo informações importantes para avaliar o estado de operação do sistema em regime permanente e com o intuito de ver se este está operando de forma adequada dentro de seus limites permitidos. Também é possível utilizar o FC para fazer simulações com eventuais acidentes e distúrbios na rede, com o intuito de preparar o operador para acontecimentos reais e assim determinar quais são as ações preventivas e/ou corretivas que devem ser realizadas para que o sistema volte ao estado de operação normal. Adicionalmente o uso do FC permite identificar novos investimentos no sistema (planejamento da expansão) para poder atender o aumento das novas demanda de carga.

Matematicamente o problema de FC pode ser modelado como um sistema de equações algébricas não lineares. Esta representação é utilizada em situações nas quais as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possam ignorar os efeitos transitórios. Este sistema de equações algébricas não lineares é obtido estabelecendo-se a conservação das potências ativa e reativa em cada nó do sistema, ou seja, a potência líquida injetada tem que ser igual à soma de todas as potências que fluem por todos os componentes internos que tem este nó com um de seus nós terminais. O que equivale a dizer que se cumprem a Lei para as correntes de Kirchhoff. A segunda Lei de Kirchhoff (Lei das tensões de Kirchhoff) é utilizada para expressar os fluxos de potência nos componentes internos como funções das tensões de seus nós terminais. (MONTICELLI; GARCIA, 2003).

Nos sistema de transmissão de energia elétrica, o cálculo do FC é em geral, realizado utilizando-se métodos computacionais desenvolvidos especificamente para a resolução de sistemas de equações algébricas não lineares. Atualmente existem muitos algoritmos na literatura especializada que foram desenvolvidos por muitos pesquisadores e alguns destes são os algoritmos de Gauss, Gauss-Seidel, Newton-Raphson (NR) e suas versões desacopladas XB e BX. Estes algoritmos apresenta ótimo desempenho para problemas de fluxo de carga de um modo geral. (MONTICELLI; GARCIA, 2003).

O método de NR e suas versões desacopladas apresentam um bom desempenho computacional e são muito utilizados na análise de sistemas de energia elétrica. Algumas vantagens do método:

Utilizando o método de NR, geralmente obtém-se o estado de operação do sistema de transmissão após algumas poucas iterações, para a maioria dos casos;

- As versões desacopladas permitem dividir o problema em dois subproblemas, facilitando o processo de resolução;
- As versões desacopladas usam matrizes constantes, que diminuem consideravelmente o esforço computacional da resolução do problema de FC.
- Para resolver o problema de FC em sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) é possível usar o método NR ou suas versões desacopladas. Entretanto, os SDEE apresentam duas características muito específicas;
- O SDEE opera de forma radial, não apresentando laços ou malhas;
- Alguns SDEE apresentam uma relação R/X muito elevada quando comparado com valores típicos encontrados nos sistemas de transmissão e sub-transmissão de energia elétrica.

A primeira característica é uma vantagem porque simplifica a complexidade do problema de FC, enquanto a segunda característica é uma desvantagem quando são utilizadas as versões desacopladas do método de NR, pois pode produzir divergência no processo da resolução do problema de FC. (BRANDINI, 2000).

Considerando as características do SDEE, foram desenvolvidos algoritmos especializados iterativos para solucionar o problema de FC. Os algoritmos realizam um processo iterativo que faz um percurso das barras externas em direção à subestação e vice-versa. Todos estes algoritmos apresentam a vantagem adicional de que são mais rápidos que as versões NR e desacopladas. Na próxima subseção será apresentado um resumo dos quatro principais algoritmos de fluxo de carga para sistemas de distribuição radiais.

## 1.1 ALGORITMOS DE FLUXO DE CARGA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Nesta seção será feita uma análise teórica de quatro algoritmos tendo como base a teoria apresentada por Brandini (2000) que são utilizados para resolver problemas de fluxo de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) radial, aparentemente estes métodos apresentam características simples e com um desempenho computacional eficiente. Os algoritmos que serão analisados são: (a) Algoritmo de Fluxo de Carga Radial de Varredura, (b) Método de Soma de Potência no Fluxo de Carga Radial, (c) Fluxo de Carga Radial de Goswani-Basu e (d) Fluxo de Carga Radial de Baran-Wu. O trabalho consiste em examinar quais são as vantagens propostas por estes métodos e as desvantagens que os mesmos apresentam.

### 1.1.1 Algoritmo de fluxo de carga radial de varredura

O algoritmo também conhecido como algoritmo de varredura apresenta o seguinte processo de solução: 1) escolhe um valor para as tensões em todos os nós, normalmente é utilizada a mesma tensão da subestação; 2) conhecendo as tensões em todos os nós do sistema de distribuição, torna-se possível calcular a injeção de corrente de carga em todos os nós e a corrente que circula em todos os circuitos do sistema de distribuição, iniciando dos nós extremos (conhecido como movimento *backward*); 3) conhecendo as correntes em todos os circuitos do sistema, pode-se calcular o valor das perdas de potência ativa no sistema; 4) o critério de convergência do algoritmo é baseado na variação das perdas ativas após duas iterações consecutivas, portanto o processo de solução do algoritmo termina quando a variação das perdas ativa é menor que uma tolerância especificada  $\varepsilon$  (épsilon), assim o algoritmo atingiu a convergência, encontrando a solução para o problema de FC. Caso contrário armazene o valor da perda de potência ativa atual e passe para o próximo passo; 5) conhecendo as correntes em todos os circuitos do sistema, calcular os novos valores das tensões em todos os nós do sistema, iniciando na subestação e terminando nos nós extremos (conhecido como movimento *forward*), com as novas tensões em todos os nós é possível recalculer as injeções de corrente de carga nos nós e as correntes em todos os circuitos do sistema, voltando ao passo (2). O algoritmo de fluxo de carga radial de varredura pode ser escrito da seguinte maneira:

1. Fixar as tensões em todos os nós como sendo iguais à tensão do nó de referência (subestação), isto é, fazer  $V_k = V_{ref} + j0$  para todos os nós do sistema, onde  $V_{ref}$  é o módulo de tensão do nó de referência. Fazer  $P_{per1} = 0$  e escolher a tolerância  $\varepsilon$ .
2. Iniciando dos nós extremos, calcular a injeção de corrente da carga de todos os nós usando (1) e (2), assim como as correntes  $I_{km}$  em todos os circuitos do sistema através de somas simples (operação *backward*).

$$I_{kr} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (1)$$

$$I_{ki} = \frac{(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (2)$$

3. Calcular as perdas de potência ativa do sistema usando (3), usando as correntes de circuitos  $I_{km}$  calculados no passo 2. Fazer  $P_{per2} = P_t$ .

$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega} r_{km} I_{km}^2 \quad (3)$$

4. Se  $\Delta P_{per} = |P_{per2} - P_{per1}| \leq \varepsilon$ , sendo  $\varepsilon$  uma tolerância especificada, então pare o processo porque foi atingida a convergência. Em caso contrário, fazer  $P_{per2} = P_{per1}$  e passar ao seguinte passo.
5. Com os valores de corrente dos circuitos  $I_{km}$  conhecidos, calcular novos valores dos módulos de tensão dos nós do sistema iniciando o processo a partir da subestação (operação *forward*). Voltar ao passo 2.

### 1.1.2 Método de soma de potências no fluxo de carga radial

O algoritmo conhecido como soma de potências no fluxo de carga radial apresenta um processo de solução simples do ponto de vista conceitual, com excelente desempenho para resolver problemas de fluxo de carga radial. Neste caso, o cálculo do fluxo de carga procede considerando os seguintes passos; 1) criar um banco de dados identificando todos os dados disponíveis no sistema, como módulo de tensão na subestação, o critério de convergência desejado, etc.; 2) definir os valores da tensão em todos os nós do sistema igual à tensão da subestação com ângulo de abertura nulo, além disso, considerar as perdas totais de potência ativa e reativa iguais à zero; 3) Com as tensões definidas em todos os nós é possível calcular a

carga equivalente em todos os nós do sistema, que vem a ser a soma de todas as cargas que estão sendo alimentadas pelo nó que se encontra em análise, incluindo as perdas que são calculadas na primeira iteração usando as equações (4) e (5) e nas próximas iterações deve usar as perdas obtidas no passo 5. No passo 4, partindo da subestação e utilizando a equação (6) é possível encontrar novos valores para os módulos de tensões nos nós do sistema usando a mesma técnica de carga equivalente. Esta etapa do cálculo inicia na subestação com o valor da tensão já conhecido. No passo 5; conhecido os novos valores de tensão, atualize o valor das perdas usando as equações (4) e (5). Calcular o valor das perdas totais. Se a diferença entre a perda atual e a perda anterior for menor que uma tolerância especificada  $\varepsilon$  após duas iterações consecutivas, pare o algoritmo, ele convergiu para a solução desejada. Caso contrário faz a perda atual igual à anterior e volte ao passo 3. O algoritmo de soma de potência no fluxo de carga radial pode ser resumido da seguinte maneira:

1. Ler os dados do sistema assim como os outros parâmetros do sistema como módulo de tensão na subestação e critério de convergência  $\varepsilon$  (máxima variação de perdas permitidas).
2. Fixar valores estimados das tensões nos nós. De preferência escolher valores iguais à tensão do nó de referência (subestação), isto é, fazer  $V_k = V_{ref} + j0$  para todos os nós do sistema, onde  $V_{ref}$  é o módulo de tensão do nó de referência. Considerar a somatória das perdas ativas aproximadas  $P_{per1} = 0$ .
3. **Operação “Backward”**: Iniciando dos nós extremos, calcular a “carga equivalente” para cada nó do sistema somando todas as cargas da parte da rede que são alimentadas através do nó e adicionando as perdas. Somente na primeira iteração devem ser calculadas as perdas aproximadas usando (4) e (5), e nas iterações seguintes devem ser usadas as perdas obtidas no passo 5. Assim está sendo implementada uma iteração “para trás” a partir dos nós extremos e na direção da subestação.

$$P_{kmp} = I_{km}^2 r_{km} = r_{km} \frac{(P^2 + Q^2)}{V_m^2} \quad (4)$$

$$Q_{kmp} = I_{km}^2 x_{km} = x_{km} \frac{(P^2 + Q^2)}{V_m^2} \quad (5)$$

4. **Operação “Forward”**: A partir da subestação e usando a relação (6), encontrar novos valores de tensão em todas as barras do sistema e usando a representação de “carga equivalente”. Esta é uma iteração para frente (*forward*) iniciando o processo da subestação e terminando nos nós extremos.

$$V_m^4 + [2(r_{km}P + x_{km}Q) - V_k^2]V_m^2 + (P^2 + Q^2)(r_{km}^2 + x_{km}^2) = 0 \quad (6)$$

5. Com os novos valores de tensão calcular as perdas ativas e reativas usando as relações (4) e (5). Calcular as perdas totais  $P_{per2}$ . Se  $|P_{per2} - P_{per1}| \leq \varepsilon$ , isto é, se a variação de perdas de duas iterações consecutivas for menor que uma tolerância especificada então pare o processo, pois foi atingida a convergência. Em caso contrário, fazer  $P_{per2} = P_{per1}$  e voltar ao passo 3.

### 1.1.3 Fluxo de carga radial de Goswani-Basu

O algoritmo de fluxo de carga radial de Goswani-Basu apresenta um aspecto conceitual simples e desempenho eficiente e de fácil implementação computacional como é mostrado na literatura. Neste caso, o cálculo do fluxo de carga procede considerando os seguintes passos; 1) criar um banco de dados identificando todos os dados disponíveis no sistema, como módulo de tensão na subestação, o critério de convergência desejado, etc.; e considerando as perdas em todos os circuitos iguais a zero. Depois encontrar a “carga equivalente” para cada nó de sistema de distribuição elétrico; 2) A partir da subestação calcular outros valores de tensão em todos os nós do sistema usando uma representação de carga equivalente. Em cada par de nós  $k$  e  $m$  calcular a tensão no nó  $m$  da seguinte maneira: (a) calcular a corrente inicial usando as equações (7) e (8); (b) calcular outros valores de corrente usando as equações (9) e (10), ainda neste mesmo processo de cálculo, calcula-se o valor estimado da tensão no nó  $m$  utilizando as equações (11) e (12) que também faz parte do cálculo da corrente; (c) calcular o valor estimado absoluto da carga no nó  $m$  usando os valores de corrente do circuito  $k-m$  e da tensão no nó  $m$  encontrados no processo de cálculo do passo anterior, chegando a uma relação de que o valor absoluto da carga é igual a tensão no nó  $m$  pela corrente que flui no circuito  $k-m$ . Se o valor absoluto da diferença das cargas for menor que uma tolerância especificada, neste caso o processo iterativo do cálculo de corrente termina, assim calcula novamente a tensão no nó  $m$  e também as perdas no circuito  $k - m$ , caso contrário voltar ao item (b). No passo 3; após ter calculado outros valores de tensão para todos os nós do sistema e todas as perdas nos circuitos, é necessário calcular as perdas totais de potência ativa do sistema. Se a valor absoluto da diferença das perdas ativa for menor que uma tolerância especificada, então termina o processo iterativo. Caso contrário calcular a “carga equivalente” em cada nó do siste-

ma elétrico considerando as perdas encontradas no passo anterior e voltar no passo 2. O algoritmo de fluxo de carga radial de Goswani-Basu se resume da seguinte maneira:

1. Ler os dados do sistema, assim como os outros parâmetros do sistema, como: módulo de tensão na subestação e critério de convergência  $\varepsilon$  (máxima variação de perdas permitida). Inicializar as perdas em todos os circuitos como sendo iguais a zero. Encontrar a “carga equivalente” para cada nó do sistema elétrico.
2. **Operação “Forward”**: A partir da subestação encontrar novos valores de tensão em todos os nós do sistema e usando a representação de carga equivalente. Esta é uma iteração para frente (*forward*) iniciando o processo da subestação e terminado nos nós extremos. Para cada par de nós  $k$  e  $m$  calcular a tensão  $V_m$  da seguinte forma:
  - a. Calcular a corrente inicial  $I_{km}^{\circ}$  usando as relações (7) e (8);
  - b. Recalcular novos valores de  $I_{km}$  usando as relações (9) e (10). Neste passo também é calculado o estimado da tensão  $V_m$  usando (11) e (12), pois eles fazem parte do cálculo de  $I_{km}$ ;
  - c. Calcular o estimado de  $|S_m|$  usando os valores de  $I_{km}$  e  $V_m$  obtidos no passo anterior e a relação  $|S_m^e| = |V_m| |I_{km}|$ . Se  $|S_m - S_m^e| \leq \varepsilon$  então termina o processo iterativo de cálculo de  $I_{km}$  e deve-se recalcular  $V_m$  assim como as perdas no circuito  $k - m$  e depois analisar o seguinte par de nós. Em caso contrário, voltar ao passo (b).

$$I_{kmr}^{\circ} = \frac{P_m V_{kr} + Q_m V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} = \frac{P_m V_{kr} + Q_m V_{ki}}{V_k^2} \quad (7)$$

$$I_{kmi}^{\circ} = \frac{P_m V_{ki} - Q_m V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} = \frac{P_m V_{ki} - Q_m V_{kr}}{V_k^2} \quad (8)$$

$$I_{kmr} = \frac{\rho_1 P_m + \rho_2 Q_m}{\rho_1^2 + \rho_2^2} \quad (9)$$

$$I_{kmi} = \frac{\rho_2 P_m - \rho_1 Q_m}{\rho_1^2 + \rho_2^2} \quad (10)$$

$$\rho_1 = V_{kr} - r_{km} I_{kmr} + x_{km} I_{kmi} \quad (11)$$

$$\rho_2 = V_{ki} - r_{km} I_{kmi} - x_{km} I_{kmr} \quad (12)$$

3. Após encontrar novos valores de tensão para todos os nós do sistema elétrico e as perdas para todos os circuitos do sistema, deve-se calcular as perdas ativa do sistema elétrico,  $P_{per2}$ . Se  $|P_{per2} - P_{per1}| \leq \varepsilon$  então termina o processo integral. Em caso contrário, encontrar a “carga equivalente” para cada nó do sistema elétrico levando em conta as perdas encontradas no passo anterior e voltar ao passo 2.

#### 1.1.4 Fluxo de carga radial de Baran-Wu

O algoritmo de fluxo de carga radial de Baran-Wu também conhecido por muitos pesquisadores como sendo um algoritmo robusto, eficiente e rápido tem sido muito usado para à análise de fluxo de carga de sistemas de distribuição radial e ainda em análise comparativa com outros algoritmos também de fluxo de carga que foram publicados posteriormente. O mesmo apresenta um aspecto conceitual significativa podendo ser implementado computacionalmente com muita eficiência. Ainda que possível pode ser implementada algumas versões mais simples com o objetivo de melhorar sua velocidade durante o seu processamento. Seu processo de cálculo inicia da seguinte forma; 1) escolher valores iniciais para a potência ativa e reativa que está saindo da subestação; 2) calcular os fluxos de potência ativa e reativa que está saindo do nó terminal do sistema; 3) se o fluxo de potência ativa e reativa saindo do nó terminal do sistema for menor que uma tolerância especificada, “pare” porque o processo convergiu para o ponto ótimo, caso contrário continue; 4) montar a matriz Jacobiana; 5) resolver o sistema de equações lineares encontrado no passo anterior, onde será encontrada a variação das potências ativa e reativa saindo da subestação; 6) atualizar o valor da potência ativa e reativa saindo da subestação; 7) voltar ao passo 2). O algoritmo de fluxo de carga radial de Baran-Wu para um único alimentador pode ser resumido da seguinte forma:

1. Escolher valores de  $P_{oo}$  e  $Q_{oo}$  iniciais. Valores adequados podem ser a somatória de cargas ou com um acréscimo adicional para levar em conta as perdas.
2. Determinar dos valores de  $P_{on}$  e  $Q_{on}$  usando as relações fundamentais (7), (13), (14) e (15) iniciando o processo a partir da subestação e fazendo  $k = i$  e  $m = i + 1$  assim as equações assume a seguinte forma:

$$P_{i+1} = P_i - r_{i+1} \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - P_{L,i+1} \quad (13)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_{i+1} \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - Q_{L,i+1} \quad (14)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + \frac{1}{V_i^2}(r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2)(P_i^2 + Q_i^2) \quad (15)$$

3. Teste de convergência: Se  $|P_{on}| \leq \varepsilon$  e  $|Q_{on}| \leq \varepsilon$  então pare, o processo, porque foi atingida a convergência. Em caso contrário ir ao passo 4.
4. Montagem do Jacobiano:

$$J(z_{oo}) = \left[ \frac{\partial H(z_{oo})}{\partial z_{oo}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{on}}{\partial P_{oo}} & \frac{\partial P_{on}}{\partial Q_{oo}} \\ \frac{\partial Q_{on}}{\partial P_{oo}} & \frac{\partial Q_{on}}{\partial Q_{oo}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde  $J(z_{oo})$  é uma submatriz da matriz obtida ao derivar  $x_{on}$  com respeito a  $x_{oo}$ . A dedução matemática para obter esta matriz se encontra em Brandini (2000).

5. Resolver o sistema linearizado na iteração  $k$ :

$$J_k \Delta z_{oo}^k = -H(z_{oo}^k) \quad (17)$$

em que:

$$\Delta z_{oo}^k = \begin{bmatrix} \Delta P_{oo}^k \\ \Delta Q_{oo}^k \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$H(z_{oo}^k) = \begin{bmatrix} P_{on}^k \\ Q_{on}^k \end{bmatrix} \quad (19)$$

Assim temos:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{oo}^k \\ \Delta Q_{oo}^k \end{bmatrix} = -[J_k]^{-1} \begin{bmatrix} P_{on}^k \\ Q_{on}^k \end{bmatrix} \quad (20)$$

6. Atualização dos valores de  $P_{oo}$  e  $Q_{oo}$ :

$$P_{oo}^{k+1} = P_{oo}^k + \Delta P_{oo}^k \quad (21)$$

$$Q_{oo}^{k+1} = Q_{oo}^k + \Delta Q_{oo}^k \quad (22)$$

Voltar ao passo 2.

