

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA PARA REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

LUCAS FELIPE AMARAL

**DM 39 /2018**

UFPA/ ITEC/ PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará – Brasil  
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FELIPE AMARAL

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA PARA REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

DM 39 /2018

UFPA/ ITEC/ PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará – Brasil  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FELIPE AMARAL

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA PARA REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

Dissertação submetida à banca  
examinadora do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da  
UFPA para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica na  
área de Sistemas de Energia Elétrica

UFPA/ ITEC/ PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará – Brasil  
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
(CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da  
Universidade Federal do Pará**  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a)

---

A485c      Amaral, Lucas Felipe.  
              Comparação entre métodos de fluxo de carga para redes de distribuição ativas / Lucas Felipe  
              Amaral. — 2018.  
              96 f. : il. color.

              Orientador(a): Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira  
              Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de  
              Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

              1. Redes de distribuição ativas. 2. Método de Newton Raphson. 3. Método Desacoplado com  
              rotação de eixos. 4. Método Desacoplado com normalização complexa. 5. Método Somatório de  
              correntes. I. Título.

CDD 621.3191

---



DEDICATÓRIA

*À minha mãe  
Por todo apoio, dedicação e amor altruísta*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre esteve comigo, me conduzindo de acordo com a sua boa, perfeita e agradável vontade, agradeço muito a Ele que me abriu as portas para cursar esse mestrado, assim como Ele me garantiu a possibilidade de ganhar uma bolsa de mestrado. Em todos os momentos em que cursei o mestrado pude ver o amor, a graça e a misericórdia de Deus sobre a minha vida.

Sou muito grato também ao meu orientador, professor João Paulo, o qual me possibilitou ingressar no mestrado, agradeço a ele pela orientação, disponibilidade, gentileza e principalmente pela paciência. Congratulo este profissional por ser um excelente professor e orientador.

Agradeço a CAPES, pelo apoio que recebi dessa através da concessão de uma bolsa de mestrado que me foi disponibilizada desde março de 2017 a julho de 2018, totalizando-se um valor de R\$ 25.500,00, o qual me sustentou ao longo desse período.

Agradeço ao professor Ubiratan Holanda Bezerra e a professora Alessandra Macedo de Souza, por terem aceitado avaliar este trabalho.

Sou muito grato a minha mãe que sempre proporcionou todas as condições necessárias para o meu ingresso e conclusão do mestrado e também, agradeço também à minha família por sempre terem estado comigo nos momentos mais difíceis da minha vida.

Sou agradecido ao meu primo Francisco por ter sempre se preocupado comigo e com minha formação escolar e acadêmica e por ter investido em cursos profissionalizantes para mim.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	vi
AGRADECIMENTOS .....	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1- INTRODUÇÃO .....	1
1.1- Considerações Iniciais .....	1
1.2- Objetivo Geral .....	2
1.3 Objetivos Específicos .....	3
1.4- Organização do Trabalho.....	3
2- REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVAS .....	5
2.1- Introdução.....	5
2.2- Redes de Distribuição Convencionais .....	5
2.2.1- Redes Radiais.....	6
2.2.2- Sistema em Anel (Loop) .....	7
2.3- Redes de Distribuição Ativas .....	8
2.3.1- Introdução as Redes de Distribuição Ativas .....	8
2.3.2- Razões para a Utilização de Geração Distribuída.....	8
2.3.3- Considerações Sobre Redes de Distribuição Ativas .....	9
2.3.3.1- Grau de Penetração.....	11
2.3.3.2- Grau de Robustez .....	11
2.3.4- Microrredes .....	11
2.3.5- Interconexão de Microrredes .....	13
2.3.6- Principais Tipos de Fontes de Energia Usadas nas GD's .....	13
2.3.6.1- Sistemas de Cogeração Combinados (CHP).....	13
2.3.6.2- Sistemas de Energia Eólica .....	14
2.3.6.3- Sistemas Fotovoltaicos (PV) .....	15
2.3.4.6- Outras Fontes de Energia Renováveis.....	15
2.4 – Conclusões .....	15
3- MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA .....	17
3.1- Introdução.....	17

3.2- Newton-Raphson .....	18
3.2.1- Introdução ao Método de Newton-Raphson .....	18
3.2.2- Solução do Fluxo de Carga pelo Método Newton-Raphson.....	21
3.2.3 – Critérios de Parada do Método de Newton-Raphson.....	26
3.2.4 - Número de Iterações, Convergência e Esforço Computacional do Método.....	26
3.2.5 – Fluxograma do Método de Newton-Raphson .....	27
3.3- Desacoplado Rápido .....	27
3.4 - Desacoplado Rápido com Rotação de Eixo.....	28
3.4.1 - Introdução .....	28
3.4.2- Relações R/X Típicas em Sistemas de Transmissão e Distribuição .....	29
3.4.3 - Rotação de Eixos Complexos .....	30
3.4.4 - Cálculo do Ângulo de Rotação .....	32
3.4.5- Fluxograma .....	34
3.5- Desacoplado Rápido com Normalização Complexa .....	34
3.5.1- Introdução .....	34
3.5.2- Normalização por Unidade Complexa.....	35
3.5.3 - Cálculo do Ângulo Base .....	37
3.5.4- Fluxograma .....	38
3.5.5 – Aspectos Computacionais dos Métodos Desacoplados .....	38
3.6 – Somatório de Corrente (Backward/ Forward Sweep).....	39
3.6.1 - Introdução .....	39
3.6.2 – Descrição Geral do Método .....	39
3.6.3 – Determinação da Corrente das Cargas .....	40
3.6.4 – Varredura Reversa.....	41
3.6.5 – Varredura Direta.....	41
3.6.6 – Método Aplicado à Redes de Distribuição com Geração Distribuída .....	42
3.6.7- Fluxograma .....	44
3.7- Conclusão .....	44
4- RESULTADOS.....	45
4.1- Introdução.....	45
4.2- Análise dos resultados .....	45
4.2.1- Considerações Iniciais .....	45
4.2.2- O Efeito do Aumento do Valor R/X .....	46
4.2.3- O Efeito da Variação do Grau de Penetração da GD.....	50

4.2.4- Efeito da Variação da Quantidade de Unidades GD.....	52
4.2.5- Verificação da Escolha dos Ângulos Base para os Métodos Desacoplados Modificados.....	54
4.3- Conclusão .....	58
5- CONCLUSÕES.....	59
5.1- Considerações Finais .....	59
5.2- Trabalhos Futuros .....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTE UTILIZADOS. ....	65

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Exemplo de rede de distribuição convencional.....	6
Figura 2.2: Rede de distribuição radial simples .....	7
Figura 2.3: Configuração em anel. ....	7
Figura 2.4: Exemplo de rede de distribuição ativa .....	10
Figura 2.5: Exemplo de microrrede .....	12
Figura 2.6 – Exemplo de sistema de cogeração .....	14
Figura 2.7 – Exemplo de geração eólica .....	14
Figura 2.8 – Sistema fotovoltaico (PV) .....	15
Figura 3.1: Ilustração do processo de convergência do método de Newton-Raphson.....	19
Figura 3.2: Ilustração da dependência do valor inicial para o método de Newton-Raphson, $X(0)$ é boa estimativa inicial e $X'(0)$ é má estimativa inicial. ....	20
Figura 3.3: Fluxograma do método de Newton-Raphson.....	27
Figura 3.4: representação gráfica da impedância típica de alta tensão.....	29
Figura 3.5: Representação gráfica de impedância de media tensão .....	30
Figura 3.6: Rotação de eixos de uma impedância de Baixa Tensão.....	30
Figura 3.7: Representação de ligação barra ramo.....	32
Figura 3.8: Representação fasorial da impedância la linha l. ....	32
Figura 3.9: Fluxograma do método Desacoplado com rotação de eixos.....	34
Figura 3.10: Fluxograma do método Desacoplado com normalização complexa.....	38
Figura 3.11: Rede radial dividida em camadas.....	39
Figura 3.13: Fluxograma do método Somatório de correntes .....	44
Figura 4.1: Sistema teste 1.....	46
Figura 4.2: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 1.....	47
Figura 4.3: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 2.....	47
Figura 4.4: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 3.....	48
Figura 4.5: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 3.....	48
Figura 4.6: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 2. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.....	49
Figura 4.7: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 3. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.....	49
Figura 4.8: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 4. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.....	49
Figura 4.9: Efeito da variação do grau de penetração no número de iterações para o sistema teste 2. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.....	50

Figura 4.10: Efeito da variação do grau de penetração no número de iterações para o sistema teste 3. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.....	51
Figura 4.11: Efeito da variação do grau de penetração no número de iterações para o sistema teste 4. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.....	51
Figura 4.12: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em redes passivas. (a) Para o sistema teste 3. (b) Para o sistema teste 4. ....	54
Figura 4.13: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 3 cujas barras com GD são consideradas como PQ. (a) $G_p = 60\%$ . (b) $G_p = 100\%$ .....	55
Figura 4.14: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 4 cujas barras com GD são consideradas como PQ. (a) $G_p = 60\%$ . (b) $G_p = 100\%$ .....	55
Figura 4.15: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 3 cujas barras com GD são consideradas como PV. (a) $G_p = 10\%$ . (b) $G_p = 30\%$ .....	55
Figura 4.16: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 4 cujas barras com GD são consideradas como PV. (a) $G_p = 10\%$ . (b) $G_p = 30\%$ .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores típicos da relação R/X para transmissão e distribuição.....	29
Tabela 4.1: Barras escolhidas para inserção de unidades GD. ....	52
Tabela 4.2: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema teste 2 ao se variar unidades GD. ....	52
Tabela 4.3: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema teste 3 ao se variar unidades GD. ....	53
Tabela 4.4: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema teste 4 ao se variar unidades GD. ....	53
Tabela 4.5: Comparação do ângulo base obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 3:.....	56
Tabela 4.6: Comparação do número de iterações obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 3: .....	56
Tabela 4.7: Comparação do ângulo base obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 4:.....	56
Tabela 4.8: Comparação do número de iterações obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 4: .....	57
Tabela A.1: Dados de barras do sistema teste 1: .....	65
Tabela A.2: Dados de Ramos do sistema teste 1. ....	65
Tabela A.3: Dados de barras do sistema teste 2: .....	65
Tabela A.4: Dados de ramos do sistema teste 2: .....	66
Tabela A.5: Dados de barras do sistema teste 3: .....	66
Tabela A.6: Dados de ramos do sistema teste 3: .....	71
Tabela A.7: Dados de barra para o sistema teste 4. ....	76
Tabela A.8: Dados de ramos do sistema teste 4. ....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>tp</i>	Tempo de processamento em segundos.
<i>it</i>	Número de iterações.
<i>Gp</i>	Grau de penetração.
<i>Gr</i>	Grau de robustez.
<i>nr</i>	Número total de ramos de um sistema de distribuição
<i>sc</i>	Método Somatório de correntes.
<i>NR</i>	Método de Newton-Raphson.
<i>Rot.</i>	Método Desacoplado rápido com rotação de eixos, quando utilizado como sobrescrito, indica grandezas rotacionadas.
<i>cpu</i>	subscrito que indica grandezas normalizadas complexamente.
<i>PU</i>	Subscrito que indica grandezas normalizadas de maneira convencional.
<i>Met.</i>	Métodos de fluxo de carga.
$\delta$	Ângulo de tensão (graus).
$\alpha$	Ângulo de impedância de um trecho genérico de uma rede de distribuição.
$\beta$	Ângulo de corrente.
$\delta_{base}$	Ângulo base aplicado ao método Desacoplado com normalização complexa.
$\phi$	Ângulo base aplicado ao método Desacoplado com rotação de eixos.
<i>V</i>	Tensão (p.u).
<i>I</i>	Corrente.
<i>k</i>	sobrescrito que indica número de iteração.
<i>r</i>	Resistência de linhas.
<i>x</i>	Reatância de linhas.
<i>P</i>	potência ativa das barras.
<i>Q</i>	potência reativa das barras após aplicação de normalização complexa.
<i>Z</i>	Impedância das linhas.
<i>S</i>	Potência aparente.
$\alpha_{avg}$	Valor médio do ângulo de carga em radianos.
$\mu_{avg}$	Valor médio do máximo e mínimo valor do ângulo de carga em radianos.
$\omega$	Índice de fator de potência
$Y_i$	Soma das admitâncias de todos os elementos shunts das barras i
$S_{cc}$	Potência aparente de curto circuito numa linha
<i>i</i>	Barra genérica i, quando utilizado como subscrito, indica que determinada grandeza é referente a barra i.
<i>k</i>	Barra genérica k, quando utilizado como subscrito, indica que determinada grandeza é referente a barra k.
<i>G</i>	Matriz condutância, quando empregado como subscrito indica que determinada grandeza é de geração.
<i>B</i>	Matriz susceptância.
<i>C</i>	Empregado como subscrito, ele indica que determinada grandeza é de consumo.
<i>T</i>	Empregado como subscrito, ele indica que determinada grandeza é de transmissão.
<i>esp</i>	Sobrescrito que indica que a variável é especificada.
$\Delta$	Quando este precede alguma das variáveis de potência, significa um mismatch de potência ativa, reativa ou aparente.
$\delta_{ik}$	Abertura angular entre as barras i e k.

## RESUMO

Essa dissertação de mestrado apresenta um estudo comparativo de métodos de fluxo de carga para redes de distribuição ativa. O estudo proposto leva em conta as mudanças já enfrentadas pelos sistemas de distribuição, como a alta penetração da geração distribuída (GD), considerando as características típicas de redes de distribuição com a alta relação R/X. Essas características impõem dificuldades sobre o desempenho de tradicionais algoritmos de fluxo de carga, como o método desacoplado e o método da varredura (backward-forward sweep). Por outro lado, algoritmos modificados baseados no método desacoplado, como o desacoplado com rotação de eixos e desacoplado com normalização complexa podem ser eficientemente aplicados para análise de sistemas de distribuição. Nesse sentido, uma comparação de desempenho, em termos de número de iterações e custo computacional, é realizada entre os seguintes métodos: Newton-Raphson, somatório de correntes, desacoplado rápido com normalização complexa e desacoplado com rotação de eixos. O desempenho dos métodos é analisado para diferentes graus de penetração da GD, tipos de barras PQ e PV em barras com a presença da GD, e diferentes valores R/X dos cabos. Além disso, verificou-se a influência do ângulo base dos métodos desacoplados modificados sobre o número de iterações. Os métodos foram testados em quatro sistemas: sistema de 2 barras, sistema de 69 barras, sistema de 476 barras e sistema de 1080 barras.

**PALAVRAS-CHAVES:** Geração distribuída, redes de distribuição ativas, fluxo de carga, método de Newton-Raphson, método Desacoplado com rotação de eixos, método Desacoplado com normalização complexa, Somatório de correntes.

## ABSTRACT

This dissertation presents a comparative study of load flow methods for analysis of active distribution networks. The proposed study takes into account the changes already faced by distribution systems, such as a high penetration of distributed generation (DG), while considering the typical characteristics of distribution networks, as the high R/X ratios. These characteristics impose difficulties on the performance of both backward-forward sweep and decoupled-based power flow methods. On the other hand, modified algorithms based on the decoupled method, such axis rotation fast decoupled and fast decoupled via  $pu$  normalization, can be efficiently applied to distribution system analysis. Thereby, a comparison of performance in terms of number of iterations and computational effort is carry out between the following methods: Newton-Raphson, Current Summation, Axis Rotation Fast Decoupled and Fast Decoupled via Complex  $pu$ . Normalization. The performance of each method is analyzed for different DG penetration levels, DG modelled as PQ and PV buses, and different R/X ratios. In addition, the influence of the base angle of both decoupled methods on the number of iterations was analyzed. The methods were tested in four distribution systems: 2-bus system, IEEE 69-bus system, 476-bus system and 1080-bus system.

**Keywords:** Distributed generation, actives distributions networks, load flow analysis, Newton-Raphson method, axis rotation fast decoupled method, fast decoupled via complex  $pu$  normalization method, current summation method.