### *1.1.5 Análise comparativa*

Da análise teórica dos quatro algoritmos mais utilizados para resolver problemas de fluxo de carga para sistemas de distribuição radial podemos destacar: 1) da literatura todos os métodos apresentam um ótimo desempenho computacional para o cálculo do problema de FC; 2) cada método possui uma formulação matemática diferente; 3) todos os métodos realizam um processo iterativo até satisfazer um critério de convergência e 4) quanto ao critério de convergência, os três primeiros métodos consideram a variação das perdas de potência ativa da iteração atual com a iteração anterior, enquanto que o último leva em conta o valor absoluto da potência ativa e reativa que está saindo do nó terminal do sistema.

### *1.1.6 Fluxo de carga Newton-Raphson*

Partindo do ponto de vista operativo, o sistema de distribuição de forma radial possui um aparato que de certa forma possibilitaria melhores condições de proteção como, controle de tensão, um melhor controle do fluxo de corrente e outras características. Neste caso operar com um sistema de forma radial seria de fato uma melhor solução, mas percebe-se que a rede radial tem uma característica interessante que diz o seguinte.

A rede radial consiste no encadeamento dos nós, por meio de um conjunto de ramos no qual haverá somente um caminho que conecta a subestação alimentadora ao nó de atendimento (um consumidor ou um conjunto deles). (FLORIANO, 2010 p. 1-2).

O fato de uma rede ser radial facilita sua análise. Conseqüentemente os sistemas de distribuição foram idealizados em formato de redes radiais, e isto os tornava operativamente muito simples e também muito econômicos, especialmente com relação à sua manutenção. Porém a possibilidade de interrupções aos consumidores é maior quando comparado a sistemas malhados. Neste caso, operar com um sistema fracamente malhado nas redes de distribuição é muito mais atrativo, pois o fechamento de um conjunto de malhas pode melhorar de forma eficiente o perfil de tensão reduzindo as perdas existentes no sistema, tornando-o mais confiável para o atendimento dos consumidores. (FLORIANO, 2010).

No início, um pouco antes da década de 60, vários métodos foram propostos para resolver os problemas de fluxo de carga para sistema de potência. Dentre estes alguns serão citados a seguir.

Por volta dos anos 50, utilizavam o método de Gauss-Seidel para obter solução do fluxo de potência. Nesta época este método foi considerado lento porque necessitava de várias iterações para encontrar a solução ótima de um sistema de equações não lineares. Levando em conta a baixa capacidade de processamento dos computadores que eram utilizados naquela época, o que restringia ainda mais o uso do método de Gauss-Seidel.

No fim da década de 60, Tinney e Hart (1967), apresentaram a solução do fluxo de potência de corrente alternada (C.A.) pelo método de Newton-Raphson, onde concluíram que, as equações utilizadas serviam tanto para sistemas com configurações radiais e fracamente malhadas. Assim este método tornou-se uma referência para o cálculo do fluxo de potência, porque apresentava uma rápida e eficiente convergência.

Ainda em 1967 foi apresentado o primeiro trabalho exclusivamente para sistemas de distribuição, Berg (1967) que titulava “**Mechanized calculation of unbalanced load flow on radial distribution circuits**”, que no entanto serviu como base para diferentes trabalhos que foram surgindo.

Em 1988 foi proposto por Shirmohammadi et al. um novo método de fluxo de potência para resolver problemas de redes de transmissão e distribuição fracamente malhados, usando uma técnica de compensação multi-port e as formulações básicas das leis de Kirchhoff. Destacando ainda que este método pode ser aplicado para a solução de redes com configurações trifásicas e monofásicas.

O método de NR e suas versões desacopladas apresentam um bom desempenho e são muito utilizados na análise de sistemas de energia elétrica. O método de NR, geralmente obtém-se o estado de operação da rede após algumas poucas iterações, para a maioria dos casos. As versões desacopladas permitem dividir o problema em dois subproblemas, facilitando o processo de resolução, as versões desacopladas usam matrizes constantes, que diminuem consideravelmente o esforço computacional da resolução do problema.

Uma desvantagem do NR completo consiste em ter que calcular e inverter para cada iteração a matriz Jacobiana, que é aproximadamente duas vezes o tamanho da matriz de admitância.

Para desenvolver o método de Newton para sistemas elétricos são tomadas como base as equações de potências nodais para os ‘N’ nós da rede, que resultaram da aplicação das leis de Kirchhoff, à esses nós da rede, as equações utilizadas para o cálculo do FC de NR são:

$$\begin{aligned}
P_k &= V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) = \\
&= V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{k \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km})
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
Q_k &= V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = \\
&= -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{k \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km})
\end{aligned} \tag{24}$$

E as submatrizes que formam a matriz Jacobiana são obtidas após a derivada das equações  $P_k$  e  $Q_k$ , as quais são escritas da seguinte forma:

$$H = \frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} \begin{cases} H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (-G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ H_{kl} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_l} = V_k V_l (G_{kl} \text{sen} \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) & l \in \Omega_k \\ H_{kl} = 0 & l \notin \Omega_k \end{cases} \tag{25}$$

$$N = \frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} \begin{cases} N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ N_{kl} = \frac{\partial P_k}{\partial V_l} = V_k (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \text{sen} \theta_{kl}) & l \in \Omega_k \\ N_{kl} = 0 & l \notin \Omega_k \end{cases} \tag{26}$$

$$M = \frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial \theta} \begin{cases} M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ M_{kl} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_l} = -V_k V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \text{sen} \theta_{kl}) & l \in \Omega_k \\ M_{kl} = 0 & l \notin \Omega_k \end{cases} \tag{27}$$

$$L = \frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial V} \begin{cases} L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2V_k B_{kk} \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{kl} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = V_k (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \quad l \in \Omega_k \\ L_{kl} = 0 \quad l \notin \Omega_k \end{cases} \quad (28)$$

O cálculo do estado de operação da rede em regime permanente termina quando a magnitude de tensão e os ângulos das tensões de todos os ' $N$ ' nós do sistema for conhecido. (HAFFINER, 2008).

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação de mestrado é calcular o estado de operação em regime permanente de um sistema de distribuição de energia elétrica radial ou malhada através da solução de um sistema de equações lineares (fluxo de carga não iterativo). Para atingir este objetivo, a demanda de tipo potência constante do sistema de distribuição de energia elétrica é modelada como uma aproximação linear em função das partes real e imaginária da tensão considerando as condições típicas de operação de um sistema de distribuição de energia elétrica.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Na seção 1 apresentou-se uma abordagem teórica definindo o que é e como funciona o fluxo de carga para sistema de distribuição de energia elétrica.

Descreveu também algoritmos de fluxo de carga para sistemas de distribuição radiais tais como: algoritmos de fluxo de carga radial de varredura, métodos de soma de potência no fluxo de carga radial, fluxo de carga radial de Goswani-Basu e fluxo de carga radial de Baran-Wu, também foi apresentado o fluxo de carga de Newton-Raphson.

Na seção 2 foi descrito 6 equações nas quais duas delas são não lineares utilizadas para calcular o ponto de operação de um sistema de distribuição de energia elétrica radial e/ou malhado em regime permanente, e também mostramos uma técnica matemática denominada mínimos quadrados para linearização destas equações com o intuito de resolver o problema de fluxo de carga utilizando um sistema de equações lineares.

Para determinar o fluxo de carga não - iterativo para à análise de sistemas de distribuição radiais e malhados, foi utilizada a metodologia apresentada em 2.4, 2.5 e 2.6. Nesta mesma seção foi apresentada também o método de Newton-Raphson e suas formulações matemáticas para o cálculo do ponto de operação em regime permanente de um sistema de distribuição de energia elétrica malhado.

Na seção 3 apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta no capítulo 2. Os sistemas de distribuição de energia elétrica testados foram: 33, 70, 136, 202, 400 e 1080 nós radiais e 33, 70, 136 e 417 nós malhados.

Na seção 4, apresenta-se a metaheurística GRASP para o problema de reconfiguração de sistema de distribuição afim de validar a metodologia apresentada neste trabalho. Na seção 5, são apresentados os testes utilizando os seguintes sistemas de distribuição 33, 70, 136 e 417 nós malhados.

No Capítulo 6 apresenta algumas considerações finais com base nos resultados obtidos com a metodologia proposta e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CÁLCULO DO PONTO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção será apresentado os procedimentos necessários para calcular o estado de operação em regime permanente de um SDEE tais como, análise da variação do ângulo de fase e equações que descreve o estado de operação de SDEE. Será apresentada uma breve introdução sobre o método de mínimos quadrados o qual nos auxiliará a fazer uma aproximação linear de algumas equações não lineares que aparecerá no decorrer deste trabalho. Permitindo assim usar somente as equações lineares, tornando mais fácil o cálculo do fluxo de carga. O método apresentado será dividido em três subseções para uma melhor compreensão.

As subseções 2.1 e 2.2 foram descritas com base na teoria apresentada por Franco et al. (2011).

### 2.1 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

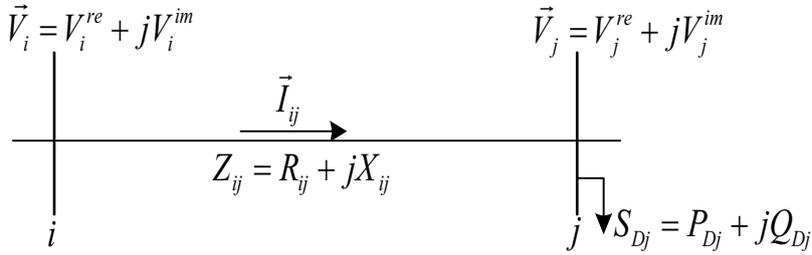
Nesta subseção é calculado o ângulo de fase máximo e mínimo considerando as condições típicas de operações do sistema (considerando as tensões máxima e mínima de cada nó). Entre as principais características existentes nos sistema de distribuição de energia elétrica, podem-se destacar as seguintes:

- a) Topologia radial dos alimentadores;
- b) Circuitos de diferentes comprimentos;
- c) Alta relação  $R/X$  quando comparados com valores típicos encontrados nos sistemas de transmissão;
- d) Cargas são estimuladas economicamente para corrigir o seu fator de potência dentro de faixas normalizadas;
- e) Garantir que a magnitude de tensão esteja dentro de seus limites permitidos.

Levando em conta as três últimas características enumeradas acima, pode ser mostrado que os ângulos de fase em todos os nós de um SDEE são muito pequenos. Consideramos uma carga com uma demanda de potência ativa e reativa denotado por  $P_{Dj}$  e  $Q_{Dj}$  no nó  $j$ , que está sendo alimentado por um circuito entre os nós  $i$  e  $j$ , com uma impedância  $R_{ij} + jX_{ij}$ , sendo  $i$  o nó de referência. Assim pode-se deduzir todo um equacionamento que

torne possível calcular analiticamente a magnitude da tensão  $|V_j|$  e o ângulo de fase  $\theta_j$  para um SDEE de dois nós, como mostra a Figura 1.

**Figura 1** - Sistema teste de distribuição de dois nós



**Fonte:** Elaboração do próprio autor

Da Figura 1 pode-se afirmar que a corrente através do circuito  $ij$ , é a seguinte:

$$\vec{I}_{ij} = \frac{\vec{V}_i - \vec{V}_j}{R_{ij} + jX_{ij}} = \frac{(V_i^{re} + jV_i^{im}) - (V_j^{re} + jV_j^{im})}{R_{ij} + jX_{ij}} = \frac{(V_i^{re} - V_j^{re}) + j(V_i^{im} - V_j^{im})}{R_{ij} + jX_{ij}} \quad (29)$$

Ou ainda podemos expressar a corrente elétrica através do circuito  $ij$  da seguinte maneira:

$$S_j = \vec{V}_j \vec{I}_{ij}^* \Rightarrow (\vec{I}_{ij}^*)^* = \left( \frac{S_j}{V_j} \right)^* = \left( \frac{P_{Dj} + jQ_{Dj}}{V_j^{re} + jV_j^{im}} \right)^* \Rightarrow \vec{I}_{ij} = \frac{P_{Dj} - jQ_{Dj}}{V_j^{re} - jV_j^{im}} \quad (30)$$

Substituindo a equação (29) em (30) obtém a equação (31).

$$P_{Dj} - jQ_{Dj} = \frac{\left[ (V_i^{re} - V_j^{re}) + j(V_i^{im} - V_j^{im}) \right] (V_j^{re} - jV_j^{im})}{R_{ij} + jX_{ij}} \quad (31)$$

Efetuando as operações para obter termos reais e imaginários, obtém-se a equação (32)

$$R_{ij}P_{Dj} - R_{ij}jQ_{Dj} + jX_{ij}P_{Dj} + X_{ij}Q_{Dj} = (V_j^{re}V_i^{re} + V_j^{im}V_i^{im}) + j(V_j^{re}V_i^{im} - V_j^{im}V_i^{re}) - (V_j^{re^2} + V_j^{im^2}) \quad (32)$$

separando as partes real e imaginária de (32) temos:

$$(V_j^{re}V_i^{re} + V_j^{im}V_i^{im}) - (V_j^{re^2} + V_j^{im^2}) = R_{ij}P_{Dj} + X_{ij}Q_{Dj} \quad (33)$$

$$j(V_j^{re}V_i^{im} - V_j^{im}V_i^{re}) = -R_{ij}jQ_{Dj} + jX_{ij}P_{Dj} \quad (34)$$

Considerando que

$$\vec{V}_j^2 = V_j^{re^2} + V_j^{im^2} \quad (35)$$

e elevando ao quadrado as equações (33) e (34) obtém-se as equações (36) e (37), somando ambos os lados das mesmas é possível gerar outra equação a qual é representada em (38):

$$(V_j^{re}V_i^{re} + V_j^{im}V_i^{im})^2 = (\vec{V}_j^2 + R_{ij}P_{Dj} + X_{ij}Q_{Dj})^2 \quad (36)$$

$$(V_j^{re}V_i^{im} - V_j^{im}V_i^{re})^2 = (-R_{ij}Q_{Dj} + X_{ij}P_{Dj})^2 \quad (37)$$

$$V_j^4 + [2(P_{Dj}R_{ij} + Q_{Dj}X_{ij}) - V_i^{im^2}]V_j^{im^2} + (P_{Dj}^2 + Q_{Dj}^2)(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) = 0 \quad (38)$$

A equação (38) relaciona as magnitudes de tensão entre os nós  $i$  e  $j$ , a potência ativa e reativa no nó  $j$  e as características elétricas do circuito  $ij$ . Note que em (38) não está explícito o ângulo de fase. Da equação (34) é possível encontrar outra expressão para o ângulo de fase  $\theta_j$  representada pela equação (39).

$$(V_j^{re}V_i^{im} - V_j^{im}V_i^{re}) = R_{ij}Q_{Dj} - X_{ij}P_{Dj} \quad (39)$$

Escrevendo a equação (39) em função da tensão fasorial encontram-se as seguintes equações:

$$V_j^{re} = V_j^{re} \cos \theta_j \quad (40)$$

$$V_j^{im} = V_j^{im} \text{sen } \theta_j \quad (41)$$

$$V_i^{re} = V_i^{re} \cos \theta_i \quad (42)$$

$$V_i^{im} = V_i^{im} \text{sen } \theta_i \quad (43)$$

Quando é substituído as equações (40) – (43) na equação (34) é obtido outra equação a qual está representada pela equação (44).

$$(V_j^{re}V_i^{im} \cos \theta_j \text{sen } \theta_j - V_i^{re}V_j^{im} \cos \theta_i \text{sen } \theta_i) = X_{ij}P_{Dj} - R_{ij}Q_{Dj} \quad (44)$$

$$V_i^{re}V_j^{im} (\cos \theta_j \text{sen } \theta_j - \cos \theta_i \text{sen } \theta_i) = X_{ij}P_{Dj} - R_{ij}Q_{Dj} \quad (45)$$

$$V_i^{re} V_j^{im} \text{sen}(\theta_i - \theta_j) = X_{ij} P_{Dj} - R_{ij} Q_{Dj} \quad (46)$$

$$\text{sen} \theta_j = \frac{P_{Dj} X_{ij} - Q_{Dj} X_{ij}}{V_i^{re} V_j^{im}} \quad (47)$$

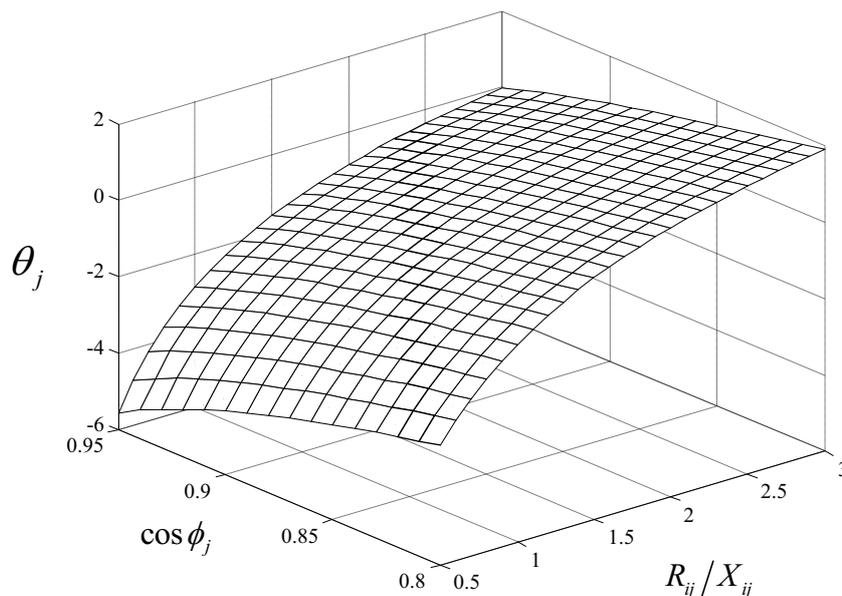
Efetuada as operações indicadas na equação (44), obtém-se a equação (47), a qual será utilizada para calcular o ângulo de fase do SDEE.

Assim as equações (38) e (47) podem ser reescritas em função do fator  $P_{Dj} X_{ij}$ , a relação  $R_{ij}/X_{ij}$  e o ângulo  $\phi_j$  associado com o fator de potência de carga no nó  $j$ ,  $\tan \phi_j = Q_{Dj} / P_{Dj}$ , como mostrado nas equações (48) e (49).

$$(P_{Dj} X_{ij})^2 \left( 1 + \left( \frac{R_{ij}}{X_{ij}} \right)^2 \right) \sec^2(\phi_j) + 2V_j^{im^2} (P_{Dj} X_{ij}) \left( \frac{R_{ij}}{X_{ij}} + \tan(\phi_j) \right) + (\vec{V}_j^4 - V_i^{im^2} V_j^{im^2}) = 0 \quad (48)$$

$$\theta_j = \theta_i - \text{arc sen} \left( (P_{Dj} X_{ij}) \frac{1 - \frac{R_{ij}}{X_{ij}} \tan \phi_j}{\vec{V}_i \vec{V}_j} \right) \quad (49)$$

Nota-se então que o ângulo  $\theta_j$  é proporcional ao carregamento, e aos parâmetros elétricos dos circuitos sendo representado pelo fator  $P_{Dj} X_{ij}$ . Como o ângulo  $\theta_j$  depende do fator  $P_{Dj} X_{ij}$ , então a partir da equação (48) é possível encontrar o valor de  $P_{Dj} X_{ij}$ , resolvendo polinômios de grau 2. Como é conhecido o valor do  $\cos \phi_j$ , tensão máxima e mínima, a relação  $R_{ij}/X_{ij}$  e com os dados fornecidos pelo sistema, utilizando a equação (49) pode-se calcular o ângulo  $\theta$  no nó  $j$ . Considerando o ângulo inicial igual a zero, a tensão máxima 1 *p.u.* e tensão mínima 0,9 *p.u.*, a relação  $R_{ij}/X_{ij}$  igual a [0,50; 3,00] e o fator de potência da carga igual a [0,80; 0,95]. A Figura 2 mostra os valores para  $\theta_j$  obtidos usando as equações (48) e (49). A Figura 2 mostra valores para  $\theta_j$  obtidos usando as equações (48) e (49).

**Figura 2-** Comportamento do ângulo  $\theta_j$ 

**Fonte:** Dados da pesquisa do autor

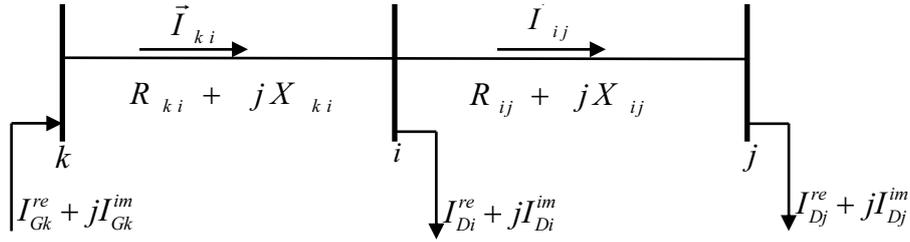
A Figura 2 mostra que, mesmo assumindo a pior condição de operação para o SDEE, ou seja, valor inicial máximo e mínimo para a tensão no nó  $j$  e uma relação  $R_{ij}/X_{ij}$  muito elevada, mesmo assim a variação do ângulo  $\theta_j$  continua pequena, variando em um intervalo de -6 à 2 graus.

## 2.2 EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA DESCREVER O ESTADO DE OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE DE UM SDEE

A equação (50) define a queda de tensão no circuito  $ij$  como mostra a Figura (3).

$$\vec{V}_i - \vec{V}_j = \vec{I}_{ij}(R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall_{ij} \in \Omega_L \quad (50)$$

Em que  $\vec{V}_i$  e  $\vec{I}_{ij}$  são os fasores de tensão no nó  $i$  e o fluxo de corrente no circuito  $ij$ ,  $R_{ij}$  e  $X_{ij}$  a resistência a reatância do circuito  $ij$ ,  $\Omega_L$  representa todos os conjuntos dos ramos. Se separar a equação (50) em duas partes, real e imaginária, é possível encontrar outras duas novas equações (51) e (52):

**Figura 3-** Exemplo ilustrativo para descrever o estado de operação de SDEE

**Fonte:** Elaboração do próprio autor

$$V_i^{re} - V_j^{re} = I_{ij}^{re} R_{ij} - I_{ij}^{im} X_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (51)$$

$$V_i^{im} - V_j^{im} = I_{ij}^{re} X_{ij} + I_{ij}^{im} R_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (52)$$

Onde é definido que  $V_i^{re}$  e  $V_i^{im}$  são as partes real e imaginária de  $\vec{V}_i$ ,  $I_{ij}^{re}$  e  $I_{ij}^{im}$  são as partes real e imaginária no circuito  $\vec{I}_{ij}$ . A partir da Figura 3 pode-se determinar as principais equações de equilíbrio da corrente como mostra (53) e (54).

$$\sum_{ki \in \Omega_l} I_{ki}^{re} - \sum_{ij \in \Omega_l} I_{ij}^{re} + I_{Gi}^{re} = I_{Di}^{re} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (53)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} I_{ki}^{im} - \sum_{ij \in \Omega_l} I_{ij}^{im} + I_{Gi}^{im} = I_{Di}^{im} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (54)$$

Em que  $\Omega_b$  representa o conjunto dos nós, e  $I_{Di}^{re}$  e  $I_{Di}^{im}$  são as partes, real e imaginária da demanda de corrente no nó  $i$  e  $I_{Si}^{re}$ ,  $I_{Si}^{im}$  são as partes real e imaginária da corrente do gerador no nó  $i$ . Note-se que as equações mostradas acima se relacionam entre si em dois aspectos importantes, injeção de corrente nos nós (geração e demanda) com correntes nos circuitos.

Se for considerada uma carga do tipo constante para os valores da demanda de potência ativa e reativa,  $P_{Di} + jQ_{Di}$ , assim a corrente exigida pela carga no nó  $i$ , é uma função da demanda de potências ativa e reativa no nó  $i$  representada por  $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$  e  $\vec{V}_i$  é a magnitude da tensão no nó  $i$  como é mostrado em (55).

$$\vec{I}_{Di} = \left( \frac{P_{Di} + jQ_{Di}}{\vec{V}_i} \right)^* \quad \forall i \in \Omega_b \quad (55)$$

Quando a equação (55) é dividida em parte real e imaginária obtém-se outras duas equações (56) e (57). Se for conhecida a magnitude da tensão no nó da subestação, a solução do sistema de equações não lineares (51)-(54), (56) e (57) representam o estado de operação de um SDEE, e geralmente é utilizado nos métodos iterativos de varredura de FC. Observe que estas equações são válidas tanto para SDEE radiais e/ou malhados em geral.

$$I_{Di}^{re} = \frac{P_{Di}V_i^{re} + Q_{Di}V_i^{im}}{V_i^{re2} + V_i^{im2}} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (56)$$

$$I_{Di}^{im} = \frac{P_{Di}V_i^{im} - Q_{Di}V_i^{re}}{V_i^{re2} + V_i^{im2}} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (57)$$

## 2.3 LINEARIZAÇÃO

Observe que as equações (51)-(54), são lineares, porém (56)-(57) são não lineares, conseqüentemente pode-se fazer uma aproximação de (56)-(57) usando expressões lineares como mostra (58)-(59).

$$I_{Di}^{re} = a_i V_i^{re} + b_i V_i^{im} + c_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (58)$$

$$I_{Di}^{im} = d_i V_i^{re} + e_i V_i^{im} + f_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (59)$$

Onde  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$  são coeficientes que dependem diretamente da demanda de potência ativa e reativa dada por  $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$  e da tensão  $\vec{V}_i$ , assim são calculados para cada nó  $i$  usando o método dos mínimos quadrados para aproximar as equações (56)-(57) para (58)-(59), levando em conta o limite da variação da magnitude de tensão e o ângulo de fase da tensão  $\vec{V}_i$  no nó  $i$ .

### 2.3.1 Método dos mínimos quadrados

Segundo Ruggiero et al. (2011), o método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização matemática que tem como objetivo principal, encontrar um melhor ajuste possível para um conjunto de dados, ou seja, minimizar a soma dos quadrados da diferença entre a curva ajustada e os dados conhecidos. Dado um conjunto de pontos conhecidos  $(x_k, y_k)$ ,  $f(x_k, y_k)$ , com  $k = 0, 1, 2, \dots, m$ . Pretende-se determinar uma função  $\varphi(x, y)$  de tal forma que o desvio em cada ponto  $k$ , definido pela equação (60)

$$d_k = (x_k, y_k) - \varphi(x_k, y_k) \quad (60)$$

seja o mínimo possível, onde  $\varphi$  é uma combinação linear de funções contínuas de  $g_i(x_k, y_k)$ , em que  $i = 1, 2, \dots, n$  escolhidas de acordo com os dados do problema. Como  $\varphi: R^2 \rightarrow R$  temos

$$\varphi(x_k, y_k) = \alpha_1 g_1(x_k, y_k) + \alpha_2 g_2(x_k, y_k) + \dots + \alpha_n g_n(x_k, y_k) \quad (61)$$

$\downarrow$   
 Ajuste linear

Visto que o método dos mínimos quadrados consiste em determinar os valores dos  $\alpha_i$  de tal forma que a soma dos quadrados dos desvios sejam mínimos, ou seja, encontrar valores para  $\alpha_i$  que minimiza a função (62).

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k, y_k) - \varphi(x_k, y_k)]^2 \quad (62)$$

Substituindo  $\varphi(x_k, y_k)$  na equação (62) obtém-se a equação (63):

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k, y_k) - \alpha_1 g_1(x_k, y_k) + \alpha_2 g_2(x_k, y_k) + \dots + \alpha_n g_n(x_k, y_k)]^2 = 0 \quad (63)$$

Usando as derivadas parciais e derivando a equação (63) em função dos  $\alpha_i$ , pode-se determinar o ponto de mínimo de  $F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ . Que nada mais é do que encontrar seus pontos críticos que neste caso é determinar os valores de  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  tais que

$$\left. \frac{\partial F}{\partial \alpha_i} \right|_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)} = 0 \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \quad (64)$$

Calculando estas derivadas parciais para cada valor que pertence ao seguinte intervalo  $i = 1, 2, \dots, n$ , obtém-se um sistema linear com  $n$  equações e  $n$  incógnitas que de certa forma pode ser escrito na forma matricial  $A\alpha = b$ .

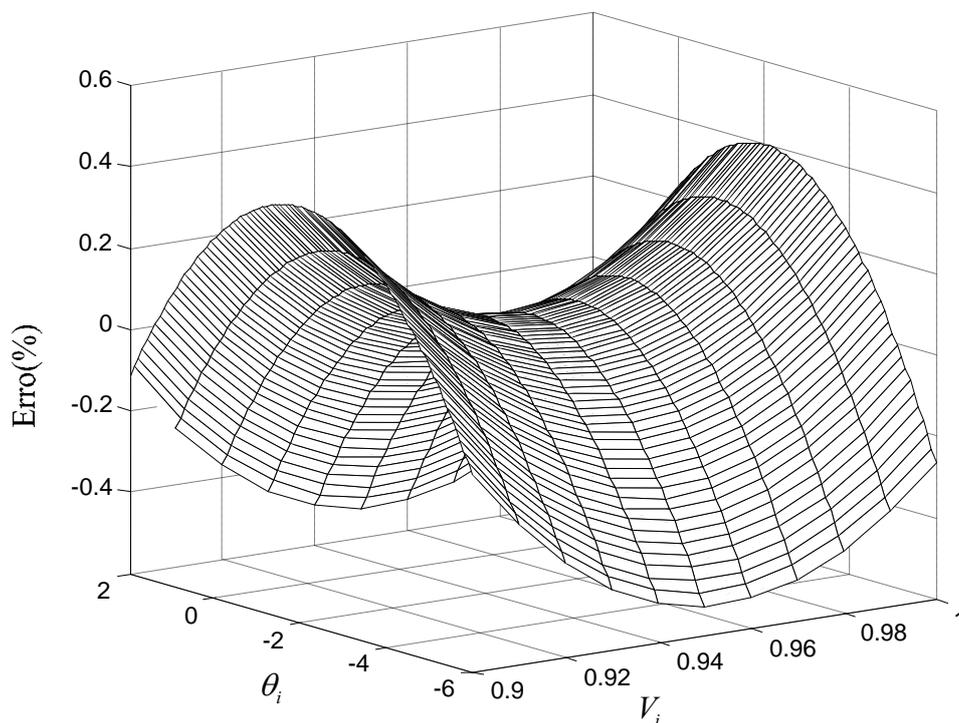
$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m g_1(x_k, y_k)g_1(x_k, y_k) & \sum_{k=1}^m g_1(x_k, y_k)g_2(x_k, y_k) & \dots & \sum_{k=1}^m g_1(x_k, y_k)g_n(x_k, y_k) \\ \sum_{k=1}^m g_2(x_k, y_k)g_1(x_k, y_k) & \sum_{k=1}^m g_2(x_k, y_k)g_2(x_k, y_k) & \dots & \sum_{k=1}^m g_2(x_k, y_k)g_n(x_k, y_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^m g_n(x_k, y_k)g_1(x_k, y_k) & \sum_{k=1}^m g_n(x_k, y_k)g_2(x_k, y_k) & \dots & \sum_{k=1}^m g_n(x_k, y_k)g_n(x_k, y_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m f(x_k, y_k)g_1(x_k, y_k) \\ \sum_{k=1}^m f(x_k, y_k)g_2(x_k, y_k) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m f(x_k, y_k)g_n(x_k, y_k) \end{bmatrix} \quad (65)$$

O objetivo principal nesta subseção é mostrar a ideia principal do método dos mínimos quadrados, para realizar uma aproximação linear das equações (56) e (57). Para o presente trabalho foi considerado o caso discreto do método de mínimos quadrados, além disso, podem ser usadas outras técnicas para aproximar uma função não linear para uma equivalente linear. A técnica a ser utilizada fica a critério do pesquisador em escolher qual é a mais adequada para desenvolver sua pesquisa. No presente trabalho a técnica utilizada demonstrou eficiência e precisão nos resultados obtidos.

### 2.3.2 Exemplo ilustrativo para o cálculo dos coeficientes de linearização

Para uma carga de  $100 + j60$  KVA, considerando um intervalo de  $[0,9; 1,0]$  p.u. para a magnitude de tensão e  $[-6; 2]$  graus para o ângulo de fase foram calculados os seguintes valores para os coeficientes de linearização:

$a_i = -106,00$ ;  $b_i = 73,97$ ;  $c_i = 206,03$ ;  $d_i = 74,11$ ;  $e_i = 105,77$ ;  $f_i = -133,61$  e um erro percentual variando em um intervalo de  $[-0,4; 0,6]$  como mostra a Figura 4, em que este erro representa a diferença de demanda da magnitude da corrente exata obtida resolvendo um conjunto de equações não lineares e a solução das mesmas comparadas com as equações linearizadas a partir dos coeficientes mostrados acima em função da magnitude da tensão e do ângulo de fase. Nota-se que o erro máximo é muito pequeno (aproximadamente 0,6%), o que garante que as tensões e as correntes dos circuitos sejam calculadas com um pequeno erro.

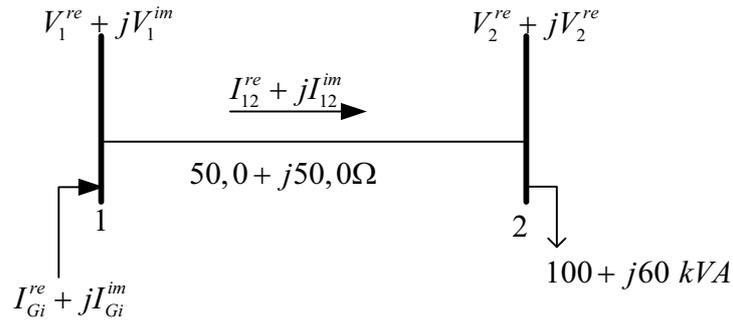
**Figura 4-** Erro percentual da magnitude da corrente do fluxo atual

**Fonte:** Dados da pesquisa do autor

Após ter aplicado a técnica de linearização, obteve-se outro conjunto de equações lineares representado por (51)-(54), (58) e (59) que passa a representar o estado de operação do SDEE radial e/ou malhado.

## 2.4 EXEMPLO ILUSTRATIVO PARA O CÁLCULO DA OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE DE UM SDEE

Tomando como base a Figura 5, será calculado o ponto de operação deste sistema utilizando as equações deduzidas à partir da Figura 3 e os dados fornecidos neste exemplo. E com as equações (51) – (54), (58) e (59), é formado um conjunto de equações lineares que passa a representar este exemplo, o qual é mostrado em (66).

**Figura 5** - Exemplo de um sistema teste de dois nós

**Fonte:** Elaboração do próprio autor

As equações deduzidas a partir da Figura 3 podem ser reunidas em um só conjunto formando um sistema de equações lineares como mostrado em (66).

$$\begin{cases}
 V_1^{re} - V_2^{re} = I_{12}^{re} R_{ij} - I_{12}^{im} X_{ij} \\
 V_1^{im} - V_2^{im} = I_{12}^{re} X_{ij} + I_{12}^{im} R_{ij} \\
 -I_{12}^{re} + I_{G1}^{re} = 0 \\
 -I_{12}^{im} + I_{G1}^{im} = 0 \\
 I_{12}^{re} = I_{D2}^{re} \\
 I_{12}^{im} = I_{D2}^{im} \\
 I_{D2}^{re} = a_i V_2^{re} + b_i V_2^{im} + c_i \\
 I_{D2}^{im} = d_i V_2^{re} + e_i V_2^{im} + f_i
 \end{cases} \quad (66)$$

Como o sistema (66) possui  $n$  equações e  $n$  incógnita, então é possível reescrevê-lo como sendo um sistema que contém um vetor de incógnitas, um vetor do lado direito e uma matriz de coeficientes como mostrado em (67).

$$\begin{cases}
 -V_2^{re} - I_{12}^{re} R_{ij} + I_{12}^{im} X_{ij} = -V_1^{re} \\
 -V_2^{im} - I_{12}^{re} X_{ij} - I_{12}^{im} R_{ij} = -V_1^{im} \\
 -I_{12}^{re} + I_{G1}^{re} = 0 \\
 -I_{12}^{im} + I_{G1}^{im} = 0 \\
 I_{12}^{re} - I_{D2}^{re} = 0 \\
 I_{12}^{im} - I_{D2}^{im} = 0 \\
 I_{D2}^{re} - a_i V_2^{re} - b_i V_2^{im} = c_i \\
 I_{D2}^{im} - d_i V_2^{re} - e_i V_2^{im} = f_i
 \end{cases} \quad (67)$$

Resolver o sistema (67) de forma matricial  $Ax = b$ , é uma forma de reduzir o tempo usado para resolver um sistema com mais de uma variável. O objetivo é estender este sistema para obter a solução de sistemas maiores, então a maneira mais eficiente de resolver este sistema é usar sistemas de matrizes. Tendo em conta que o número de variáveis depende diretamente da quantidade de nós existente no SDEE.

A matriz mostrada em (68) representa a estrutura do sistema de equações mostrado em (67) em sua forma matricial.

$$\begin{bmatrix} -1.0000 & 0 & -0.0500 & 0.0500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.0000 & -0.0500 & -0.0500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & -1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & -1.0000 \\ 1.0600 & -0.7398 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ -0.7411 & -1.0577 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2^{re} \\ V_2^{im} \\ I_{12}^{re} \\ I_{12}^{im} \\ I_{G1}^{re} \\ I_{G1}^{im} \\ I_{D2}^{re} \\ I_{D2}^{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.0000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.0603 \\ -1.3361 \end{bmatrix} \quad (68)$$

Usando o software MATLAB 7.9.0 (R2009a) obteve-se a parte real e imaginária, da tensão no nó  $j$ , da corrente no circuito, da corrente da geração e da corrente da demanda, os quais se encontram na Tabela 1.

**Tabela 1** - Resultados do sistema teste de 2 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 2 nós	Magnitude da corrente (A)			Magnitude da tensão (p.u.)	Perda ativa (kW)	Ângulo de fase (graus)
	$ \vec{I}_{12} $	$ \vec{I}_{G1} $	$ \vec{I}_{D2} $	$ \vec{V}_2 $		$\arg(\vec{V}_2)$
Modelo proposto	0,12760	0,12760	0,12760	0,9122	8,1410	-1,2488
Shirmoha- mmadi	0,12786	0,12786	0,12786	0,9120	8,1748	-1,2565
Erro (%)	0,20%	0,20%	0,20%	-0,021%	0,41%	0,61%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Na Tabela 1 também são apresentados os resultados de um FC de varredura para comparar os resultados obtidos com a metodologia proposta. Observa-se que para o sistema teste de dois nós os erros percentuais são menores que 0,61% quando comparados com os

valores obtidos usando um FC de varredura (Shirmohammadi). Onde foi considerada uma variação do ângulo de fase entre  $[-6; 2]$  graus e uma magnitude de tensão mínima de 0,9 p.u.

Na próxima subsecção será apresentada uma estratégia para estimar o intervalo de variação do ângulo e uma magnitude de tensão mínima com o intuito de melhorar os erros percentuais calculados na subsecção 2.4.

## 2.5 ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE TENSÃO MÍNIMA E DO ÂNGULO MÁXIMO E MÍNIMO DE FASE DE UM SDEE

O ângulo máximo e mínimo de 2 a -6 graus foi obtido considerando o pior condição de operação para um SDEE. Uma estimativa de forma mais precisa dos ângulos máximo e mínimo de fase do SDEE, permite obter resultados mais precisos do estado de operação do sistema quando comparados com um FC de varredura.