## 1- INTRODUÇÃO

### 1.1- Considerações Iniciais

As redes de distribuição de energia elétrica estão passando por uma fase de grande transição; de redes de distribuição passivas com fluxo de energia unidirecional para redes de distribuição ativas com fluxo de energia bidirecional. Redes de distribuição sem geração distribuída (GD) são consideradas passivas, uma vez que a energia elétrica é fornecida pelo sistema interligado nacional aos consumidores conectados nas redes de distribuição. Por outro lado, as redes de distribuição se tornam ativas quando unidades de GD são conectadas no sistema de distribuição provocando fluxos de energia bidirecionais em tais redes [1].

Antes dessa transição, as redes de distribuição eram tradicionalmente projetadas e operadas sob a premissa de que a subestação primária é a única fonte de potência ativa e de corrente de curto-circuito. Essa suposição orientou no passado, o desenvolvimento de ferramentas analíticas e numéricas dedicadas a estudos de planejamento e operação de redes de distribuição.

Uma das análises mais realizadas em sistemas elétricos de potência (SEP) é o cálculo de fluxo de carga, o qual consiste basicamente na determinação do estado operativo do sistema. Ou seja, a obtenção de módulos e ângulos das tensões em todas as barras do sistema, para um cenário operativo que envolve um nível de geração e carga e uma topologia. Neste sentido podem ser utilizados vários métodos de fluxo de carga, dentre os quais se destacam os métodos de Newton-Raphson (NR), Desacoplado rápido e o Somatório de correntes (Sc), entre outros. A fim de garantir condições seguras de operação, duas características são esperadas para análise de fluxo de carga: velocidade e acurácia da solução.

Para aplicações em sistemas de transmissão são utilizados principalmente, os métodos Newton-Raphson e Desacoplado rápido. O primeiro é um método muito robusto e com boas características de convergência, porém demanda um custo computacional muito elevado [2], pois em seu algoritmo de solução é necessário, a cada iteração, a inversão de uma matriz extensa, chamada de jacobiana. Tal desvantagem é superada pela utilização do segundo método, conhecido como Desacoplado rápido [3], o qual simplifica a matriz jacobiana através do desacoplamento das variáveis P-V e Q- $\delta$ . Como a referida matriz é simplificada, o esforço computacional torna-se menor. Essa simplificação pode ser empregada com muito êxito em sistemas de transmissão.

Por outro lado, quando o método Desacoplado rápido é aplicado aos sistemas de distribuição, a simplificação da jacobiana é pouco eficaz [4], pois tais redes possuem em seus alimentadores uma relação R/X elevada. Tal valor em sistemas de transmissão é suficientemente pequeno para ocorrer o desacoplamento P-V e Q- $\delta$ , de acordo com as equações de balanço de potência do método Newton-Raphson, as quais servem de subsídio para o método Desacoplado. Como os sistemas de distribuição possuem elevado valor R/X, o acoplamento das

variáveis mencionadas não é desprezível, o que torna o método Desacoplado pouco aproveitável para redes de distribuição primárias.

Dessa forma foram propostos em [5] e [6] métodos denominados, Desacoplado rápido com rotação de eixos (Dre) e Desacoplado rápido com normalização complexa (Dnc), respectivamente. Através de uma adaptação nos dados de ramos da rede a ser simulada, tais métodos reduzem o valor R/X para valores típicos de sistemas de transmissão, permitindo novamente o desacoplamento das variáveis P-V e Q- $\delta$ . Ao final da simulação uma nova adaptação deve ser feita na rede, com o objetivo de encontrar os valores corretos de fluxos de potência e perdas ôhmicas do sistema.

Como opção adicional para o problema de fluxo de carga em redes de distribuição têm-se os métodos de varredura, dentre os quais, cita-se o método Somatório de correntes, cuja formulação está descrita em [7], onde o método é descrito como robusto e eficiente e capaz de resolver sistemas de distribuição radiais e fracamente malhadas com um grande número de barras e ramos. O Somatório de correntes faz utilização das leis de kirchoff de tensão e das correntes em seu algoritmo. Uma das vantagens do método, é que este não necessita de inversão de matrizes extensas e que se modificam a cada nova iteração, como acontece no método Newton-Raphson. Logo, o método somatório de corrente não demanda um grande tempo de processamento.

Ao longo do tempo, os estudos de fluxo de carga com relação aos métodos sempre foram destinados aos sistemas de transmissão, porém tem crescido a necessidade de se fazer tais estudos para sistemas de distribuição, pois estes que anteriormente tinham características de sistemas passivos, tem adquirido caráter ativo, graças a implementação da geração distribuída (GD). A presença da GD nas redes de distribuição introduz novas questões de caráter técnico, como a possibilidade de sobretensão.

Com relação ao fluxo de carga em redes de distribuição ativas algumas modificações precisam ser realizadas no algoritmo do método Somatório de correntes caso haja unidades GD que possuam controle de tensão de acordo com [8].

## 1.2- Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma avaliação comparativa de desempenho entre os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado rápido com rotação de eixos, Desacoplado rápido com normalização complexa e Somatório de correntes para redes de distribuição ativas, com relação ao número de iterações (it) e tempo de processamento (Tp).

### 1.3 Objetivos Específicos

- Realizar análises considerando diferentes graus de penetração ( $G_p$ ) da GD, GD modelada como como barras PQ e PV e também diferentes números de unidades GD.
- Analisar a influência da variação do parâmetro R/X no desempenho dos métodos de fluxo de carga já citados em sistemas distribuição ativos.
- Este trabalho também analisa o impacto da escolha do ângulo base para os métodos Desacoplados modificados. Dessa forma investiga-se os ângulos que oferecem menor número de iterações e estes ângulos são comparados com os obtidos através dos valores calculados, através das abordagens empregadas em [5] e [6]. Verifica-se dessa forma a eficácia dos métodos de cálculos dos trabalhos citados em encontrar ângulos base com o menor número possível de iterações.
- Por fim almeja-se encontrar para os diferentes cenários de inserção de geração distribuída em redes de distribuição, qual dos métodos é mais adequado em relação a tempo de processamento e número de iterações.

### 1.4- Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

O capítulo 1 apresenta a problemática a ser explorada neste trabalho, assim como define os objetivos cumpridos ao longo do mesmo.

O capítulo 2 apresenta considerações acerca de redes de distribuição ativas, nesta inicialmente tem-se uma breve descrição de sistemas de distribuição de energia tradicionais, em seguida apresenta-se o conceito de redes ativas e microrredes e apresentam-se as razões para utilização de GD's.

O capítulo 3 descreve com detalhes todos os métodos de fluxo de carga utilizados neste trabalho, ou seja, os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado rápido com normalização complexa, Desacoplado com rotação de eixos e Somatório de correntes. Todas as formulações e fundamentos teóricos que dão embasamento a tais métodos são também descritos. Além disso, todas as modificações que devem ser realizadas no método Somatório de correntes, tanto para redes ativas com barras PV são apresentadas.

No capítulo 4, através de várias tabelas e gráficos são apresentados os resultados obtidos, assim como comentários pertinentes acerca do desempenho de cada de fluxo de carga utilizado neste trabalho.

No capítulo 5, têm-se as conclusões formuladas acerca do desempenho de cada método e sugestões para trabalhos futuros.

## 2- REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

### 2.1- Introdução

O presente capítulo tem por objetivo apresentar as redes de distribuição com enfoque principal para as redes de distribuição ativas. Primeiramente são descritas as redes de distribuição convencionais, sobre as quais se apresentam diferentes classificações e configurações topológicas, em seguida são descritas características de redes ativas de distribuição.

Redes de distribuição convencionais são aquelas em que a energia elétrica é recebida apenas da subestação. Tal sistema é normalmente radial por ser a topologia de menor custo e que oferece menor complexidade operacional, porém é menos confiável. Entretanto, não é incomum encontrar sistemas de distribuição mais complexos contendo malhas como o sistema em anel.

Por outro lado, as redes de distribuição ativas já contam com a presença do consumidor como um agente de produção de eletricidade, através de fontes que podem ser instaladas nas residências como as fontes eólicas e fotovoltaicas. Tal fator traz muitos benefícios aos sistemas elétricos, uma vez que a presença de geração distribuída supre cargas locais, além de poder ajudar sistemas elétricos estressados a diminuir o uso de geração térmica.

Em relação aos recursos naturais utilizados como fontes de energia para as GD's cita-se a energia fotovoltaica, energia eólica e cogeração, a primeira realiza captação de energia solar através de circuitos eletrônicos, já na energia eólica, realiza-se conversão da energia cinética do vento em energia elétrica através de motores, com relação a cogeração, esta faz uso do calor para a produção de eletricidade

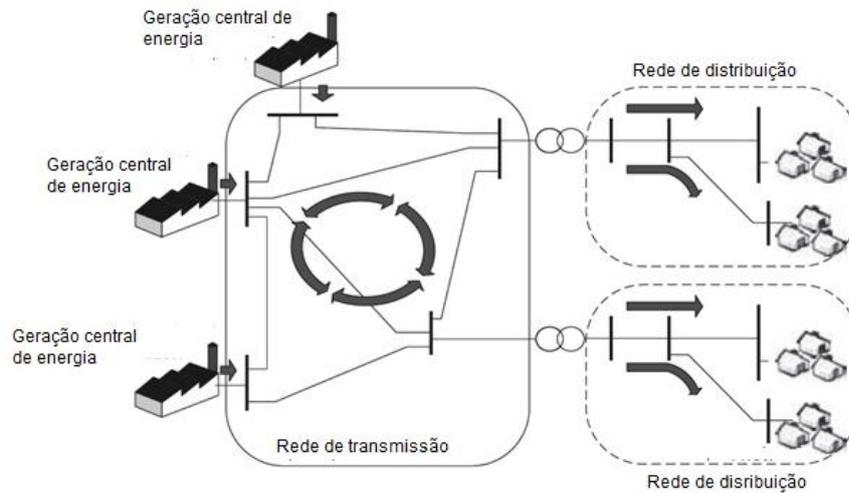
### 2.2- Redes de Distribuição Convencionais

Usualmente o sistema de distribuição típico é definido como parte dos sistemas de potência que vai da subestação abaixadora de distribuição até pontos de consumo e pode ser dividido em duas partes:

- Rede primária que compreende a subestação de distribuição e os alimentadores primários;
- Rede secundária que é formada pelos transformadores de distribuição, alimentadores secundários e ramais de serviço ou de ligação.

As subestações de distribuição podem ser alimentadas pelas linhas de subtransmissão ou pelas linhas de transmissão. Das subestações saem os alimentadores primários que irão alimentar os transformadores de distribuição. Dos transformadores de distribuição saem os alimentadores secundários que irão atender os consumidores da rede secundária. Um exemplo típico de redes de distribuição convencional é mostrado abaixo na figura 2.1:

Figura 2.1: Exemplo de rede de distribuição convencional



Fonte: Distributed generation, Jerkins. [20].

Nesse tipo de redes de distribuição, tem-se um fluxo de potência fluindo apenas da subestação para cada consumidor, em uma topologia de rede geralmente radial, ou seja, semelhante a uma árvore, onde não se tem a presença de geração distribuída.

As redes de distribuição de uma forma geral podem ser classificadas de algumas formas diferentes dependendo do critério ou característica considerada. Uma das formas de classificá-las é em função da tensão de operação tem-se 69 kV e 34,5 kV para subtransmissão, 13,8 kV e 11,9 kV para distribuição primária e 380 V, 220 V, e 127 V para distribuição secundária, por exemplo.

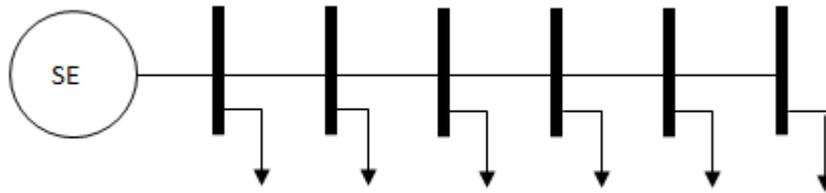
Outro critério importante utilizado é em função do tipo de isolamento do condutor, podendo este ser nu, protegido ou isolado. Quanto à forma de instalação das redes, devem ser consideradas a aérea, semienterrada e subterrânea [9].

Além disso é necessário considerar que as redes de distribuição podem assumir diferentes topologias ou configurações para atendimento de energia para o consumidor, como já dito anteriormente em sistemas de distribuição convencionais a configuração geralmente utilizada é a radial, por ser a rede mais simples e mais barata, porém existem sistemas mais complexos que a partir do sistema em anel vão adicionando malhas ao sistema de distribuição, sobre esse tipo de topologia cita-se o sistema em anel que além do sistema radial será exposto abaixo:

### 2.2.1- Redes Radiais

É o tipo mais simples de rede. Que evolui em forma de árvore, cujo tronco é chamado alimentador principal ou tronco e aos demais “ramos”, de ramais ou laterais. Esse arranjo observado na figura 2.2, possui pequeno investimento inicial e é mais comum ser usado em sistemas aéreos.

Figura 2.2: Rede de distribuição radial simples



Fonte: O autor

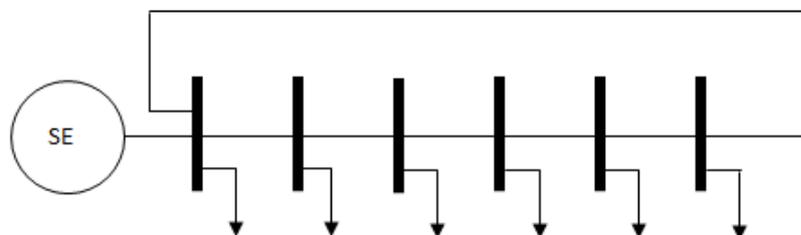
Evidentemente a confiabilidade desse arranjo é baixa, pois apesar de haver seccionadores com fusíveis nas derivações dos ramos, um defeito na rede pode tirar todo o alimentador de serviço, e se tal falha for de caráter permanente o suprimento de toda a rede a jusante à primeira seccionadora imediatamente a montante do defeito, será interrompido.

Um alimentador primário possui configuração radial simples, quando este é suprido por uma única subestação de distribuição e realiza seu fluxo de carga em apenas um sentido.

#### 2.2.2- Sistema em Anel (Loop)

Com a finalidade de aumentar a confiabilidade, o sistema radial com recursos de emergência, passou a ser um esquema mais elaborado em que os dispositivos de seccionamento e religamento, permitem a alimentação do consumidor por circuitos provenientes da mesma SE ou SE diferentes. A operação destes dispositivos pode ser manual ou automática. Quando manual, o tempo de manobra influi negativamente no tempo de restauração do serviço, no entanto, o comando automático eleva o preço da instalação e exige manutenção frequente, o que constitui um fator econômico a ser considerado. O custo do sistema em anel é mais elevado que o radial, não só pela multiplicidade dos equipamentos de proteção e manobra, como pela necessidade de maior bitola dos condutores que devem trabalhar com folgas para permitirem as transferências de alimentação.

Figura 2.3: Configuração em anel.



Fonte: O autor

## 2.3- Redes de Distribuição Ativas

### 2.3.1- Introdução as Redes de Distribuição Ativas

Ao redor do mundo, o SEP convencional está enfrentando problemas relacionados ao gradual esgotamento de fontes de energia de origem fóssil, além de pobre eficiência energética e poluição ambiental. Esses problemas têm levado o sistema elétrico à uma nova tendência de geração de energia a qual está localizada no nível da distribuição de energia através do uso de fontes de energia renováveis não-convencionais como gás natural, biodiesel, eólica, solar, sistemas de Cogeração Combinados (CHP), etc.

Esse tipo de geração de energia é denominado geração distribuída e as fontes de energia são chamadas de recursos da energia distribuída. O termo “Geração distribuída” tem sido conceituado diferenciando-se do conceito de geração convencional centralizada de energia. A rede de distribuição se torna ativa com a integração de GD e assim tal rede é denominada de sistema de distribuição ativa.