Uma das formas de conhecer o ângulo de fase máximo e mínimo de um SDEE é usar o conhecimento do próprio operador do sistema. Onde o mesmo se baseia nas características elétricas dos circuitos e no comportamento da carga. Outra forma de estimar os ângulos de fases do SDEE seria através da solução das equações (51)-(54) e (69)-(70) considerando uma tensão mínima para o sistema. Este valor pode ser aleatório ficando a critério do pesquisador, para este caso foi considerado uma tensão mínima de  $\underline{V}=0.9$  p.u. para todos os nós do sistema.

$$I_{Di}^{re} = P_{Di}/\underline{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (69)$$

$$I_{Di}^{im} = -Q_{Di}/\underline{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (70)$$

### 2.5.1 Exemplo ilustrativo para o cálculo do ângulo máximo e mínimo de fase de um SDEE

Neste exemplo é considerado uma tensão mínima  $\underline{V}=0.9$  p.u. para todos os nós do sistema, assim o sistema de equações (51)-(54) e (69)-(70) para o sistema teste de 2 nós passa a ser representado da seguinte forma, como mostra o sistema formado pelo conjunto de equações (71):

$$\left\{ \begin{array}{l} -V_2^{re} - I_{12}^{re} R_{ij} + I_{12}^{im} X_{ij} = -V_1^{re} \\ -V_2^{im} - I_{12}^{re} X_{ij} - I_{12}^{im} R_{ij} = -V_1^{im} \\ -I_{12}^{re} + I_{G1}^{re} = 0 \\ -I_{12}^{im} + I_{G1}^{im} = 0 \\ I_{12}^{re} - I_{D2}^{re} = 0 \\ I_{12}^{im} - I_{D2}^{im} = 0 \\ I_{D2}^{re} - P_{D2} / \underline{V} = 0 \\ I_{D2}^{im} + Q_{D2} / \underline{V} = 0 \end{array} \right. \quad (71)$$

Resolvendo este sistema matricialmente são obtidos os seguintes resultados, para o ângulo máximo e mínimo -1,3972 e 0 graus e 0,9114 para a magnitude de tensão mínima. Com esta variação do ângulo são calculados todos os coeficientes de linearização, e utilizando as equações (51) – (54), (58) e (59), calcula-se o ponto de operação do sistema. Os novos resultados são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Resultados do sistema teste de 2 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 2 nós	Magnitude da corrente (A)			Magnitude da tensão (p.u.)	Perda ativa (kW)	Ângulo de fase (graus)
	$ \vec{I}_{12} $	$ \vec{I}_{G1} $	$ \vec{I}_{D2} $	$ \vec{V}_2 $		$\arg(\vec{V}_2)$
Modelo proposto	0,12770	0,12770	0,12770	0,9122	8,1600	-1,2582
Shirmoha- mmadi	0,12786	0,12786	0,12786	0,9120	8,1748	-1,2565
Erro (%)	0,12%	0,12%	0,12%	-0,02%	0,18%	-0,13%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Com o novo intervalo do ângulo de fase variando de [-1,3972; 0,00] graus, observe que teve uma redução significativa nos erros percentuais, com um erro máximo de 0,18% quando comparados com os resultados obtidos utilizando um FC de varredura (Shirmohammadi). É importante lembrar que esta nova variação do ângulo de fase depende de cada SDEE testado.

## 2.6 FASE DE CORREÇÃO

Se for conhecida uma solução do sistema de equações lineares (51)-(54), (58) e (59), é possível melhorar os resultados obtidos realizando uma fase de correção em função da linearização das equações (56)-(57) a partir do último ponto de operação calculado para o sistema. Para a fase de correção foram substituídas as equações (58)-(59) pelas equações (72) e (73), em que as derivadas parciais das equações (56)-(57) em função de  $V_i^{re*}$  e  $V_i^{im*}$  calculadas usando o ponto atual de operação do sistema, o qual foi obtido na solução do sistema de equações lineares (51)-(54), (58) e (59).

As equações (72) e (73) representa a linearização das equações (56) e (57) em função do último ponto de operação calculado.

$$I_{Di}^{re} = \frac{\partial I_{Di}^{re}}{\partial V_i^{re}} V_i^{re} + \frac{\partial I_{Di}^{re}}{\partial V_i^{im}} V_i^{im} + \left[ \frac{P_{Di}(V_i^{re})^* + Q_{Di}(V_i^{im})^*}{(V_i^{re})^{*2} + (V_i^{im})^{*2}} - \frac{\partial I_{Di}^{re}}{\partial V_i^{re}} (V_i^{re})^* - \frac{\partial I_{Di}^{re}}{\partial V_i^{im}} (V_i^{im})^* \right] \quad \forall i \in \Omega_b \quad (72)$$

$$I_{Di}^{im} = \frac{\partial I_{Di}^{im}}{\partial V_i^{re}} V_i^{re} + \frac{\partial I_{Di}^{im}}{\partial V_i^{im}} V_i^{im} + \left[ \frac{P_{Di}(V_i^{im})^* - Q_{Di}(V_i^{re})^*}{(V_i^{re})^{*2} + (V_i^{im})^{*2}} - \frac{\partial I_{Di}^{im}}{\partial V_i^{re}} (V_i^{re})^* - \frac{\partial I_{Di}^{im}}{\partial V_i^{im}} (V_i^{im})^* \right] \quad \forall i \in \Omega_b \quad (73)$$

Os coeficientes das equações (72) e (73), serão chamados de “coeficientes de correção”, e as derivadas parciais das equações (74)-(75) em função de  $V_i^{re}$  e  $V_i^{im}$  assumem a seguinte forma:

$$\frac{\partial I_{Di}^{re}}{\partial V_i^{re}} = \frac{P_{Di}(V_i^{im*})^2 - P_{Di}(V_i^{re*})^2 - 2Q_{Di}(V_i^{im*}V_i^{re*})}{[V_i^{re*2} + V_i^{im*2}]^2} \quad (74)$$

$$\frac{\partial I_{Di}^{re}}{\partial V_i^{im}} = \frac{Q_{Di}(V_i^{re*})^2 - Q_{Di}(V_i^{im*})^2 - 2P_{Di}(V_i^{im*}V_i^{re*})}{[V_i^{re*2} + V_i^{im*2}]^2} \quad (75)$$

$$\frac{\partial I_{Di}^{im}}{\partial V_i^{re}} = \frac{-Q_{Di}(V_i^{im*})^2 + Q_{Di}(V_i^{re*})^2 - 2P_{Di}(V_i^{re*}V_i^{im*})}{[V_i^{re*2} + V_i^{im*2}]^2} \quad (76)$$

$$\frac{\partial I_{Di}^{im}}{\partial V_i^{im}} = \frac{P_{Di}(V_i^{re*})^2 - P_{Di}(V_i^{im*})^2 + 2Q_{Di}(V_i^{re*}V_i^{im*})}{[V_i^{re*2} + V_i^{im*2}]^2} \quad (77)$$

Substituindo (74), (75) em (72) e (76), (77) em (73), encontra-se outros valores dos coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ ,  $e_i$  e  $f_i$ , em seguida resolver o novo sistema de equações lineares obtidos a partir de (51) – (54), (72) e (73). Note que é possível utilizar mais de uma vez a fase de correção com o objetivo de melhorar a precisão dos resultados caso seja necessário. Porém, o uso repetitivo da fase de correção pode trazer um maior esforço computacional, sendo assim, neste trabalho foi necessário usar apenas uma vez a fase de correção.

### 2.6.1 Exemplo ilustrativo considerando a fase de correção

A partir da Figura 5 será calculado o estado de operação do sistema teste dado a tensão inicial igual a  $V_1 = 1$  p.u., a impedância da linha  $Z = 50,0 + j50,0 \Omega$  e uma carga de  $100 + j60$  KVA. Dado o ponto de operação do sistema mostrado na Tabela 3, utilizando o sistema de equações (51)-(54), (72) e (73), para obter uma correção do ponto de operação atual. Assim, o sistema de equações lineares para este exemplo é representado da seguinte forma como mostrado no sistema (78):

$$\left\{ \begin{array}{l} -V_2^{re} - I_{12}^{re} R_{ij} + I_{12}^{im} X_{ij} = -V_1^{re} \\ -V_2^{im} - I_{12}^{re} X_{ij} - I_{12}^{im} R_{ij} = -V_1^{im} \\ -I_{12}^{re} + I_{G1}^{re} = 0 \\ -I_{12}^{im} + I_{G1}^{im} = 0 \\ I_{12}^{re} - I_{D2}^{re} = 0 \\ I_{12}^{im} - I_{D2}^{im} = 0 \\ I_{D2}^{re} = \frac{\partial I_{D2}^{re}}{\partial V_2^{re}} V_2^{re} + \frac{\partial I_{D2}^{re}}{\partial V_2^{im}} V_2^{im} + \left[ \frac{P_{D2} V_2^{re*} + Q_{D2} V_2^{im*}}{V_2^{re*2} + V_2^{im*2}} - \frac{\partial I_{D2}^{re}}{\partial V_2^{re}} V_2^{re*} - \frac{\partial I_{D2}^{re}}{\partial V_2^{im}} V_2^{im*} \right] \\ I_{D2}^{im} = \frac{\partial I_{D2}^{im}}{\partial V_2^{re}} V_2^{re} + \frac{\partial I_{D2}^{im}}{\partial V_2^{im}} V_2^{im} + \left[ \frac{P_{D2} V_2^{im*} - Q_{D2} V_2^{re*}}{V_2^{re*2} + V_2^{im*2}} - \frac{\partial I_{D2}^{im}}{\partial V_2^{re}} V_2^{re*} - \frac{\partial I_{D2}^{im}}{\partial V_2^{im}} V_2^{im*} \right] \end{array} \right. \quad (78)$$

em que, a derivada da parte real da corrente em relação a parte real da tensão corresponde ao coeficiente  $a_i$  e a derivada da parte real da corrente em relação a parte imaginária da tensão corresponde ao coeficiente  $b_i$  e o termo entre colchete corresponde ao coeficiente  $c_i$ , e para os coeficientes  $d_i$ ,  $e_i$  e  $f_i$  a ideia é análoga. Resolvendo o sistema de equações lineares mostrado em (78), os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Resultados do sistema teste de 2 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

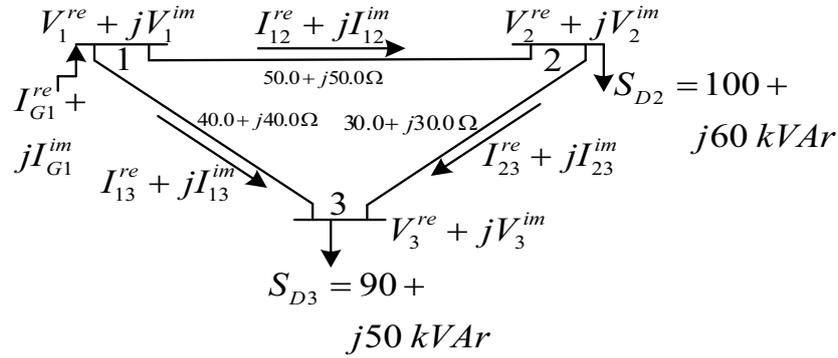
Sistema 2 nós	Magnitude da corrente (A)			Magnitude da tensão (p.u.)	Perda ativa (kW)	Ângulo de fase (graus)
	$ \vec{I}_{12} $	$ \vec{I}_{G1} $	$ \vec{I}_{D2} $	$ \vec{V}_2 $		$\arg(\vec{V}_2)$
Modelo proposto	0,12786	0,12786	0,12786	0,9120	8,1748	-1,2565
Shirmoha- mmadi	0,12786	0,12786	0,12786	0,9120	8,1748	-1,2565
Erro (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Se comparar os valores mostrados nas Tabelas 1 e 2 com os resultados da Tabela 3 encontrados após a fase de correção, percebe-se uma melhora significativa nas características elétricas consideradas no SDEE. Neste caso, pode-se dizer que a fase de correção tem extrema importância nos resultados apresentados.

## 2.7 PONTO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MALHADO

Note que a solução do sistema de equações não lineares (51)-(54), (56) e (57) representam o estado de operação do SDEE independentemente se é radial ou fracamente malhado. Assim, o processo de linearização mostrado nas subseções anteriores pode ser utilizado. Na Figura 6 é mostrado um exemplo de um sistema malhado de três nós e a partir dele pode ser deduzido as equações necessárias para calcular o ponto de operação deste sistema.

**Figura 6**– Exemplo de um sistema teste malhado de três nós

Fonte: Elaboração do próprio autor

Em que a magnitude das tensões são representadas da seguinte forma  $\vec{V}_1 = V_1^{re} + jV_1^{im}$ ,  $\vec{V}_2 = V_2^{re} + jV_2^{im}$  e  $\vec{V}_3 = V_3^{re} + jV_3^{im}$ , a magnitude da corrente nos circuitos são  $\vec{I}_{12} = I_{12}^{re} + jI_{12}^{im}$ ,  $\vec{I}_{13} = I_{13}^{re} + jI_{13}^{im}$  e  $\vec{I}_{23} = I_{23}^{re} + jI_{23}^{im}$ , a impedância dos circuitos são  $Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$ ,  $Z_{13} = R_{13} + jX_{13}$  e  $Z_{23} = R_{23} + jX_{23}$  a demanda no nó 2 e no nó 3 são  $S_{D2} = P_{D2} + jQ_{D2}$  e  $S_{D3} = P_{D3} + jQ_{D3}$ .

As equações que determinam o ponto de operação do sistema mostrado na Figura 6 são:

$$V_1^{re} - V_2^{re} = I_{12}^{re} R_{12} - I_{12}^{im} X_{12} \quad (79)$$

$$V_1^{im} - V_2^{im} = I_{12}^{re} X_{12} + I_{12}^{im} R_{12} \quad (80)$$

$$V_2^{re} - V_3^{re} = I_{23}^{re} R_{23} - I_{23}^{im} X_{23} \quad (81)$$

$$V_2^{im} - V_3^{im} = I_{23}^{re} X_{23} + I_{23}^{im} R_{23} \quad (82)$$

$$V_1^{re} - V_3^{re} = I_{13}^{re} R_{13} - I_{13}^{im} X_{13} \quad (83)$$

$$V_1^{im} - V_3^{im} = I_{13}^{re} X_{13} + I_{13}^{im} R_{13} \quad (84)$$

$$I_{G1}^{re} - I_{12}^{re} - I_{13}^{re} = 0 \quad (85)$$

$$I_{G1}^{im} - I_{12}^{im} - I_{13}^{im} = 0 \quad (86)$$

$$-I_{D2}^{re} = I_{23}^{re} - I_{12}^{re} \quad (87)$$

$$-I_{D2}^{im} = I_{23}^{im} - I_{12}^{im} \quad (88)$$

$$I_{D3}^{re} = I_{13}^{re} + I_{23}^{re} \quad (89)$$

$$I_{D3}^{im} = I_{13}^{im} + I_{23}^{im} \quad (90)$$

$$I_{D2}^{re} = a_2 V_2^{re} + b_2 V_2^{im} + c_2 \quad (91)$$

$$I_{D2}^{im} = d_2 V_2^{re} + e_2 V_2^{im} + f_2 \quad (92)$$

$$I_{D3}^{re} = a_3 V_3^{re} + b_3 V_3^{im} + c_3 \quad (93)$$

$$I_{D3}^{im} = d_3 V_3^{re} + e_3 V_3^{im} + f_3 \quad (94)$$

### 2.7.1 Exemplo ilustrativo considerando um sistema malhado

Considerando uma tensão inicial de  $V_1 = 1 \text{ p.u.}$  a impedância dos circuitos  $Z_{12} = 50,0 + j50,0 \ \Omega$ ,  $Z_{13} = 40,0 + j40,0 \ \Omega$  e  $Z_{23} = 30,0 + j30,0 \ \Omega$ , uma demanda no nó 2 de  $S_{D2} = 100,0 + j60,0 \text{ kVA}$ ,  $S_{D3} = 90,0 + j50,0 \text{ kVA}$ , assim resolvendo as equações (79)-(94) como mostrado nas subseções 2.4, 2.5 e 2.6, obteve-se os seguintes resultados, os quais são mostrados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Resultados do sistema teste de 3 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (A)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
3 nós						
MP	10,0742	0,12447	0,01548	0,93835	0,000	-0,92270
FC NR	10,0794	0,12450	0,01549	0,93834	0,000	-0,92440
Erro%	0,051%	0,024%	0,064%	-0,0010%	0,000%	0,18%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Os resultados mostrados na Tabela 4 foram calculados considerando o pior caso de operação para um sistema de distribuição, ou seja, assume-se que, pela pior das hipóteses o sistema opera com valor de tensão máximo e mínimo permitido e com uma variação angular que varia entre 2 à -6 graus, e nota-se, que mesmo assim os resultados ainda são satisfatórios.

Na Tabela 5 considerou-se uma tensão mínima de  $\underline{V} = 0.9 \text{ p.u.}$  para todos os nós do sistema, com o objetivo de diminuir o espaço de busca para a convergência do método. A variação do ângulo irá depender da dimensão do sistema teste.

**Tabela 5** - Resultados do sistema teste de 3 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 3 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (A)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	10,0707	0,12445	0,01547	0,93837	0,000	-0,92525
FC NR	10,0794	0,12450	0,01549	0,93834	0,000	-0,92440
Erro%	0,086%	0,040%	0,12%	-0,0031%	0,000%	-0,091%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Com o novo valor do ângulo estimado pelo próprio modelo, os valores encontrados são melhores que os mostrados na Tabela 4.

Pensando na possibilidade de obter um valor mais próximo da solução encontrada com o fluxo de carga de Newton-Raphson, foi proposta uma fase de correção fazendo a derivada parcial das equações (56) e (57) à partir do último ponto de operação calculado, encontrando um novo conjunto de equações constituído por (74)-(77) onde o mesmo irá determinar outros valores para os coeficiente de linearização e substituindo-os nas equações (58) e (59) e resolvendo o sistema de equações lineares constituído por (51)-(54), (58) e (59) foram encontrados os seguintes resultados, como mostra a Tabela 6.

**Tabela 6** - Resultados do sistema teste de 3 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 3 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (A)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	10,0794	0,12450	0,01549	0,93834	0,000	-0,92440
FC NR	10,0794	0,12450	0,01549	0,93834	0,000	-0,92440
Erro%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Assim percebe-se que após a fase de correção os valores encontrados são iguais quando comparado com método já existente.

### Nota sobre a seção 2:

Na seção 2 a metodologia apresentada foi dividida em 3 subseções, as quais são 2.4, 2.5 e 2.6, com objetivo de apresentar três diferentes fases de cálculo para que a solução encontrada com a metodologia. É importante ressaltar que a metodologia apresentada em 2.4

é a base principal para desenvolver as subseções 2.5 e 2.6, sendo a subseção 2.5 uma alteração das equações da demanda de corrente e a subseção 2.6 é uma fase de correção fazendo a derivada parcial das mesmas equações de demanda de corrente.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um fluxo de carga não – iterativo para calcular o ponto de operação de um sistema de distribuição de energia elétrica em regime permanente utilizando um sistema de equações lineares, o qual foi apresentado em 2.4. Considerando que o sistema esteja operando em seus limites máximo e mínimo especificados, ou seja, em suas condições típicas de operação, mesmo assim foi possível observar que os valores da magnitude da tensão mínima, a magnitude da corrente no circuito, a magnitude da corrente da geração, a magnitude da corrente de demanda, os ângulos de fases e o valor da perda de potência ativa continua sendo de boa qualidade.