Várias estritas definições que são estabelecidas especificamente para cada país estão disponíveis acerca de GD, ao redor do mundo, tais definições são relacionadas a dados de geração de potência da GD e nível de tensão. Entretanto, o impacto da geração distribuída em um sistema de potência é normalmente o mesmo, independentemente das diferentes definições que se possam aplicar a GD. De acordo com várias pesquisas, alguns atributos universalmente aceitos para a GD são listados a seguir:

1. Não é centralmente planejado pelo sistema de potência, ou seja, a energia não é centralmente despachada.
2. Apresenta potência de geração normalmente menor que 50 MW.
3. As fontes de energia ou geradores distribuídos são tipicamente conectados ao sistema de distribuição, os quais como já dito anteriormente apresentam tensões de 127 V a 69 KV.

### 2.3.2- Razões para a Utilização de Geração Distribuída

As razões para o aparecimento da GD devem-se, para além da acelerada diminuição dos recursos fósseis, à operacionalidade estática das redes exigentes, à elevada quantidade de infraestruturas físicas para o transporte de energia em longas distâncias e uma quantidade de benefícios associados à geração distribuída.

Descrevem-se a seguir alguns dos benefícios da GD relativamente aos sistemas convencionais [1]:

1. Devido ao rápido crescimento das cargas, os combustíveis fósseis entraram em esgotamento num horizonte temporal mais curto, o que obriga a encontrar alternativas para não esgotar as reservas. A integração no sistema elétrico de sistemas de produção não convencionais e de energias renováveis pode ser uma alternativa;

2. A redução da poluição ambiental e preocupação relativa ao aquecimento global colocam os recursos renováveis em vantagem sobre os recursos fósseis. O protocolo de Quioto da União Europeia (UE), que define a redução das emissões dos gases de efeito de estufa, obriga os países que o assinaram a tomarem medidas que permitam essa redução, pelo que as energias renováveis e a utilização racional de energia são essenciais para atingir essas metas;
3. A GD permite um melhor aproveitamento das centrais de cogeração. Além da produção de eletricidade, também permite aproveitar a energia térmica, resultante do processo, para utilizações industriais, dado que as centrais deixam de estar a grandes distâncias dos centros de consumo. Esta situação leva ao incremento da eficiência das centrais de produção, reduzindo as perdas de transporte, os custos, e também a poluição térmica do ambiente;
4. A necessidade geográfica de consumo de energia geralmente não é coincidente com os centros produtores. As fontes de produção dispersa vêm alterar este conceito, dado que são instaladas próximas dos consumidores, reduzindo perdas e custos, e gerando emprego local;
5. A operação isolada ou interligada da rede deste tipo de fontes de GD irá trazer maior flexibilidade e qualidade no fornecimento de energia.

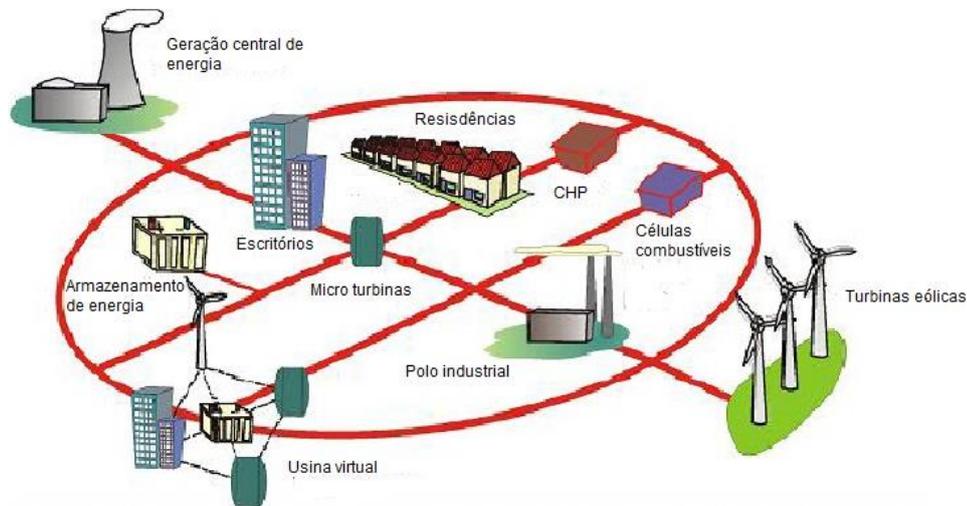
Na resposta às alterações climáticas muitos governos definiram metas ambiciosas no incremento da utilização de energias renováveis e na redução das emissões de gases de efeito de estufa pela produção de energia. É o caso da UE com uma meta de mais 20% de energias renováveis até 2020 e a Califórnia 33% até ao mesmo ano.

### 2.3.3- Considerações Sobre Redes de Distribuição Ativas

Os SEP estão em uma era de grande transição de estáveis sistemas de distribuição passivos com fluxo unidirecional de energia para redes de distribuição ativas com fluxo de potência bidirecional. Sistemas de distribuição sem nenhuma unidade de geração distribuída são considerados passivos quando a potência elétrica é suprida unicamente pelo setor elétrico nacional para os consumidores presentes no sistema de distribuição. Esta se torna ativa, entretanto, quando unidades GD são adicionadas a tal sistema, o qual é submetido a fluxos de potência bidirecionais.

Para efetuar a transição abordada aqui, países em desenvolvimento devem investir no desenvolvimento de infraestrutura de energia sustentável enquanto que os países desenvolvidos devem enfrentar os desafios técnicos e econômicos para a transformação dos sistemas de distribuição. Redes de distribuição ativas precisam fazer uso de um controle flexível e inteligente com sistemas distribuídos inteligentes. Para se fazer uso de energia limpa, é importante, que as redes ativas empreguem futuramente tecnologias inteligentes como Smart Grids ou sistemas de microrredes.

Figura 2.4: Exemplo de rede de distribuição ativa



Fonte: Microgeração e Microredes, Lopes. [21].

Para um correto funcionamento das redes de distribuição ativas, deve ser incorporado além da integração da GD o gerenciamento pelo lado da demanda. A UK-based Centre for Distributed Generation and Sustainable Electrical Energy ([www.sedg.ac.uk](http://www.sedg.ac.uk)) tem demonstrado que a aplicação de métodos de gerenciamento de redes ativas pode admitir com muita eficácia mais conexões de GD quando comparadas a redes sem o funcionamento do mesmo gerenciamento.

Vários fatores contribuem para a evolução das redes ativas de distribuição dentre as quais se podem citar:

1. A pressão de consumidores por um sistema de distribuição de alta qualidade e confiabilidade.
2. Necessidade crescente por políticas regulamentares para a acomodação de recursos renováveis da GD com dispositivos de armazenamento de energia
3. Metas de redução da emissão de carbono na taxa de 50% até 2050.

Com o objetivo da implementação de redes de distribuição ativas mais evoluídas para uma operação e controle flexível e inteligente, devem ser realizadas extensas pesquisas. Os focos de tais pesquisas devem ser principalmente nas seguintes áreas:

1. Controle de ativos sobre uma vasta área.
2. Proteção e controle adaptativos.
3. Dispositivos de gerenciamento de rede.
4. Simulação de rede em tempo real.
5. Sensores e medição avançados
6. Difusão de um sistema de comunicação na rede de distribuição.
7. Extração de dados através de métodos inteligentes
8. Reformulação nos projetos de transmissão e distribuição.

### 2.3.3.1- Grau de Penetração

Grau de penetração é um conceito utilizado para sistemas de distribuição ativas, onde se quantifica o nível de inserção de geração no nível da distribuição, tal parâmetro corresponde a soma das capacidades das GD's no alimentador em relação a demanda máxima do mesmo, como mostrado na equação 2.1 a seguir:

$$Gp = \frac{\sum KVA \text{ ou } MVA \text{ das Gds instaladas no alimentador}}{\text{Demanda máxima do alimentador}} \quad (2.1)$$

### 2.3.3.2- Grau de Robustez

Habilidade de uma área do sistema de energia elétrica em resistir a variações de tensão causadas pela geração distribuída, ou carga. Esse parâmetro é usado como robustez relativa do PAC (ponto de acoplamento comum) no ponto de acoplamento da GD. Como mostrado na equação 2.2 a seguir:

$$Gr = \frac{Scc \text{ no PAC} + Scc \text{ da GD}}{Scc \text{ da GD}} \quad (2.2)$$

### 2.3.4- Microrredes

Microrredes são em pequena escala, sistemas de fornecimento de Cogeração Combinados (CHP) projetadas para suprir cargas elétricas e térmicas para uma pequena comunidade, como um conjunto habitacional ou uma localidade suburbana ou ainda para que seja suprida uma comunidade pública ou acadêmica, tal como uma universidade ou escola, área comercial, local industrial, etc.

Uma microrrede é essencialmente uma rede de distribuição ativa por razão do seu conglomerado de unidades GD e diferentes cargas no nível da distribuição. Os geradores ou micro fontes empregadas em uma microrrede são geralmente fontes renováveis e não convencionais em conjunto gerando energia no nível de tensão de distribuição.

Do ponto de vista operacional, as micro fontes devem ser equipadas com interfaces de eletrônica de potência (PEIs) e controladores para se providenciar uma flexibilidade desejável para garantir uma operação integrada no SEP agregado e para manter a qualidade de energia exigida e potência de saída.

Uma das características peculiares das microrredes é a capacidade de poderem operar interligadas com a rede de distribuição de média e baixa tensão local e/ou de forma isolada. A operação das microrredes em rede isolada consiste num modo de operação em emergência e requer a implementação de estratégias de controle específicas.

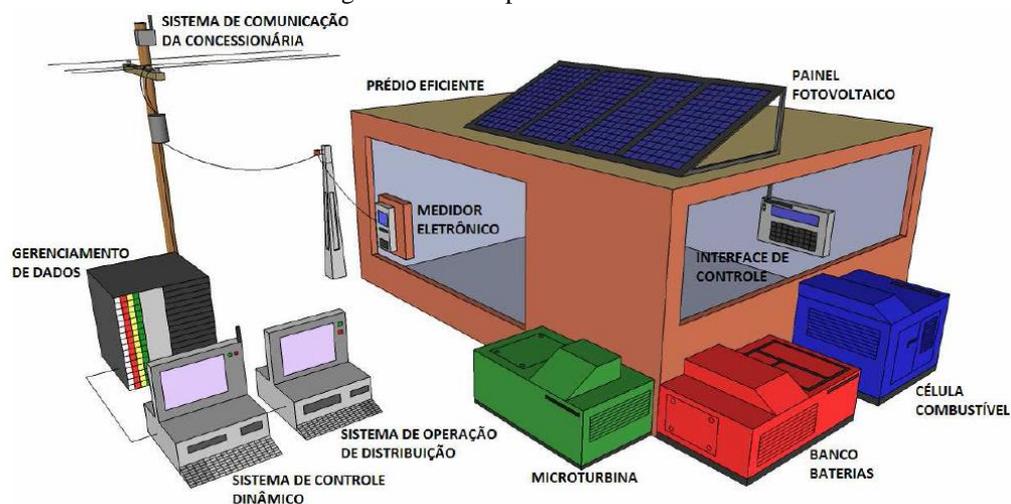
As principais diferenças entre uma microrrede e uma usina convencional são mostradas a seguir:

1. Microfontes possuem capacidade muito inferior em relação aos grandes geradores em usinas convencionais.

2. A potência gerada no nível da distribuição pode ser diretamente entregue ao sistema de distribuição.
3. Microfontes são normalmente instalados perto dos consumidores, pressupõe-se então que as cargas elétricas ou térmicas possam ser eficientemente supridas com tensão e perfil de frequência satisfatórios e que as perdas introduzidas nos alimentadores sejam desprezíveis.

As características técnicas de uma microrrede permite a ela ser adequada para o fornecimento de potência a áreas remotas de um país onde o suprimento de energia pelo sistema nacional de potência é ou de difícil aproveitamento devido a topologia ou onde se há frequente perturbação no sistema devido a condições climática severas ou por distúrbios causados pela ação humana.

Figura 2.5: Exemplo de microrrede



Fonte: benefícios e desafios de redes inteligentes, revista eletrônica de energia. [22].

Do ponto de vista da rede, a principal vantagem de uma microrrede é que ela é tratada como uma unidade controlada dentro do sistema de potência. Assim a microrrede pode ser operada como uma simples carga agregada. Isso demonstra a sua fácil controlabilidade e conformidade com as regras do sistema elétrico sem gerar problemas a confiabilidade e segurança do sistema elétrico. Do ponto de vista dos consumidores, microrredes são benéficas para satisfazer localmente suas necessidades de eletricidade e calor.

As microrredes podem gerar potência ininterruptamente e também melhorar a confiabilidade do sistema local, reduzindo perdas nos alimentadores além de melhorar o nível de tensão local. Do ponto de vista ambiental, microrredes reduzem a poluição ao meio ambiente reduzindo também a contribuição para o aquecimento global através da utilização de tecnologias de baixa utilização do gás carbônico.

Entretanto, para alcançar uma operação estável e segura, um número de técnicas, regulamentação e problemas econômicos tem de ser resolvidos antes que as microrredes se tornem tendência. Algumas áreas problemáticas que necessitam de devida atenção são as características de intermitência e dependência de fatores climáticos natureza para a geração das fontes de energia distribuída, baixa disponibilidade de energia de combustíveis e a carência de

padrões e regulamentações para a operação de microrredes em sincronismo com o sistema elétrico nacional. O estudo de tais problemas requer extensiva pesquisa de tempo real e também pesquisa off line, as quais podem ser enfrentadas pelos engenheiros da distribuição e também pelos institutos de pesquisa ao longo do mundo.

#### 2.3.5- Interconexão de Microrredes

Uma vez que as microrredes são projetadas para gerar potência a nível da distribuição de energia juntamente com a utilização de calor residual, tais redes restringem a capacidade de manipulação de energia. Portanto, a capacidade máxima de microrredes é normalmente limitado a aproximadamente 10 MVA de acordo com as recomendações do IEEE (Instituto de engenheiros eletricitistas e eletrônicos).

Dessa forma, é possível suprir blocos de cargas de grande porte através de várias microrredes através de um sistema de distribuição comum, pela divisão do bloco de carga em várias unidades de carga controláveis com cada unidade sendo alimentada por uma microrrede. Dessa forma, microrredes podem ser interconectadas para formar polos de potência muito maiores de forma a suprir grandes demandas de energia.

Para microrredes interconectadas, cada centro de controle deve executar seu próprio controle com coordenação próxima aos centros de controle das microrredes vizinhas. Assim, uma microrrede interconectada atingiria estabilidade e controlabilidade maior com uma estrutura de controle da distribuição. A interconexão de microrredes também garante mais redundância de suprimento de potência, para assegurar um fornecimento de energia mais confiável.

#### 2.3.6- Principais Tipos de Fontes de Energia Usadas nas GD's

Os geradores de fontes renováveis ou de fontes de produção de energia não convencionais utilizados na produção dispersa ou em microrredes são conhecidos por fontes de energia distribuída ou microfuentes.

Como fontes de energias renováveis são geralmente integrados os sistemas solares fotovoltaicos (PV), os sistemas eólicos, Sistemas de Cogeração Combinados (CHP).

Sobre tais fontes de energia será feita uma breve abordagem, nos subtópicos a seguir:

##### 2.3.6.1- Sistemas de Cogeração Combinados (CHP)

Os sistemas de cogeração são as fontes de energia distribuída ou dispersa mais promissoras para a aplicação nas microrredes. A sua maior vantagem é a eficiência energética na produção de energia, devido ao aproveitamento do calor produzido. Ao contrário das centrais convencionais de combustíveis fósseis, as centrais CHP capturam e utilizam o calor gerado na produção de eletricidade para aquecer localmente redes domésticas e industriais.