Com o intuito de melhorar a solução encontrada em 2.4, propõe-se em 2.5 outra técnica para estimar o ângulo de fase máximo e mínimo e a magnitude de tensão mínima para o sistema, para isso foi considerado que todos os nós do sistema operam com um valor de tensão mínima de 0,9 p.u., assim obteve-se um novo valor para a magnitude de tensão mínima e para os ângulos de fases máximo e mínimo. Com estes novos valores, calculou-se novamente o ponto de operação do sistema usando o sistema de equações apresentado em 2.5, e comparando estes resultados com os que foram mostrados em 2.4, foi possível verificar que a diferença percentual entre as características elétricas consideradas teve uma redução bastante significativa.

Com os valores obtidos utilizando a metodologia apresentada em 2.5, poderia chegar-se a conclusão de que os resultados mostrados podem ser considerados factíveis para o problema, quando comparados com métodos apresentados na literatura atual. Uma pergunta que inquieta é a seguinte, seria possível melhorar ainda mais estes resultados? Com certeza a resposta é sim, e para provar que é possível foi apresentado em 2.6 uma fase de correção, onde a mesma se baseia nas derivadas parciais das equações da corrente de demanda em função da parte real e imaginária da tensão considerando o último ponto de operação calculado. Após realizar esta fase do processo de cálculo o erro percentual entre as características elétricas consideradas no SDEE possui uma diferença igual a zero quando comparadas com os métodos disponíveis na literatura.

## 2.8 TÉCNICA DE IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

- Utilizando a subseção 2.5 calcular a tensão mínima de cada nó e o ângulo máximo e mínimo do SDEE;
- Calcular os coeficientes de linearização com a subseção 2.3;
- Utilizando subseção 2.4 calcular o ponto de operação do SDEE;
- Utilizando o ponto de operação calculado atualizar os coeficientes de linearização com a subseção 2.6;
- Com os novos coeficientes atualizar o ponto de operação do sistema com a subseção 2.4.

### 3 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, os sistemas testes de 33, 70, 136, 202, 400 e 1080 nós, são utilizados para mostrar a precisão e a eficiência da técnica de solução proposta para calcular o ponto de operação em regime permanente de um sistema de distribuição radial e malhado.

A precisão dos resultados da metodologia proposta (MP) é avaliada a partir do último ponto de operação calculado usando um fluxo de carga (FC) de varredura (Shirmohammadi) para sistemas radiais e um FC de Newton-Raphson para sistemas malhados. Para todos os casos são apresentados os erros percentuais das perdas de potência ativa, da magnitude da corrente, da magnitude de tensão e ângulo de fase.

#### 3.1 SISTEMA TESTE DE 33 NÓS RADIAL

Os dados do sistema de teste 33 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição radial com 33 nós, sendo o nó 1 o nó de geração, tensão base de 12,66 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema é muito utilizado por pesquisadores em grande parte dos trabalhos desenvolvidos na engenharia elétrica por ser de pequeno porte e de fácil visualização, inclusive foi usado por Baran e Wu em 1989.

A Tabela 7 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando uma variação angular máxima e mínima de 2 à -6 graus (considerando as condições típicas de operação do sistema de distribuição, como mostrado na seção 2.4). Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão é menor que 0,03%, e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 2%.

**Tabela 7** - Resultados do sistema teste de 33 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 33 nós	Perda ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	202,6312	4,61138	0,07866	0,91311	0,5040	-0,4866
FC	202,6771	4,61282	0,07867	0,91309	0,4955	-0,4950
Erro%	0,02%	0,03%	0,01%	-0,002%	-1,71%	1,69%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Considerando a metodologia proposta na seção 2.5, e um valor de tensão mínima para o sistema de  $\underline{V} = 0,9 \text{ p.u.}$  foi possível estimar outro valor para a magnitude mínima de tensão de  $0,9106 \text{ p.u.}$  e para os ângulos de fases máximo e mínimo variando entre  $0,5259$  e  $-0,5187$  graus respectivamente, para o sistema. A Tabela 8 mostra os principais resultados obtidos com o método proposto considerando os resultados acima mencionado, após resolver o sistema de equações mostrado em 2.5. Note que o erro máximo percentual das perdas de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que  $0,1\%$ , o que pode ser considerado significativamente pequeno.

**Tabela 8** - Resultados do sistema teste de 33 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 33nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	202,5498	4,61175	0,07860	0,91314	0,4965	-0,4954
FC	202,6771	4,61282	0,07867	0,91309	0,4955	-0,4950
Erro%	0,06%	0,02%	0,08%	-0,005%	-0,20%	0,08%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Na seção 2.6, é possível encontrar menores erros percentuais usando uma fase de correção, esta fase de correção se baseia na derivada parcial das equações da corrente de demanda em função das partes real e imaginária da tensão, obtido no ponto de operação da fase anterior.

A Tabela 9 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é igual a zero, mostrando que a metodologia proposta calculou o ponto de operação do sistema com a mesma precisão de métodos já existente.

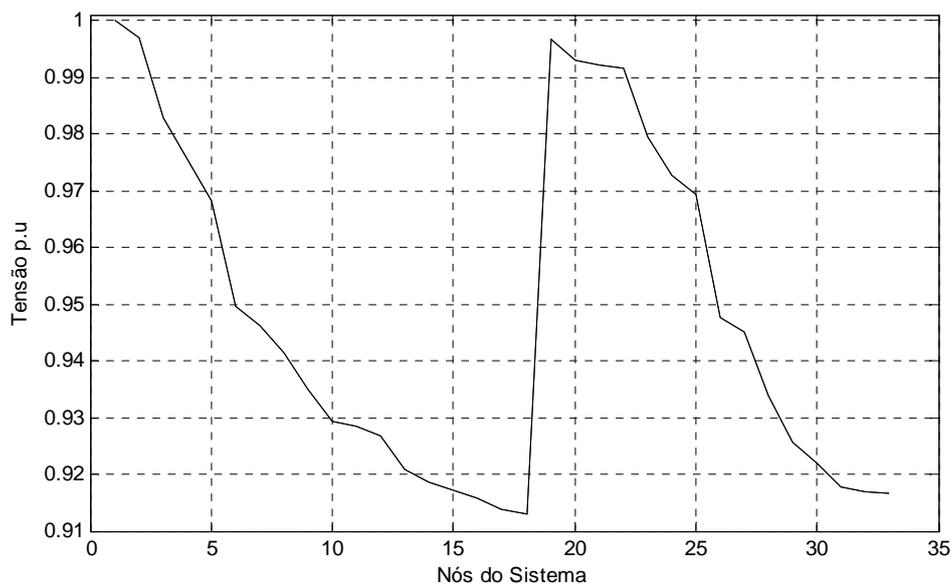
**Tabela 9** - Resultados do sistema teste de 33 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 33nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	202,6771	4,61282	0,07867	0,91309	0,4955	-0,4950
FC	202,6771	4,61282	0,07867	0,91309	0,4955	-0,4950
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A Figura 7 mostra o perfil da magnitude de tensão obtido com o MP, para o sistema de 33 nós.

**Figura 7** - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 33 nós



Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 3.2 SISTEMA TESTE DE 70 NÓS RADIAL

Os dados do sistema de teste 70 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição radial com 70 nós, sendo o nó 1 o nó de geração, tensão base de 12,66 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema vem sendo utilizado por engenheiros pesquisadores na maioria dos trabalhos desenvolvidos nas pesquisas envolvendo vários setores da engenharia elétrica, isto devido sua ótima característica de conver-

gência e por apresentar perdas de potência ativa relativamente baixa. Ele foi utilizado por Hsiao-Dong Chiang e Renk Jean-Jumeau como sistema teste em 1990.

Na tabela 10 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 70 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (assumindo as condições típicas de operação do SDEE, como mostrado na seção 2.4). O erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão é menor que 0,03%; e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 1%.

**Tabela 10** - Resultados do sistema teste de 70 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 70 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	20,9549	1,4436	0,00151	0,97194	0,4011	-0,0369
FC	20,9370	1,4441	0,00151	0,97197	0,4042	-0,0366
Erro%	-0,08%	0,03%	0,00%	0,003%	0,76%	-0,81%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Como mostrado na seção 2.5, e considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $\underline{V}=0,9$  p.u. é possível estimar um novo valor para a magnitude de tensão mínima de 0,9697 p.u. e para os ângulos de fases máximo e mínimo um intervalo variando entre 0,4497 e -0,0407 graus respectivamente, para o sistema. A Tabela 11 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como mostrado na seção 2.5. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,2%, o que pode ser considerado significativamente pequeno, o que permite afirmar que o modelo proposto apresenta uma boa precisão quando comparado com a métodos já existentes na literatura.

**Tabela 11** - Resultados do sistema teste de 70 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 70 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	20,9357	1,4440	0,00151	0,97197	0,4043	-0,0366
FC	20,9370	1,4441	0,00151	0,97197	0,4042	-0,0366
Erro%	0,006%	0,006%	0,00%	0,00%	-0,02%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Considerando a metodologia mostrada na seção 2.6, é possível obter menores erros percentuais usando uma fase de correção, ou seja, usando o ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 12 mostra os principais resultados obtido com o método proposto considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero, isto indica que a metodologia apresentada neste trabalho calculou o ponto de operação do sistema com a mesma precisão e eficiência do método com o qual está sendo comparado.

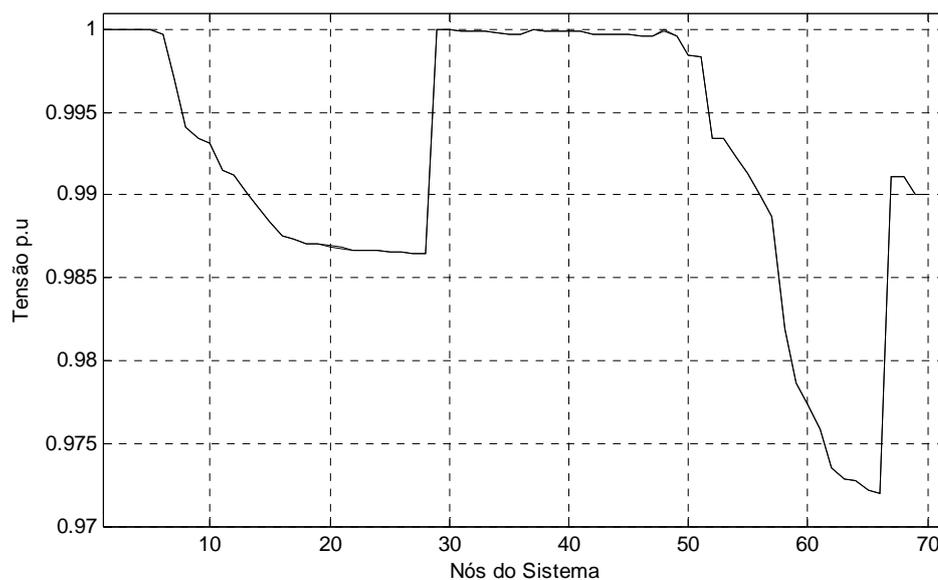
**Tabela 12** - Resultados do sistema teste de 70 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 70 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	20,9370	1,4441	0,00151	0,97197	0,4042	-0,0366
FC	20,9370	1,4441	0,00151	0,97197	0,4042	-0,0366
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A figura 8 mostra o perfil de tensão utilizando o modelo proposto para o sistema de 70 nós.

**Figura 8** - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 70 nós



Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 3.3 SISTEMA TESTE DE 136 NÓS RADIAL

Os dados do sistema teste de 136 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema possui uma tensão nominal de 13,8 kV e potência base 1000 kVA e o nó 1 sendo o nó de geração, este sistema foi testado por Mantovani, Casari e Romero (2000).

Na tabela 13 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 136 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus (considerando as condições típicas de operação para um sistema de distribuição de energia elétrica, como mostrado na seção 2.4). Observa que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 1%.

**Tabela 13** - Resultados do sistema teste de 136 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 136 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	319,7117	3,4282	0,000	0,93078	0,000	-3,4015
FC	320,2664	3,4293	0,000	0,93073	0,000	-3,3998
Erro%	0,17%	0,03%	0,00%	-0,005%	0,00%	-0,05%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Como mostrado na seção 2.5 e considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $V = 0,9 p.u.$  é possível estimar a magnitude de tensão mínima de 0,9316 p.u. e os ângulos de fases máximo e mínimo de 0,000 e -3,7927 graus respectivamente, para o sistema. A Tabela 14 mostra os principais resultados obtidos com a metodologia proposta considerando os resultados acima mencionados, como mostrado na seção 2.5. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,03%, o que pode ser considerado significativamente pequeno.

**Tabela 14** - Resultados do sistema teste de 136 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 136 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	320,2131	3,4281	0,000	0,93083	0,000	-3,4042
FC	320,2664	3,4293	0,000	0,93073	0,000	-3,3998
Erro%	0,01%	0,03%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,12%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

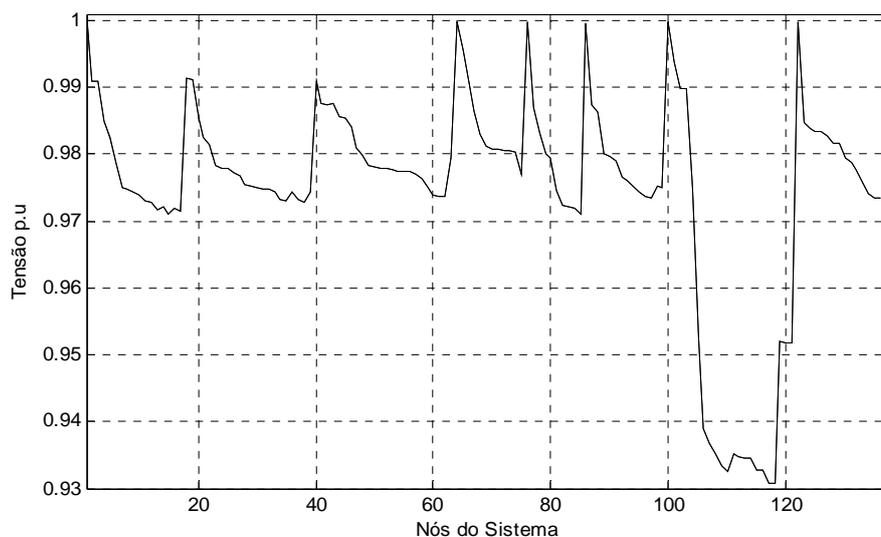
Como mostrado na seção 2.6, é possível obter menores erros percentuais usando uma fase de correção, ou seja, usando o ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 15 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero.

**Tabela 15** - Resultados do sistema teste de 136 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 136 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	320,2664	3,4293	0,000	0,93073	0,000	-3,3998
FC	320,2664	3,4293	0,000	0,93073	0,000	-3,3998
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A Figura 9 mostra o perfil de tensão do sistema de 136 nós utilizando o método proposto.

**Figura 9** - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 136 nós

**Fonte:** Dados da pesquisa do autor

### 3.4 SISTEMA TESTE DE 202 NÓS RADIAL

Os dados do sistema de teste 202 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema possui uma tensão nominal de 13,8 kV e potência base 1000 kVA e o nó 1 sendo o nó de geração este sistema foi utilizado por Castro (1985).

Na tabela 16 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 202 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, ou seja, (considerando as condições típicas de operação para um sistema de distribuição, como foi mostrado na seção 2.4). Assim é possível observar que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,2%.

**Tabela 16** - Resultados do sistema teste de 202 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
202 nós						
MP	551,2155	12,5492	0,00	0,95716	0,00	-1,7057
FC	552,0074	12,5583	0,00	0,95713	0,00	-1,7063
Erro%	0,14%	0,07%	0,00%	-0,003%	0,00%	0,03%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Como mostrado na seção 2.5 e considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $\underline{V} = 0,9 \text{ p.u.}$  é possível estimar a magnitude de tensão mínima de  $0,9549 \text{ p.u.}$  e os ângulos de fases máximo e mínimo de  $0,000$  e  $-1,9002$  graus, respectivamente, para o sistema. A Tabela 17 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, de acordo como foi mostrado na seção 2.5. Note-se que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que  $0,01\%$ , o que pode ser considerado significativamente pequeno, ou seja o modelo proposto apresentou uma boa precisão nos resultados quando comparado com método já existente na literatura.

**Tabela 17** - Resultados do sistema teste de 202 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 202 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	551,9533	12,5578	0,00	0,95714	0,00	-1,7069
FC	552,0074	12,5583	0,00	0,95713	0,00	-1,7063
Erro%	0,009%	0,003%	0,00%	-0,001%	0,00%	-0,035%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Na seção 2.6 foi mostrado que é possível obter menores erros percentuais usando uma fase de correção, ou seja, usando o ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 18 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero.

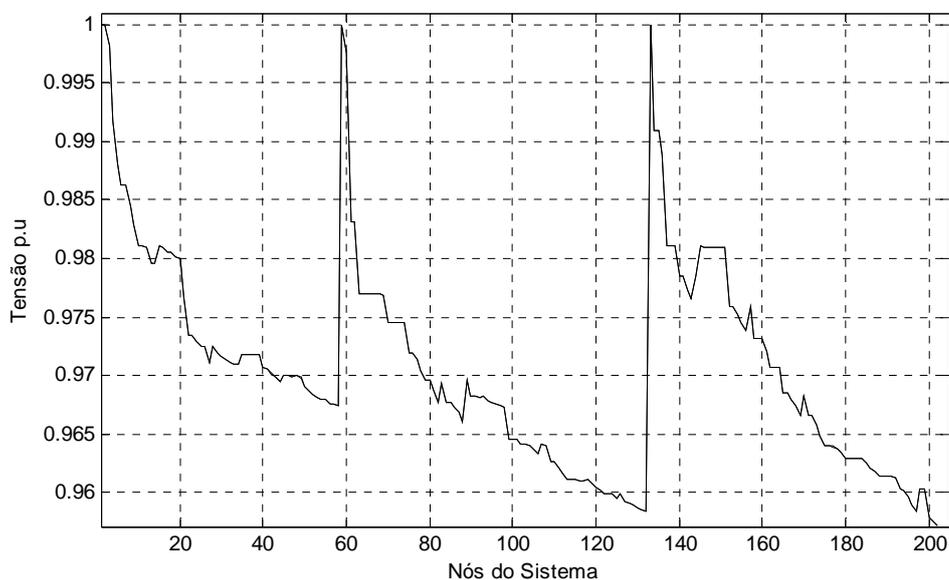
**Tabela 18** - Resultados do sistema teste de 202 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 202 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	552,0074	12,5583	0,00	0,95713	0,00	-1,7063
FC	552,0074	12,5583	0,00	0,95713	0,00	-1,7063
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A Figura 10 representa graficamente o comportamento do perfil de tensão para o sistema de 202 nós utilizando o modelo proposto.

**Figura 10** - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 202 nós



**Fonte:** Dados da pesquisa do autor

### 3.5 SISTEMA TESTE DE 400 NÓS RADIAL

Os dados do sistema de teste 400 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema possui duas características (urbana e rural) possui uma tensão nominal de 11,4 kV e potência base 1000 kVA e o nó 1 sendo o nó de geração, este sistema foi utilizado por Cossi (2008).

Na tabela 19 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 400 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (assumindo as condições típicas de operação para este sistema, como mostrado na seção 2.4). Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 0,01%.

**Tabela 19** - Resultados do sistema teste de 400 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 400 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	148,5767	3,82002	0,000	0,93395	0,33360	0,000
FC	148,3423	3,81791	0,000	0,93401	0,33201	0,000
Erro%	-0,15%	-0,05%	0,00%	0,006%	-0,47%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Como mostrado na seção 2.5 e considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $V = 0,9$  p.u. foi possível estimar a magnitude de tensão mínima de 0,9306 p.u. e os ângulos de fase máximo e mínimo de 0,3695 e 0,000 graus respectivamente, para o sistema. A Tabela 20 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como mostrado na seção 2.5. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,1%, o que pode ser considerado significativamente muito pequeno, com isso pode-se afirmar que o modelo proposto apresenta uma ótima precisão nos resultados quando comparado com um fluxo de carga de varredura.