O calor produzido a temperaturas moderadas (100-108°C) pode ser utilizado em sistemas de absorção para arrefecimento e refrigeração ambiente. É um sistema muito versátil porque com o mesmo recurso primário é possível obter 3 produtos finais, eletricidade, calor e frio.

Figura 2.6 – Exemplo de sistema de cogeração

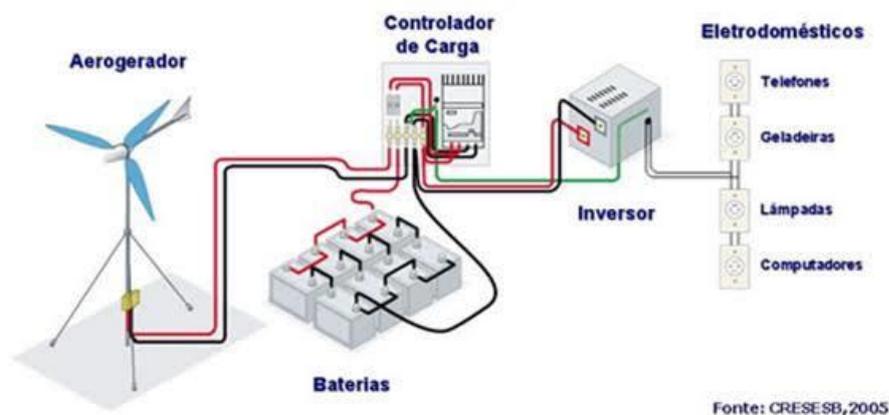


Fonte: pt.cngequipment.net. [23].

### 2.3.6.2- Sistemas de Energia Eólica

A energia eólica provém da radiação solar, porque os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. A energia total disponível dos ventos no planeta é de aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela Terra. Esta percentagem corresponde à energia que é convertida em energia cinética dos ventos. Embora essa percentagem seja pequena, representa uma centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo. Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspetos, entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo [10].

Figura 2.7 – Exemplo de geração eólica



Fonte: CRESESB,2005. [24].

As turbinas eólicas ou aero geradores são as formas mais comuns de designar os sistemas de conversão de energia eólica em energia elétrica. O princípio de funcionamento é baseado na conversão da energia cinética associada ao deslocamento de massas de ar (vento)

em energia mecânica de rotação, pela incidência do vento nas pás do rotor, seguindo-se a conversão da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador elétrico.

#### 2.3.6.3- Sistemas Fotovoltaicos (PV)

Os sistemas de produção fotovoltaica consistem na geração de eletricidade a partir de uma fonte de energia gratuita e inesgotável, a energia solar. A geração fotovoltaica é obtida por um processo de conversão direta nas células de silício. São sistemas constituídos por alguns módulos fotovoltaicos, inversores, reguladores de carga e, no caso de sistemas isolados, baterias.

Figura 2.8 – Sistema fotovoltaico (PV)



Fonte: Microgeração e microredes, J.A. Peças Lopes. [21].

Estes sistemas apresentam um baixo impacto ambiental, baixo custo de manutenção, têm um funcionamento silencioso e um tempo de vida útil elevado (mais de 30 anos). A fonte primária de energia, energia solar, possui uma sustentabilidade natural e também uma grande contribuição para a redução das faturas energéticas dos consumidores.

#### 2.3.4.6- Outras Fontes de Energia Renováveis

Os gases de aterros, a biomassa, os lixos municipais, entre outros, são geralmente tratados como fontes de energia renovável para a geração de eletricidade. A localização destes geradores é determinada pela viabilidade dos recursos necessários.

O inconveniente deste tipo de recursos é a sua baixa densidade energética, escassez e impossibilidade de armazenamento. Devido a estes inconvenientes os geradores são normalmente de pequena capacidade e são instalados nas proximidades dos recursos. São fontes de produção de energia que têm sido incentivadas pelas várias entidades mundiais.

### 2.4 – Conclusões

Este capítulo teve por objetivo apresentar as redes de distribuição ativas, as quais são objeto de pesquisa desse trabalho, para tanto apresentou-se definições relacionadas as redes passivas, para as quais também foram realizadas simulações. Além disso teve-se como objetivo

para este capítulo expressar acerca das maneiras que se podem utilizar uma GD, em uma rede de distribuição ativa, para tanto foi apresentado o conceito de microredes e descreveu-se os alguns tipos de recursos naturais entre os mais usados para GD's.

No capítulo a seguir será descrito as formulações matemáticas e princípios que regem os métodos de fluxo de carga utilizados nesse trabalho, os quais são: Newton-Raphson, Desacoplado rápido com rotação de eixos, Desacoplado rápido com normalização complexa e Somatório de correntes e sua versão modificada para redes com barras PV.

### 3- MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA

#### 3.1- Introdução

No presente capítulo, tem-se por objetivo apresentar uma descrição teórica de todas as formulações matemáticas necessárias para a construção de cada um dos métodos de fluxo de carga utilizados nesse trabalho. Além disso, o objetivo deste capítulo também é a verificação quanto as diferenças existentes em cada um dos métodos quanto ao esforço computacional. Os métodos descritos nesse capítulo são: Newton-Raphson, Desacoplado rápido com normalização complexa, Desacoplado rápido com rotação de eixos e Somatório de corrente.

O método de Newton-Raphson é baseado na expansão da série de Taylor, no qual se faz uma simplificação desprezando-se nessa série as derivadas parciais de ordem maior que 1, daí em diante continua-se um complexo método com a montagem da matriz jacobiana composta por derivadas parciais entre as grandezas de maior interesse em um fluxo de carga: potência ativa  $P$ , reativa  $Q$ , tensão  $V$  e o ângulo da tensão  $\delta$ , para a obtenção da variação incremental da tensão e do ângulo da tensão.

O método Desacoplado rápido tradicional é um método variante do método de Newton-Raphson, o qual considera desprezíveis as relações entre as variáveis  $P-V$  e  $Q-\delta$ , o que permite uma significativa simplificação, no algoritmo do método de Newton, tal simplificação decorre do fraco acoplamento entre as mesmas variáveis para sistemas de transmissão, o que não é verdadeiro para sistemas de distribuição. Por isso, para estas redes, tem-se como métodos alternativos, o Desacoplado rápido com rotação de eixos e o Desacoplado rápido com normalização complexa.

Os métodos Desacoplado rápido com rotação de eixos e com normalização complexa adapta o sistema de distribuição, através da utilização de um ângulo base, para que a rede possua características semelhantes a redes de transmissão, permitindo que o método Desacoplado convirja.

Já o método somatório de corrente é um método de varredura, criado essencialmente para a resolução de fluxo de carga para redes de distribuição, tal método utiliza em sua formulação matemática a aplicação das leis de Kirchoff de corrente e de tensão, o referido método é muito eficaz para resolução de fluxo de carga em sistemas de distribuição radiais e passivos, no caso da existência de barras PV no sistema, devem ser feitas algumas alterações no método relacionadas ao cálculo de injeções de correntes, nas barras cujas tensões são controladas.

### 3.2- Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é um método geral para a determinação de raízes reais de equações não-lineares. Na essência, o método trabalha utilizando a série de Taylor para, a partir de uma aproximação inicial, realizar um processo iterativo robusto e de fortes características de convergência.

#### 3.2.1- Introdução ao Método de Newton-Raphson

Para entender o método, suponha a equação não linear generalizada:

$$f(x) = 0 \quad (3.1)$$

Considere-se agora sua expansão em série de Taylor em torno de um valor conhecido  $x^{(k)}$ :

$$f(x) = f(x^{(k)}) + \frac{1}{1!} \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^{(k)}} (x - x^{(k)}) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_{x=x^{(k)}} (x - x^{(k)})^2 + \dots \quad (3.2)$$

Onde o sobrescrito ( $k$ ) representa o valor de  $x$  na  $k$ -ésima iteração.