**Tabela 20** - Resultados do sistema teste de 400 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 400 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	148,3402	3,81811	0,000	0,93401	0,33230	0,000
FC	148,3423	3,81791	0,000	0,93401	0,33201	0,000
Erro%	0,001%	-0,005%	0,00%	0,00%	-0,08%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A partir do novo valor da variação do ângulo de fase verifica-se uma melhora satisfatória se comparado com os valores mostrados na Tabela 19.

Como mostrado na seção 2.6, é possível calcular menores erros percentuais usando uma fase de correção, esta fase de correção se baseia na derivada parcial das equações da corrente de demanda em função das partes real e imaginária da tensão, a qual foi obtida na fase anterior. A Tabela 21 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Observe que o erro máximo percentual da

perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero, o que permite concluir que a metodologia proposta calcula o ponto de operação do sistema com a mesma precisão do fluxo de carga de varredura apresentado na literatura.

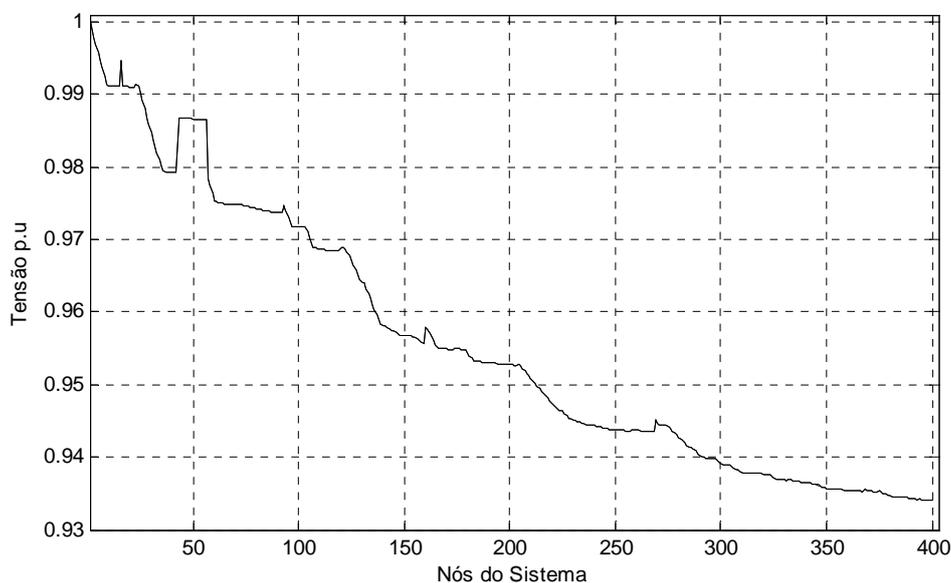
**Tabela 21-** Resultados do sistema teste de 400 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 400 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	148,3423	3,81791	0,000	0,93401	0,33201	0,000
FC	148,3423	3,81791	0,000	0,93401	0,33201	0,000
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A Figura 11 mostra graficamente o perfil de tensão do sistema utilizando o modelo proposto.

**Figura 11** - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 400 nós



Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 3.6 SISTEMA TESTE DE 1080 NÓS RADIAL

Os dados do sistema de teste 1080 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema teste corresponde à uma fase do sistema trifásico de distribuição equilibrado disponível no Laboratório de Planejamento de Sistema de Energia Elétrica (LaPSEE).

Na Tabela 22 são mostrados os resultados calculados com o sistema teste de 1080 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (considerando as condições típicas de operação do sistema de distribuição, como mostrado na seção 2.4). Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e o erro percentual máximo do ângulo de fase é menor que 0,2%. Isto permite concluir que mesmo para esta condição a metodologia proposta obteve valores consideráveis.

**Tabela 22** - Resultados do sistema teste de 1080 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 1080 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	18,2373	1,5159	0,000	0,97555	0,000	-0,5394
FC	18,2707	1,5175	0,000	0,97551	0,000	-0,5376
Erro%	0,18%	0,10%	0,000%	-0,004%	0,000%	-0,32%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Visando melhorar esta solução foi mostrado na seção 2.5 que, considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $\underline{V} = 0,9 \text{ p.u.}$  é possível estimar a magnitude de tensão mínima de  $0,9734 \text{ p.u.}$  e os ângulos de fases máximo e mínimo de  $0,000$  e  $-0,5998$  graus, respectivamente, para o sistema. A Tabela 23 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como mostrado na seção 2.5. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que  $0,01\%$ , o que pode ser considerado significativamente muito pequeno, assim pode-se afirmar que, o modelo proposto apresenta uma ótima precisão nos resultados quando comparado com um fluxo de carga de varredura.

**Tabela 23** - Resultados do sistema teste de 1080 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 1080 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	18,2709	1,5176	0,000	0,9755	0,000	-0,5377
FC	18,2707	1,5175	0,000	0,9755	0,000	-0,5376
Erro%	-0,001%	-0,001%	0,00%	0,000%	0,000%	-0,011%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Considerando a metodologia mostrada na seção 2.6, é possível reduzir o percentual de erro derivando as equações da demanda de corrente em função da parte real e imaginária da tensão obtida na fase anterior. A Tabela 24 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero. Desta forma pode-se verificar a precisão da metodologia proposta.

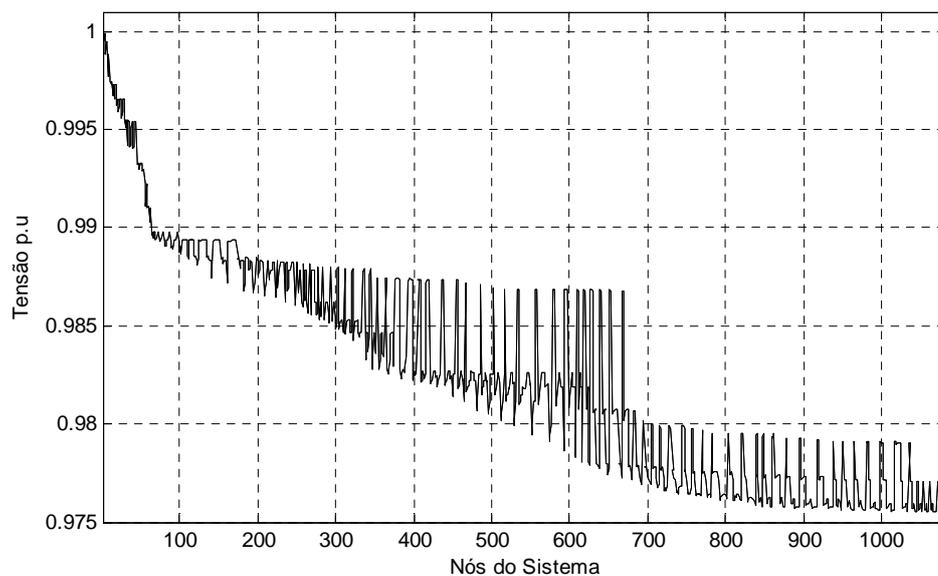
**Tabela 24** - Resultados do sistema teste de 1080 nós usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 1080 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	18,2707	1,5175	0,000	0,9755	0,000	-0,5376
FC	18,2707	1,5175	0,000	0,9755	0,000	-0,5376
Erro%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Nota-se que após fazer uma única vez a fase de correção o resultado encontrado é igual ao encontrado pelo FC de varredura apresentado na literatura.

A Figura 12 mostra o perfil de tensão do sistema teste de 1080 nós utilizando o modelo proposto.

**Figura 12** - Perfil da magnitude de tensão do sistema teste de 1080 nós

**Fonte:** Dados da pesquisa do autor

As Tabelas 7 – 24 mostram testes utilizando sistemas de distribuição radiais considerando três fases de cálculos, a primeira fase foi realizada com uma variação angular de 2 à -6 graus, na segunda fase foi fixada uma tensão mínima de  $V = 0,9 \text{ p.u.}$  para todos os nós do sistema e assim obteve um novo intervalo de variação para o ângulo de fase máximo e mínimo, onde esta variação depende de cada sistema testado, na terceira fase fez-se uma fase de correção fazendo a derivada parcial das equações (56) e (57) e resolvendo o novo conjunto de equações a partir do ultimo ponto de operação foi encontrado outros valores para o sistema, obtendo assim uma melhora significativa. Assim pode-se afirmar que o método proposto com a fase de correção encontrou com a mesma precisão os valores do FC.

### 3.7 SISTEMA TESTE DE 33 NÓS MALHADO

Nesta subseção será usado para os testes, sistemas de distribuição fracamente malhados utilizando a metodologia proposta neste trabalho, e será comparado com um fluxo de carga de Newton-Raphson.

Os dados do sistema de teste 33 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição malhado com 33 nós, e 37 circuitos em que cinco destes são de interconexão, sendo o nó 1 o nó de geração, tensão nominal de 12,66 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema é muito utilizado por pesquisadores em grande parte

dos trabalhos desenvolvidos na engenharia elétrica como teste para reconfiguração por ser um sistema pequeno e de fácil visualização. Este sistema foi usado por Baran e Wu (1989).

Na Tabela 25 são mostrados os resultados calculados com o sistema teste malhado de 33 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (considerando as condições de operação para este sistema, como mostrado na seção 2.4). É possível observar que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e o erro percentual máximo do ângulo de fase é menor que 2%.

**Tabela 25** - Resultados do sistema teste de 33 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 33 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	123,3705	4,5211	0,0325	0,95326	0,05858	-0,24303
FC NR	123,2908	4,5204	0,0325	0,95328	0,05976	-0,24106
Erro%	-0,064%	-0,015%	0,000%	0,0020%	1,97%	-0,81%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Como mostrado na seção 2.5, e considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $V = 0,9 p.u.$  é possível estimar a magnitude de tensão mínima de  $0,9501 p.u.$  e os ângulos de fases máximo e mínimo de  $0,0614$  e  $-0,2649$  graus, respectivamente, para o sistema. A Tabela 26 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como mostrado na seção 2.5. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,1%, o que pode ser considerado significativamente pequeno, assim pode-se afirmar que, o modelo proposto apresenta uma ótima precisão nos resultados quando comparados com um fluxo de carga de Newton-Raphson.

**Tabela 26** - Resultados do sistema teste de 33 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 33 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (A)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	123,2902	4,5205	0,0325	0,95328	0,05975	-0,24109
FC NR	123,2908	4,5204	0,0325	0,95328	0,05976	-0,24106
Erro%	0,0004%	-0,0022%	0,000%	0,00%	0,016%	-0,012%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Como mostrado na seção 2.6, é possível reduzir o percentual de erro do sistema usando uma fase de correção, ou seja, usando o ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 27 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero, o que permite dizer que a metodologia proposta calcula o ponto de operação do sistema com a mesma precisão do fluxo de carga de Newton-Raphson.

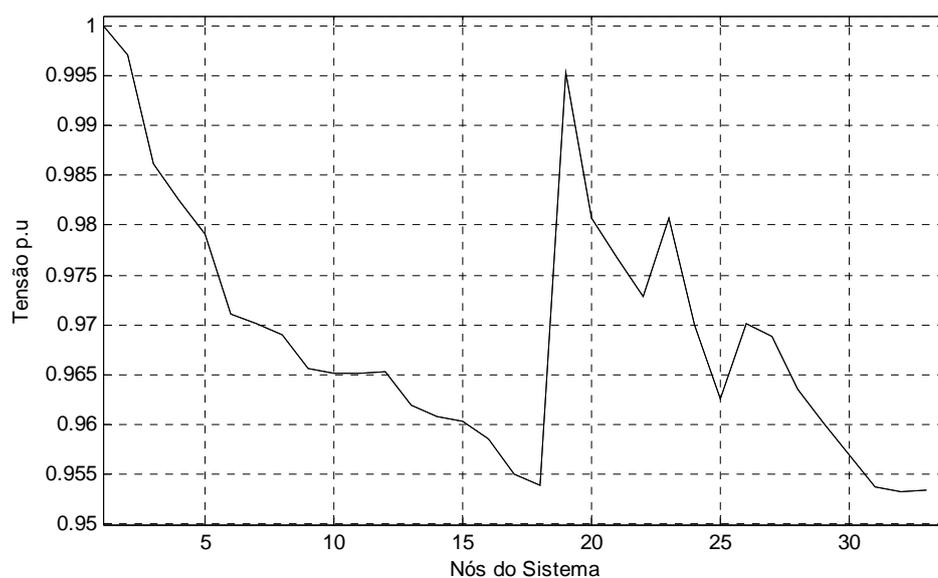
**Tabela 27** - Resultados do sistema teste de 33 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 33 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	123,2908	4,5404	0,0325	0,95328	0,05976	-0,24106
FC NR	123,2908	4,5204	0,0325	0,95328	0,05976	-0,24106
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A figura 13 mostra o perfil de tensão do sistema de 33 nós utilizando o modelo proposto (MP).

**Figura 13** - Perfil de Tensão Sistema 33 Nós malhado



Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 3.8 SISTEMA TESTE DE 70 NÓS MALHADO

Os dados do sistema teste de 70 nós são apresentados no Apêndice A1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição malhado com 70 nós e 74 circuitos, sendo cinco deles circuitos de interconexões, o nó 1 é a subestação, possui uma tensão nominal de 12,66 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema vem sendo utilizado por muitos engenheiros nos setores de pesquisas na maioria dos trabalhos desenvolvidos que envolvendo vários setores da engenharia elétrica e principalmente em sistemas de reconfiguração, isto devido sua ótima característica de convergência e por apresentar perdas de potência ativa relativamente baixa, e foi usado por Hsiao-Dong Chiang e Renk Jean-Jumeau (1990).

Na Tabela 28 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 70 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (assumindo o pior caso de operação para este sistema, como mostrado na seção 2.4). Observa que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão é menor que 0,2% e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 0,1%.

**Tabela 28** - Resultados do sistema teste de 70 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	8,2987	1,43092	0,0015	0,98825	0,01610	-0,06940
FC NR	8,3154	1,43269	0,0015	0,98823	0,01766	-0,06880
Erro%	0,20%	0,12%	0,00%	-0,0020%	8,83%	-0,87%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Visando melhorar esta solução foi mostrado na seção 2.5 que, considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $V = 0,9$  p.u. é possível estimar a magnitude de tensão mínima para o sistema de 0,9871 p.u. e os ângulos de fases máximo e mínimo variando entre 0,0194 e -0,0759 graus respectivamente, para o sistema. A Tabela 29 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como mostrado na seção 2.5. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,01%, o que pode ser considerado significativamente muito pequeno, assim pode-se afirmar que, o modelo proposto apresenta uma ótima precisão nos resultados quando comparados um fluxo de carga de Newton-Raphson.

**Tabela 29** - Resultados do sistema teste de 70 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 70 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	8,3153	1,43268	0,0015	0,98823	0,01766	-0,06880
FC NR	8,3154	1,43269	0,0015	0,98823	0,01766	-0,06880
Erro%	0,0012%	0,0006%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

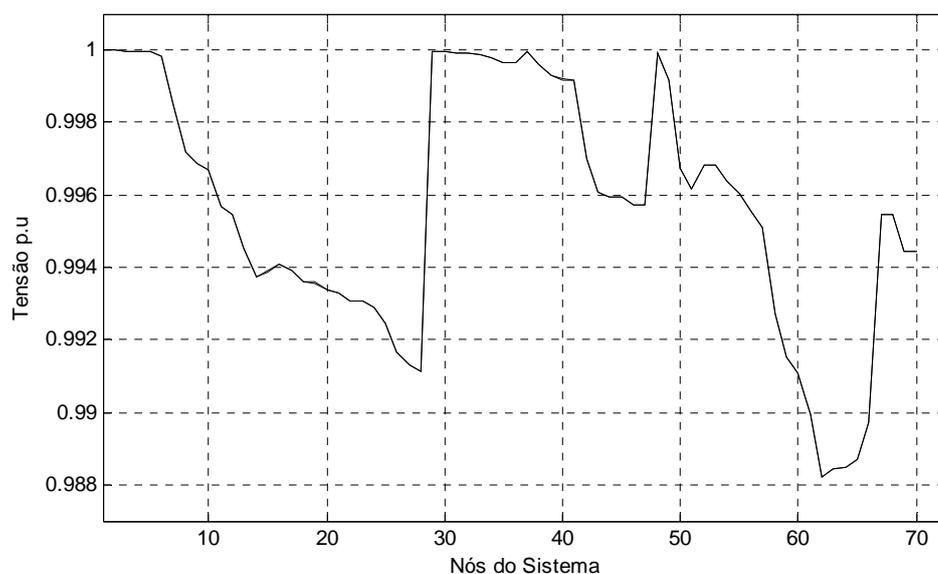
Como mostrado na seção 2.6, é possível reduzir o percentual de erro do sistema usando uma fase de correção, usando valores do ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 30 mostra os principais resultados da metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero, o que permite dizer que a metodologia proposta calcula o ponto de operação do sistema com a mesma precisão do fluxo de carga de Newton-Raphson.

**Tabela 30** - Resultados do sistema teste de 70 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 70 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	8,3154	1,43269	0,0015	0,98823	0,01766	-0,06880
FC NR	8,3154	1,43269	0,0015	0,98823	0,01766	-0,06880
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A figura 14 mostrar o perfil da tensão do sistema malhado de 70 nós utilizando o modelo proposto.

**Figura 14** - Perfil de Tensão Sistema 70 Nós malhado

Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 3.9 SISTEMA TESTE DE 136 NÓS MALHADO

Os dados do sistema de teste 136 nós e 156 circuitos em que 21 desses circuitos são circuitos de interconexões, estes dados são apresentados no apêndice A.1. A tensão nominal do sistema é 13,8 kV, com uma potência base 1000 kVA e o nó 1 sendo o nó de geração.

Na tabela 31 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 136 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (assumindo as condições típicas de operação para um sistema de distribuição, como mostrado na seção 2.4). Observa que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 1%.

**Tabela 31** - Resultados do sistema teste de 136 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
136 nós						
MP	271,1778	3,44459	0,0000	0,96525	0,00	-1,59222
FC NR	271,7812	3,44844	0,0000	0,96519	0,00	-1,59289
Erro%	0,22%	0,11%	0,000%	-0,006%	0,00%	0,042%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Com o objetivo de melhorar esta solução foi mostrado na seção 2.5 que, considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $\underline{V} = 0,9 \text{ p.u.}$  é possível estimar um novo valor para a magnitude de tensão mínima de  $0,9631 \text{ p.u.}$  e os ângulos de fases máximo e mínimo variando entre  $0,000$  e  $-1,7733$  graus respectivamente, para o sistema. A Tabela 32 mostra alguns dos principais resultados obtidos pela metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como foi mostrado na seção 2.5. Observe que o erro máximo percentual encontrado da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que  $0,01\%$ , o que pode ser considerado significativamente pequeno.

**Tabela 32** - Resultados do sistema teste de 136 nó malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 136 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	271,7924	3,44852	0,0000	0,96520	0,00	-1,59322
FC NR	271,7812	3,44844	0,0000	0,96519	0,00	-1,59289
Erro%	-0,0041%	-0,0023%	0,00%	-0,0010%	0,00%	-0,020%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Considerando a metodologia proposta na seção 2.6, é possível diminuir o percentual de erro do sistema usando uma fase de correção, a partir do ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 33 mostra os principais resultados obtidos com a metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Observe que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero, o que permite dizer que a metodologia proposta calcula o ponto de operação do sistema com a mesma precisão do método de Newton-Raphson.

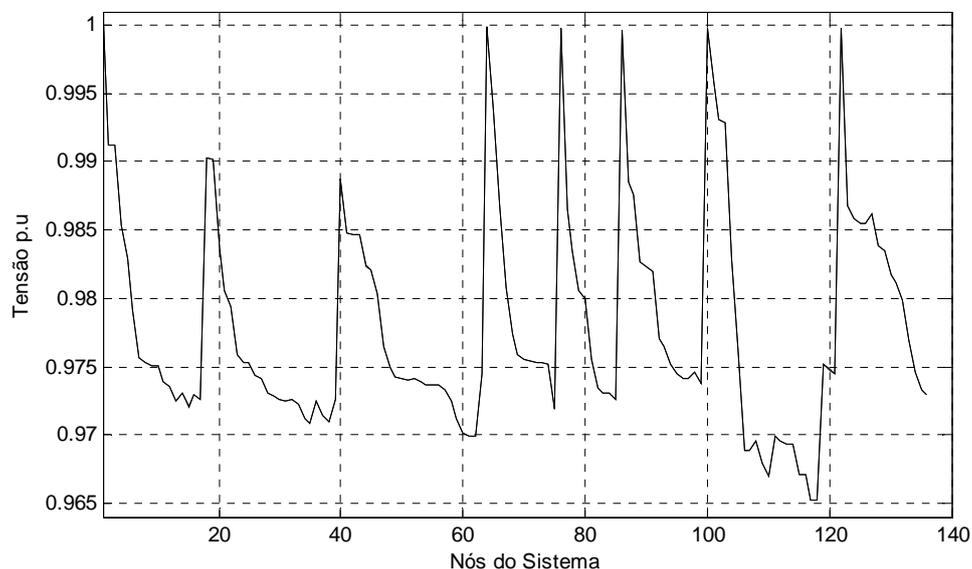
**Tabela 33** - Resultados do sistema teste de 136 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 136 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	271,7812	3,44844	0,0000	0,96519	0,00	-1,59289
FC NR	271,7812	3,44844	0,0000	0,96519	0,00	-1,59289
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A Figura 15 mostra o perfil de tensão do sistema teste 136 nós utilizando o modelo proposto.

**Figura 15** - Perfil de Tensão Sistema 136 Nós malhado



**Fonte:** Dados da pesquisa do autor

### 3.10 SISTEMA TESTE DE 417 NÓS MALHADO

Os dados do sistema teste de 417 nós são apresentados no apêndice A.1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição malhado com 417 nós e 475 circuitos, sendo 59 deles circuito de interconexão, onde o nó 1 é a subestação, este sistema possui uma tensão nominal de 10 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema foi utilizado por Ramires-Rosado e Bernal-Augustin (1998) e recentemente utilizado por Lavorato et al., em 2012, para reconfiguração.

Na Tabela 34 são mostrados os resultados obtidos com o sistema teste de 417 nós considerando uma variação angular de 2 à -6 graus, (assumindo o pior caso de operação para este sistema, como mostrado na seção 2.4). Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente e da magnitude de tensão e o erro máximo percentual do ângulo de fase é menor que 0,01%.

**Tabela 34** - Resultados do sistema teste de 417 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.4

Sistema 417 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	498,3586	3,99121	0,0001	0,96637	0,000	-0,45230
FC NR	498,8140	3,99280	0,0001	0,96635	0,000	-0,44991
Erro%	0,09%	0,03%	0,000%	-0,002%	0,000%	-0,53%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Considerando a metodologia proposta na seção 2.5, e considerando uma tensão mínima para todos os nós do sistema de  $V = 0,9$  p.u. é possível estimar um novo valor para magnitude de tensão mínima igual a 0,9637 p.u. e os ângulos de fases máximo e mínimo variando entre 0,00 e -0,5019 graus respectivamente, para este sistema teste. A Tabela 35 mostra os principais resultados obtidos pela metodologia proposta considerando os resultados acima estimados, como é mostrado na seção 2.5. Observe que o erro máximo percentual encontrado na diferença da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase é menor que 0,01%.

**Tabela 35** - Resultados do sistema teste de 417 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.5

Sistema 417 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	498,8163	3,99286	0,0001	0,96635	0,000	-0,45003
FC NR	498,8140	3,99280	0,0001	0,96635	0,000	-0,44991
Erro%	-0,0004%	-0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	-0,026%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Considerando a metodologia proposta na seção 2.6, é possível diminuir o percentual de erro do sistema usando uma fase de correção, considerando os valores, do ponto de operação obtido na fase anterior. A Tabela 36 mostra os resultados obtidos com a metodologia proposta considerando a fase de correção mostrada na seção 2.6. Note que o erro máximo percentual da perda de potência ativa, da magnitude de corrente, da magnitude de tensão e do ângulo de fase são iguais a zero, note-se que a metodologia proposta calcula o ponto de operação do sistema com a mesma precisão do fluxo de carga de Newton-Raphson.

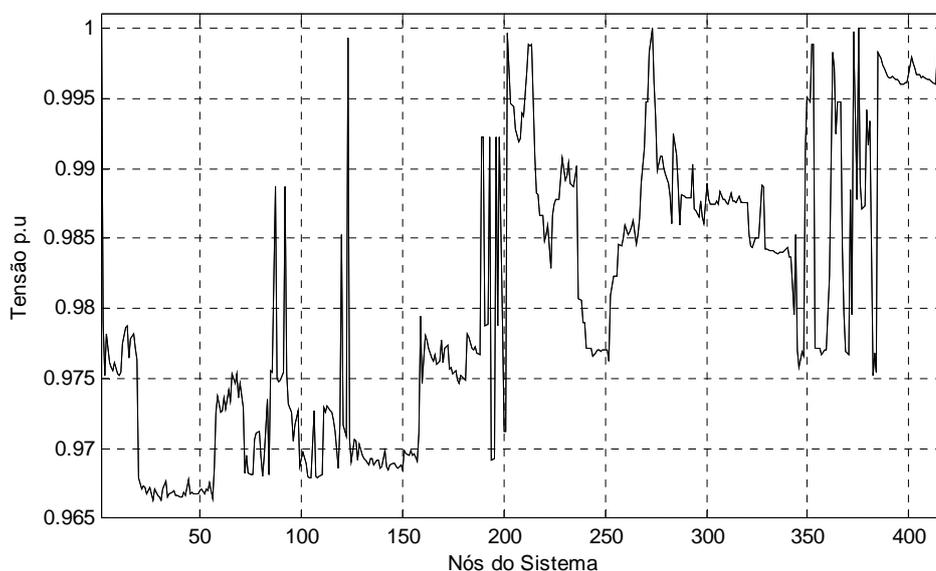
**Tabela 36** - Resultados do sistema teste de 417 nós malhado usando a metodologia mostrada na seção 2.6

Sistema 417 nós	Perda Ativa (kW)	Mag. Corrente (p.u.)		Mag. Tensão (p.u.)	Ângulo de fase (graus)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.
MP	498,8140	3,99280	0,0001	0,96635	0,000	-0,44991
FC NR	498,8140	3,99280	0,0001	0,96635	0,000	-0,44991
Erro%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A Figura 16 mostra o perfil de tensão do sistema de 417 nós utilizando o método proposto.

**Figura 16** - Perfil de tensão do sistema de 417 nós malhado



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Com base nos resultados mostrados nas Tabelas 25 – 36 pode-se concluir que a metodologia proposta pode ser usado tanto para sistemas de distribuição com configuração radial ou fracamente malhado. Demonstrou também muito eficiente para sistema de pequeno e grande porte.

## 4 RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção será apresentada uma técnica de solução baseada em metaheurísticas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metodologia proposta para o cálculo de fluxo de carga apresentada na seção 2.

### 4.1 INTRODUÇÃO

A maioria dos sistemas de distribuição de energia elétrica operam com topologia radial, com o objetivo de coordenar de maneira mais fácil e eficiente sua operação. O SDEE por sua vez possui um número de chaves de interconexão que normalmente permanecem abertas e/ou fechadas para manter a topologia radial do sistema. Neste caso, reconfigurar um SDEE, consiste em encontrar a melhor topologia radial com intuito de melhorar o perfil da magnitude de tensão, o balanceamento de carga, a redução das perdas ativas, e/ou isolamento das faltas.

Merlin e Back (1975), desenvolveram um algoritmo heurístico para encontrar uma topologia radial ótima para o SDEE com mínimas perdas de potência ativa. O método consiste em fechar todas as chaves de interconexões inicialmente, alterando a configuração do SDEE que inicialmente era radial para um sistema malhado. As chaves de interconexões são abertas uma por vez até que uma nova configuração radial seja restabelecida. Neste processo de solução, as chaves são abertas de forma que as perdas de potência ativa sejam mínimas.

Em 1989 uma modificação foi proposta por Baran e Wu, em que utilizava um fluxo de carga ótimo. A técnica aplicada consistia em fechar uma única chave de interconexão por vez formando assim um laço e/ou uma malha. Tendo em conta a condição imposta, o processo de solução prossegue fechando um circuito que estava aberto formando uma malha, neste caso outro circuito deve ser aberto para que a configuração do sistema continua sendo radial, porém o próximo circuito a ser aberto deve ser aquele que possui uma chave de interconexão. O objetivo da metodologia apresentada consiste em reduzir as perdas do sistema e o balanceamento de carga entre os alimentadores.

Outra técnica foi proposta por Goswami e Basu (1992) que utilizaram também um fluxo de carga ótimo para a reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica. A mudança da topologia de uma rede é realizada pela abertura e/ou fechamento de chaves de

interconexões existentes no sistema. Estas alterações normalmente são realizada de tal forma que a radialidade da rede possa ser preservada. Diferente das outras técnicas apresentadas, esta consiste em fechar uma única chave por vez, formando assim um único laço, assim outra chave ou a mesma chave deve ser aberta para manter a radialidade da rede, porém a chave que deve ser aberta, necessariamente deve pertencer a esse mesmo laço. Este processo é repetido até encontrar uma configuração que possui o menor valor para a perda mínima.

Mantovani et al. (2000), propuseram um algoritmo heurístico visando a minimização de perda de potência ativa e o balanceamento de carga nos alimentadores. A heurística desenvolvida se baseia no limite máximo da queda de tensão nos alimentadores. O processo heurístico consiste em fazer uma combinação com as chaves abertas da configuração inicial para que as mesmas possam ser fechadas. A combinação com as chaves abertas inicia uma a uma, depois duas a duas, até  $n_a$  a  $n_a$ , onde  $n_a$  é o número total de chaves abertas existente no sistema. Utilizando uma técnica de troca de ramos, é possível gerar novas configurações, a cada chave que está aberta, quando é fechada gera um novo laço, e cada chave deste laço que é aberta, obtém novas configurações. Quando a combinação das chaves que estão abertas for realizada duas a duas, então se fecham duas chaves que estão abertas formando-se dois novos laços, em seguida deve-se abrir uma chave de cada laço para obter as novas configurações. O processo se repete até que todas as chaves possam ser combinadas  $n_a$  a  $n_a$  de forma que todas as combinações possíveis sejam obtidas.

Oliveira et al. (2009), propuseram um algoritmo para a reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica, que tem como objetivo principal a minimização da perda total de energia considerando diferentes níveis de carregamento. O processo de solução inicia com a rede de forma malhada devido ao fechamento de todas as chaves de interconexão. A partir desta configuração todas as chaves vão sendo abertas de forma sequencial até que uma configuração radial seja encontrada.

## 4.2 PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

Para simplificar e facilitar o trabalho de muitos pesquisadores, foi apresentado de forma simplificada a estrutura de um modelo que de certa forma representa o problema de reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica. Neste caso, a função objetivo que normalmente aparece na literatura é a minimização das perdas de potência ativa do SDEE, sendo assim, o problema de reconfiguração pode ser estabelecido da seguinte forma:

Minimizar: Perdas de potência ativa do SDEE

Sujeito a:

Balço de potência ativa

Balço de potência reativa

Limites da magnitude de tensão

Limites da magnitude de fluxo de corrente

Condição de radialidade do SDEE

Característica binária da operação das chaves

### 4.3 METAHEURÍSTICA

A partir da década de 70 muitos pesquisadores vêm trabalhando com o objetivo de encontrar uma forma de resolver o problema de reconfiguração dos SDEE. Muitos trabalhos são encontrados na literatura atual, e podem ser classificados em dois grupos: a) métodos exatos (algoritmo *branch and bound*, decomposição de Benders, etc.) e b) métodos aproximados (algoritmos heurísticos construtivos e/ou metaheurísticas). Dentre todas as metaheurísticas existentes, uma que vem se destacando nos últimos anos é a metaheurística GRASP, isto devido aos bons resultados apresentados em diversas áreas do conhecimento de origem combinatória.

A metaheurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), que em português quer dizer, Procedimento de Busca Gulosa Adaptativa Aleatória, é necessariamente uma melhoria dos algoritmos heurísticos construtivos. Um algoritmo heurístico construtivo consiste em construir uma solução de ótima qualidade passo a passo usando um indicador de sensibilidade  $\alpha$  (alfa), para sugerir qual é a melhor componente que pode ser inserida na solução. A seleção aleatória desse elemento tem a finalidade de atender a forma gulosa do algoritmo heurístico construtivo. No entanto, a aplicação dessa metodologia permite encontrar várias soluções factíveis e de boa qualidade como mostrado por Oliveira (2011).

Uma maneira de utilizar a metaheurística GRASP para resolver problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, é iniciar o processo de solução do problema partindo de um sistema com configuração inicial malhado, e a cada iteração da fase de construção é desconectado um circuito do sistema conforme indica o fator de sensibilidade  $\alpha$ , como foi apresentado por Merlin e Back (1975). Portanto, o sistema de distribuição de energia elétrica que tinha configuração inicial radial é transformado em um sistema

malhado no qual todas as chaves de interconexões existentes neste sistema são fechadas. Sendo assim, a metaheurística GRASP na fase construtiva tem como característica uma abordagem destrutiva, ou seja, a cada passo um circuito é desconectado do sistema até que o sistema que inicialmente era malhado se transforme novamente em um sistema radial e conexo. O índice de sensibilidade selecionado para a solução é o menor valor do fluxo de corrente nos circuitos do sistema de distribuição de energia elétrica. A escolha deste índice de sensibilidade consiste em diminuir o grau de perturbações experimentais na distribuição dos fluxos.

Após terminar a fase construtiva do algoritmo é realizada uma fase de busca local na solução fornecida pela fase construtiva do GRASP. A solução encontrada pela fase construtiva é factível e de boa qualidade, neste caso, procura-se melhorá-la através de um algoritmo de otimização local, o qual consiste em fazer uma busca sistematizada com o intuito de encontrar uma solução que seja factível e de melhor qualidade que a solução fornecida pela fase construtiva do GRASP. Este algoritmo faz uma verificação na vizinhança que esta próxima da solução fornecida pela fase construtiva obtida de forma iterativa em busca de uma melhor solução dentro desta vizinhança. É importante ressaltar que, deve se ter uma estrutura de vizinhança adequada, ou seja, uma solução inicial factível e de boa qualidade e técnicas de busca eficientes. (OLIVEIRA, 2011).

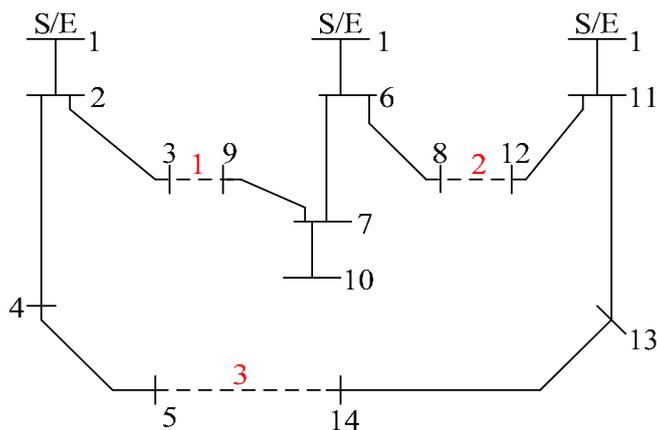
#### 4.3.1 Fase construtiva

Nesta fase do processo de solução é realizada a leitura dos dados de entrada do sistema teste, onde são definidos o conjunto solução e a solução incumbente do problema que serão usados para iniciar o processo de solução. Para o princípio da resolução do problema de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica é preciso calcular os fluxos de corrente nos circuitos do sistema. Para calcular os fluxos de corrente em cada circuito do sistema foi utilizado a metodologia apresentada na seção 2.4, 2.5 e 2.6 deste trabalho. No qual encontra-se o conjunto de parâmetros  $(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i)$  e todas as outras características elétricas do sistema, e estes dados são constantes, então eles serão calculados uma única vez. Portanto é resolvido um sistema de equações lineares para encontrar o fluxo de corrente de cada circuito  $ij$ . Estes fluxos de corrente nos circuitos do sistema de distribuição de energia elétrica são os indicadores de sensibilidade que deve identificar qual o circuito que deve ser desconectado do sistema.

Na fase construtiva do algoritmo GRASP foi utilizado o algoritmo heurístico apresentado por Merlin e Back (1975). Como mostrado anteriormente, a heurística é iniciada com todas as chaves seccionadoras do sistema de distribuição fechadas, transformando-o em um sistema com topologia malhada. De acordo com a topologia apresentada, são averiguados quais os circuitos que não devem ser desconectados do sistema, os quais poderiam causar ilhamento no sistema elétrico. Em seguida, é calculado o fluxo de corrente de cada circuito, e desta forma, a cada circuito que for retirado é preciso calcular um novo fluxo de carga para atualizar a lista de circuitos candidatos a serem retirados. Nesta fase é calculado somente o sistema de equações lineares apresentado na seção 2.5. Somente no final de cada iteração da fase construtiva do GRASP é que se resolve o sistema de equações lineares apresentado na seção 2.6 que tem como finalidade corrigir um erro existente no processo de linearização da metodologia apresentada.

A forma usada pela heurística de Merlin e Back (1975), para escolher qual circuito que deve ser retirado do sistema, foi o que possuir o menor valor de fluxo de potência aparente. Quando a heurística de Merlin e Back (1975) é aplicada na metaheurística GRASP, a mesma passa por uma pequena modificação no que diz respeito à forma de escolher qual dos circuitos que deverão ser desconectados do sistema, pois na metaheurística é criada uma lista de circuitos candidatos que não possuem nenhum impedimento de serem retirados, e um destes é escolhido de forma aleatória. A construção desta lista é baseada em um valor percentual dos circuitos que podem ser retirados do sistema e que possuem um menor valor de fluxo de corrente. Para todos os sistemas testados foi criada uma lista crescente com 8% dos circuitos que podem ser retirados do sistema, estes circuitos são os que possuem o menor fluxo de corrente do sistema. Para demonstra a eficiência da fase construtiva será apresentado os resultados desta fase para o sistema de 14 nós.

A Figura 17 mostra a topologia inicial do sistema de 14 nós.

**Figura 17-** Sistema teste 14 nós com configuração inicial

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Os circuitos 1, 2 e 3 são as chaves de interconexão que normalmente são abertas.

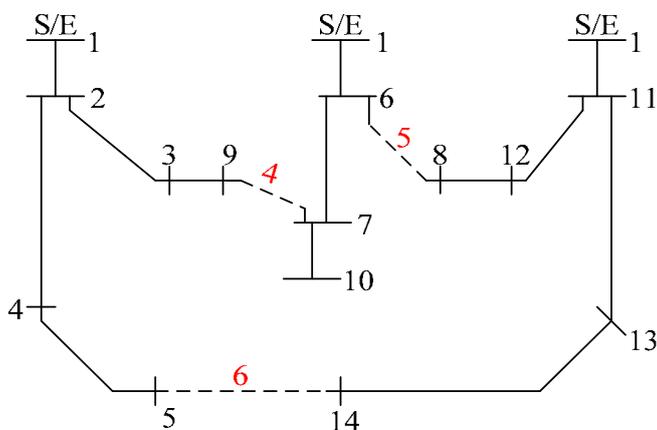
A tabela 37 mostra os resultados obtidos com a fase construtiva do grasp.

**Tabela 37** - Resultados do sistema teste de 14 nós com a fase construtiva do GRASP

Sistema 14 nós	Chaves abertas	Perda (kW)
MP, c/a fase construtiva do GRASP	6 – 8, 7 – 9, 5 - 14	466,13

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A nova configuração obtida para os valores mostrados nesta fase é mostrada na Figura 18.

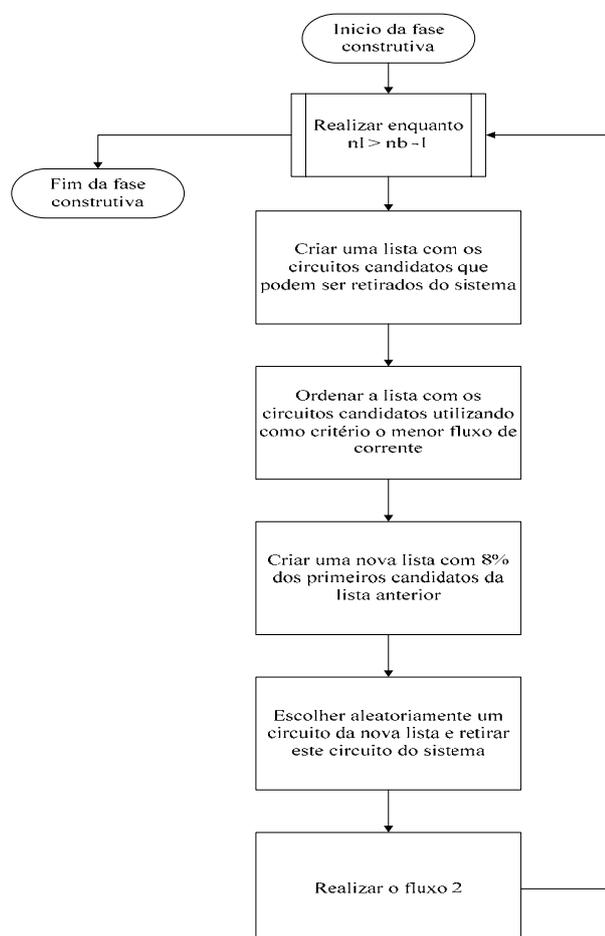
**Figura 18-** Sistema teste 14 nós com a nova configuração

Fonte: Dados da pesquisa do autor

As chaves 4, 5 e 6 são os novos circuitos desconectados do sistema.

Os resultados apresentados acima mostram a eficiência do método proposto na fase construtiva do GRASP.

**Figura 19** - Fluxograma da fase construtiva do GRASP



**Fonte:** Elaboração do próprio autor.

Esta figura representa de forma esquemática a estrutura de implementação da fase construtiva do GRASP.

#### 4.3.2 Fase de busca local

A fase de busca local do GRASP, tem como objetivo refinar a solução encontrada na fase construtiva utilizando uma fase de busca local. Isso quer dizer que, na solução encontrada na fase anterior é feita uma intensa exploração nas regiões vizinhas através da busca local, se uma melhora for encontrada, então a solução é atualizada, e a vizinhança da nova solução continua sendo analisada até que nenhuma melhora seja encontrada, Freddo e Brito (2012). Portanto, na fase de melhoria local consideram-se os circuitos que ficaram

desconexo do sistema na fase construtiva como conectados e uma busca é realizada pelos circuitos que precisam ser desconectados para que o sistema volte a ser radial é feita nos laços composto por estes circuitos. A cada laço é realizada a heurística de busca apresentada por Carreño, Moreira e Romero (2007). A fase de melhoria local é organizada da seguinte forma:

- 1 Inserir no sistema um dos circuitos que foram desconectados na fase construtiva, e identificar o laço constituído por este circuito.
- 2 Desconectar um ramo que está diretamente conectado ao circuito que foi inserido no sistema;
- 3 Calcular as perda ativa da nova configuração encontrada e comparar com o valor da incumbente, se o novo valor encontrado for menor, atualizar a incumbente e a configuração do sistema, e ir para o próximo passo, caso contrário voltar ao passo anterior;
- 4 Inserir o último circuito que foi retirado e retirar o próximo circuito que está diretamente interligado ao circuito introduzido e voltar ao passo anterior. Se todos os circuitos do laço já foram removidos, voltar ao primeiro item.

Repetir estes itens até que todos os laços do sistema tenham sido avaliados. Na fase de busca local é calculado o valor da incumbente realizando o cálculo do fluxo de carga usando o sistema de equações lineares apresentado na secção 2.6. É utilizado este sistema de equações lineares porque a diferença da perda ativa entre as topologias encontradas são pequenas, o que necessariamente permite encontrar soluções de ótima qualidade.

Para demonstrar a precisão da fase de busca local, agora junto com a fase construtiva é realizado um teste para o sistema de 14 nós, os resultados obtidos se encontra na tabela 38.

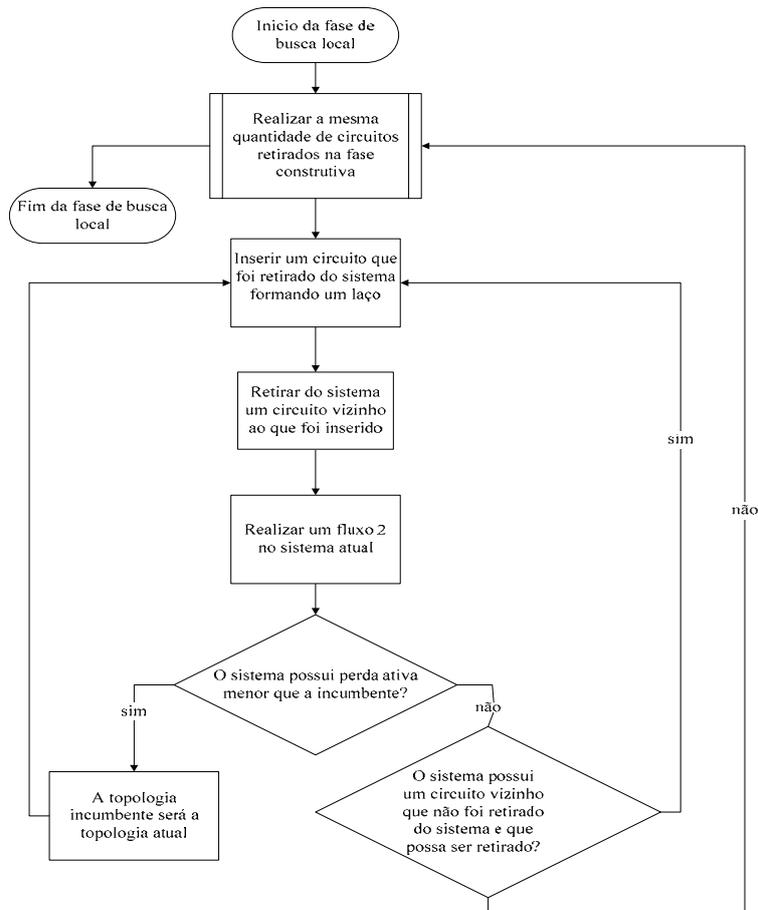
**Tabela 38** - Resultados do sistema teste de 14 nós com a metaheurística GRASP

Sistema 14 nós	Chaves abertas	Perda (kW)
MP c/ metaheurística GRASP	6 – 8, 7 – 9, 5 - 14	466,13

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Os valor da perda de potência ativa e as chaves que foram desconectadas são as mesmas para as duas fases da metaheurística GRASP.

**Figura 20** - Fluxograma da fase de busca local do GRASP



**Fonte:** Elaboração do próprio autor

## 5 TESTES E RESULTADOS

Nesta subseção será usado para os testes, os sistemas de distribuição de 33, 70, 136 e 417 nós fracamente malhados utilizando a metodologia proposta neste trabalho como ferramenta principal na reconfiguração destes sistemas.

### 5.1 SISTEMA TESTE DE 33 NÓS MALHADO

Os dados do sistema de teste 33 nós são apresentados no apêndice A.1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição malhado com 33 nós, e 37 circuitos em que cinco destes são de interconexão, sendo o nó 1 o nó de geração, a tensão nominal do sistema é de 12,66 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema é muito utilizado por pesquisadores em grande parte dos trabalhos desenvolvidos na engenharia elétrica como teste para reconfiguração por ser um sistema pequeno e de fácil visualização. Este sistema foi usado por Baran e Wu (1989).

A tabela 39 mostra a configuração apresentada na literatura e a configuração obtida utilizando a metodologia proposta. Note que a metodologia proposta encontrou a melhor solução apresentada na literatura.

**Tabela 39** - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual

Sistemas 33 nós	Chaves abertas	Perda ativa (kW)
MP	7-8, 9-10, 14-15, 25-29, 32-33	139,55
Lavorato, M.; Franco, J. F	7-8, 9-10, 14-15, 25-29, 32-33	139,55

Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 5.2 SISTEMA TESTE DE 70 NÓS MALHADO

Os dados do sistema teste de 70 nós são apresentados no apêndice A.1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição malhado com 70 nós e 74 circuitos, sendo cinco deles circuitos de interconexão, onde o nó 1 é a subestação, possui uma tensão nominal de 12,66 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema vem sendo utilizado por engenheiros pesquisadores na maioria dos trabalhos desenvolvidos nas pesquisas envolvendo vários setores da engenharia elétrica e principalmente em sistemas de reconfiguração. Em 1990, Hsiao-Dong Chiang e René Jean-Jumeau utilizaram como sistema teste.

A tabela 40 mostra a melhor solução para a configuração apresentada na literatura e a configuração obtida utilizando a metodologia proposta. Note que a metodologia proposta encontrou a melhor solução apresentada na literatura. Apesar de ter perdas ativas diferentes, a topologia encontrada possui a mesma precisão do fluxo de carga apresentado na literatura.

**Tabela 40** - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual

Sistemas 70 nós	Chaves abertas	Perda ativa (kW)
MP	12-44, 14-22, 15-16, 59-60, 62-63	9,41
Mantovani, J. R. S., et al	12-44, 14-22, 15-16, 59-60, 62-63	9,34

Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 5.3 SISTEMA TESTE DE 136 NÓS MALHADO

Os dados do sistema teste de 136 nós e 156 circuitos em que 21 desses circuitos são chaves de interconexão, este dados são apresentados no apêndice A.1. A tensão nominal de 13,8 kV e potência base 1000 kVA e o nó 1 sendo o nó de geração.

A tabela 41 mostra a configuração encontrada utilizando a metodologia proposta e a melhor configuração apresentada na literatura. Note que a metodologia proposta encontrou a melhor solução apresentada na literatura. Apesar de ter perdas ativas diferentes, a topologia encontrada é a mesma.

**Tabela 41** - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual

Sistemas 136 nós	Chaves abertas	Perda ativa (kW)
MP	7-8, 10-25,96-97, 56-99, 32-36, 85-136, 93-105,51-97, 105-119, 129-78, 16-84, 49-52,126-127,135-136, 91-130, 80-132, 106-107,67-80,90-91, 92-105, 93-133	280,13
Carreno, E. M, ET al	7-8, 10-25,96-97, 56-99, 32-36, 85-136, 93-105,51-97, 105-119, 129-78, 16-84, 49-52,126-127,135-136, 91-130, 80-132, 106-107, 67-80,90-91, 92-105, 93-133	280,16

Fonte: Dados da pesquisa do autor

### 5.4 SISTEMA TESTE DE 417 NÓS MALHADO

Os dados do sistema teste de 417 nós são apresentados no apêndice A.1. Este sistema teste corresponde a um sistema de distribuição malhado com 417 nós e 475 circuitos, sendo 59 deles circuito de interconexão, onde o nó 1 é a subestação, possui uma tensão no-

minal de 10 kV e potência base 1000 kVA. Este sistema foi utilizado por Ramires-Rosado e Bernal-Augustin (1998) e recentemente utilizado por Lavorato et al. em 2012 para reconfiguração.

A tabela 42 mostra os resultados da reconfiguração utilizando a método proposto e a reconfiguração apresentada por Oliveira (2012).

**Tabela 42** - Análise comparativa da metodologia proposta e a literatura atual

Sistemas 417 nós	Chaves abertas	Perda ativa (kW)
Resultado encontrado com o (MP)	3 – 10, 7 – 3, 20 – 33, 21 – 49, 21 – 57, 24 – 29, 38 – 41,40 – 47, 46 – 50, 49 – 39,58 – 20, 66 – 252, 69 – 65; 75 – 81, 77 – 78, 84 – 99, 89 – 77, 95 – 112, 105 – 108, 107 – 103, 133 – 140, 138 – 155, 143 – 150, 144 -148,146 – 149, 147 – 150, 153 – 141, 160 – 129, 160 – 180, 160 – 181, 173 – 179, 202 – 1, 221 – 220, 230 – 228, 234 – 233, 257 – 259, 260 – 324, 265 – 266, 275 – 209, 281 – 235,281 – 282, 292 – 290,293-236, 296 – 295, 303 – 304, 304 – 306, 305 – 308; 310 – 305, 310 – 315, 311 – 304, 314 – 317, 319 – 318, 323 – 322, 334 – 336, 338 – 339, 359- 251,369 – 370, 381 – 268, 382 – 66 e 384 – 68.	584,20
Oliveira, M. B. C	3 – 10, 7 – 3, 15 – 11, 20 – 33, 21 – 49, 21 – 57, 27 – 31, 34 – 47, 43 – 48, 46 – 42, 49 – 45, 58 – 20, 58 – 62, 66 – 384, 68 – 85, 75 - 81, 77 – 59, 84 - 99, 95 – 112, 105 – 108, 107 – 103, 129 – 346, 133 – 140, 135 – 145, 136 – 132, 137 – 144, 138 – 155, 143 – 150, 160 – 181, 165 – 173, 179 – 160, 202 – 1, 221 – 220, 230 – 228, 234 – 233, 243 – 249, 257 – 259, 260 – 324, 265 – 266, 275 – 209, 281 – 235, 281 – 282, 383 – 370, 290 – 289, 293 – 236, 296 – 295, 303 – 304, 304 – 306, 305 – 308, 310 – 315, 310 – 305, 311 – 304, 314 – 317, 319 – 318, 323 – 322, 334 – 336, 336 – 337, 381 – 268 e 382 – 66.	581,57

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Para este sistema teste a metodologia proposta encontrou uma solução diferente quando comparada com uma solução apresentada por Oliveira (2011), porém outros testes serão feitos com o objetivo de encontrar soluções melhores.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um fluxo de carga não-iterativo para calcular o estado de operação de um sistema de distribuição de energia elétrica radial ou malhado utilizando três sistemas de equações lineares. No fluxo de carga proposto, as correntes de demandas do sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) foram modeladas através de aproximações lineares em termos das partes real e imaginária da magnitude de tensão, a partir dos coeficientes obtidos usando o método de mínimos quadrados. Estas aproximações só podem ser feitas porque os ângulos de fase das tensões do sistema de distribuição se mantêm dentro de um intervalo relativamente pequeno e limitado, entre -6 a 2 graus, para as condições típicas de operação do SDEE. O fluxo de carga proposto está composto por três fases. O objetivo da Fase 1 é estimar a magnitude de tensão mínima e o ângulo máximo e mínimo de fase das tensões do sistema, considerando o pior cenário de operação do sistema. Observou-se que o ponto de operação obtido na Fase 1 tem erros percentuais aceitáveis. Na Fase 2 é calculado um ponto de operação em regime permanente considerando uma tensão mínima de  $0,9 p.u.$  para todos os nós do sistema, obtendo assim um erro percentual menor comparado com o da Fase 1. Na Fase 3 é realizada uma correção do ponto de operação obtido na Fase 2 o qual permite calcular o ponto de operação em regime permanente do sistema com a mesma precisão e eficiência dos métodos que estão disponíveis na literatura.

O fluxo de carga desenvolvido foi implementado na linguagem de programação MATLAB 7.9.0 (R2009a) e testado usando diferentes sistemas de distribuição de energia elétrica de pequeno e grande porte. A partir dos resultados das perdas de potência ativa, magnitude de tensão, magnitude do fluxo de corrente e ângulo de fase observou-se a eficiência e precisão do fluxo de carga proposto quando comparado com os métodos de fluxo de carga existentes na literatura.

Usando a rapidez e eficiência do fluxo de carga proposto, foi resolvido o problema de reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica com o auxílio da metaheurística GRASP. O objetivo de mostrar que o fluxo de carga proposto pode ser utilizado para resolver outros problemas típicos de sistema de distribuição de energia elétrica.

Uma sugestão para trabalhos futuros onde o fluxo de carga proposto pode ser utilizado são:

- Alocação ótima de regulados de tensão.

- Alocação ótima de banco de capacitores.
- Planejamento de sistema de distribuição de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989.
- BERG, R.; HAWKENS, E. S.; PLEINES, W. W. Mechanized calculation of unbalanced load flow on radial distribution circuits. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v.86, n.4, p.415 – 421, 1967.
- BRANDINI, A. C. **Análise crítica de algoritmos de fluxo de carga usados em sistemas de distribuição radial**. 2000. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2000.
- CARRENO, E. M.; MOREIRA, N.; ROMERO, R. A. L. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2007, Tampa Florida. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2007. 6 p.
- CASTRO, C. A. **Reconfiguração automática de redes de distribuição de energia elétrica**. 1985. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.
- CHIANG, H. D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results. **IEEE Transactionson Power Delivery**, Piscataway, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, 1990.
- COSSI, A. M. **Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão**. 2008. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2008.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. A. Set of linear equations to calculate the steady-state operation of an electrical distribution system. In: IEEE PES CONFERENCE ON INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES – ISGT LATIN AMERICA, 2011, Medellín. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2011. 5 p.
- FREDDO, A. R.; BRITO, R. C. **Implementação da metaheurística GRASP para o problema do caixeiro viajante simétrico**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Material utilizado na disciplina Tópicos em inteligência artificial. Disponível em: <<http://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/topicosia2/downloads/trabalhos/GraspTSP.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2012.
- GOSWANI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactionson Power Delivery**, Piscataway, v. 7, n. 3, p. 1484-1491, 1992.
- HAFFNER, S. **Análise de sistemas de potência**. Rio de Janeiro: UFRJ-EE, 2008. Disponível em: <[http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila\\_Completa\\_ANALISE\\_DE\\_SISTEMAS\\_D E\\_POTÊNCIA.pdf](http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila_Completa_ANALISE_DE_SISTEMAS_D E_POTÊNCIA.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2012.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A. L. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transaction on Power Systems**, Piscataway, v. 27, n. 1, p. 172-180, Feb. 2012.

LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA – LaPSEE. **Test System**. Ilha Solteira: UNESP, 2012. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>>. Acesso em: 5 set. 2012.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 11, n. 2, p. 150-159, dez. 2000.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating Spnning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 1975, Cambridge. **Proceedings...** Zurich: PSCC, 1975. v. 5, p. 1-18.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgar Blucher, 1983. 147 p.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas: Editora da Unicamp, 2003. 249 p.

FLORIANO, T. N. **Cálculo de fluxo de potência em alimentadores de distribuição baseado em tensões nodais e de ramos**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 2010.

OLIVEIRA, L. W.; JUNIOR, S. C.; COSTA, J. S.; OLIVEIRA, E. J.; PEREIRA, J. L. R.; JUNIOR, I. C. S. Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 233-246, abr./jun. 2009.

OLIVEIRA, M. B. C. **Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística GRASP**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

OLIVEIRA, M.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. Reconfiguração de sistema de distribuição utilizando a metaheurística GRASP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., 2011, Ubatuba. **Anais...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2011.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, n. 2, p. 1492-1498, 1989.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A. Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 753-762, May 1988.

RAIRES-ROSADO, I. J.; BERNAL-AUGUSTIN, J. L. Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems. **IEEE Transactions Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 2, p. 696-703, May 1998.

TINNEY, W. F.; HART, E. C. Power flow solution by Newton's method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, Piscataway, v. PAS-86, n. 11, Nov. 1967.

## **Apêndice A1 — Dados dos Sistemas Testes de distribuição**

Todos os sistemas descrito neste trabalho encontram-se no site do Laboratório de Planejamento do Sistema de Energia Elétrica – LaPSEE, o endereço deste site é <<http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>>