Desprezando os termos de maior ordem, pode-se aproximar  $f(x)$  como:

$$f(x) = f(x^{(k)}) + \frac{1}{1!} \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^{(k)}} (x - x^{(k)}) \quad (3.3)$$

Mas  $f(x) = 0$ . Portanto:

$$x - x^{(k)} \cong - \frac{f(x^{(k)})}{\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^{(k)}}} \quad (3.4)$$

Observe que o valor  $x$  não é raiz de  $f(x) = 0$  devido ao erro introduzido ao serem desprezados os termos de ordem maior da expansão em série de Taylor; no entanto,  $x$  geralmente representa uma estimativa mais próxima do valor da raiz do que representava  $x^{(k)}$ . Assim, pode-se definir:

$$\Delta x^{(k)} = - \frac{f(x^{(k)})}{\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^{(k)}}} \quad (3.5)$$

E utiliza-se então  $\Delta x$  para obter uma melhor estimativa da raiz por meio da relação:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (3.6)$$

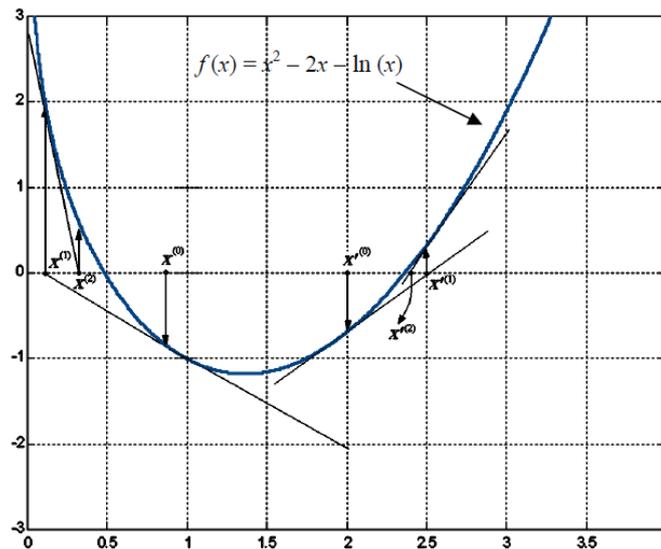
A fim de verificar a rapidez na convergência do método, pode-se aplicá-lo para a resolução da equação abaixo:

$$f(x) = x^2 - 2x - \ln(x) = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{df}{dx} = 2x - 2 - 1/x = 0 \quad (3.8)$$

A figura 3.1 ilustra o processo de convergência do método para dois valores iniciais diferentes,  $x^{(0)}$  e  $x'^{(0)}$ .

Figura 3.1: Ilustração do processo de convergência do método de Newton-Raphson



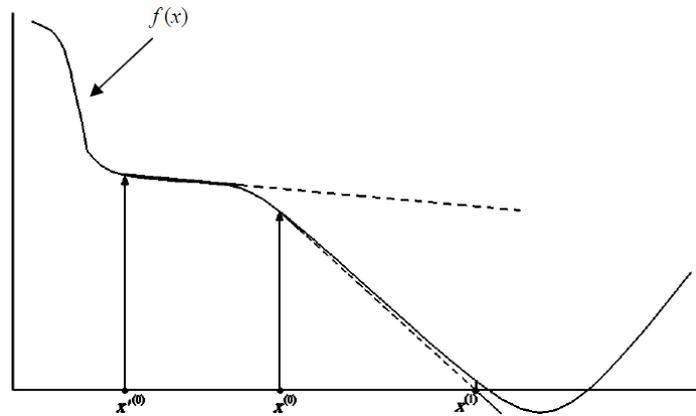
Fonte: Curso de análises de sistema de Potência, U. H. Bezerra. [28].

Como se vê na figura 3.1, o método de Newton-Raphson é um método poderoso e que converge rapidamente para a maioria das funções. Pode-se dizer que esta convergência rápida ocorre porque, para o cálculo do incremento dado a cada iteração, utiliza-se a informação da taxa de variação da função, ou seja, estima-se com maior certeza "a direção em que a função está indo, o que facilita a tarefa de segui-la".

Há, entretanto, dificuldade de convergência para algumas funções. Se  $f(x)$  possuir múltiplas raízes, não há um método simples e seguro para prever qual raiz será obtida. Mesmo com um valor inicial próximo de uma raiz, o método pode convergir para outra raiz mais remota.

Se  $X^{(k)}$  estiver próximo de um ponto de máximo ou de mínimo (derivada quase nula),  $\Delta x$  pode ficar muito grande, deslocando  $X^{(k+1)}$  para longe da solução e aumentando o número de iterações para que se volte à região da solução. A figura 3.2 ilustra a sensibilidade do método à escolha do valor inicial.

Figura 3.2: Ilustração da dependência do valor inicial para o método de Newton-Raphson,  $X(0)$  é boa estimativa inicial e  $X'(0)$  é má estimativa inicial.



Fonte: Curso de análises de sistema de Potência, U. H. Bezerra. [28].

O método de Newton-Raphson pode ser estendido para um sistema de  $n$  equações. Assim, seja o sistema de equações:

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

As funções  $F_1, F_2, \dots, F_n$  das variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$  podem ser expandidas cada uma em série de Taylor em torno de um ponto  $x^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ , resultando em um sistema de  $n$  séries de Taylor. Cada expansão em série de Taylor representa a expansão de uma das funções  $F_i(x)$  em torno de  $x^{(k)}$ .

Mais uma vez, assim como se fez no caso unidimensional, desprezando os termos de ordem superior a primeira ordem, surge um sistema de  $n$  séries de Taylor truncadas no termo de primeira ordem.

O sistema resultante pode ser expresso em forma matricial, na forma:

$$D = -[J] \Delta x \quad (3.10)$$

Onde:

$$D = \begin{bmatrix} F_1(x^{(k)}) \\ F_2(x^{(k)}) \\ \vdots \\ F_n(x^{(k)}) \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{J}] = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial F_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(k)}} & \left. \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_2^{(k)}} & \cdots & \left. \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_n^{(k)}} \\ \left. \frac{\partial F_2}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(k)}} & \left. \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_2^{(k)}} & \cdots & \left. \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_n^{(k)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial F_n}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(k)}} & \left. \frac{\partial F_n}{\partial x_2} \right|_{x_2=x_2^{(k)}} & \cdots & \left. \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \right|_{x_n=x_n^{(k)}} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}$$

O processo iterativo se inicia a partir de uma solução estimada  $\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ , que permite o cálculo da matriz  $[\mathbf{J}]$  e do vetor  $\mathbf{D}$ . A seguir, calcula-se o vetor  $\Delta \mathbf{x}$  através de:

$$\Delta \mathbf{x} = -[\mathbf{J}]^{-1} \mathbf{D} \quad (3.11)$$

Corrige-se a solução estimada com os valores de  $\Delta \mathbf{x}$ , utilizando:

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta \mathbf{X} \quad (3.12)$$

A seguir, calcula-se o novo vetor  $\mathbf{D}$ , a nova matriz  $[\mathbf{J}]$  e recalcula-se o vetor  $\Delta \mathbf{x}$ . Prossegue-se iterando até que o vetor  $\mathbf{D}$  apresente todos os seus valores inferiores a uma tolerância preestabelecida. Assim, o método iterativo de Newton-Raphson fica descrito como apresentado na equação (3.13):

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} - [\mathbf{J}^{(k)}]^{-1} \mathbf{D}^{(k)} \quad (3.13)$$

### 3.2.2- Solução do Fluxo de Carga pelo Método Newton-Raphson

Para a solução do fluxo de carga pelo método Newton-Raphson, serão utilizadas as seguintes equações de balanço de potência ativa e reativa:

$$P_{Gi} - P_{Ci} - V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) = 0 \quad (3.14)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Ci} - V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) = 0 \quad (3.15)$$

Definindo os resíduos (*mismatches*) de potência líquida em cada barra como:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Ci} - P_{Ti} \quad (3.16)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Ci} - Q_{Ti} \quad (3.17)$$

Vê-se que, dado que são conhecidos os valores de  $P_i = P_{Gi} - P_{Ci} = P_i^{esp}$  e  $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Ci} = Q_i^{esp}$  para as barras *PQ*, e  $P_i = P_i^{esp}$  e  $V_i = V_i^{esp}$  para as barras *PV*, o objetivo é encontrar valores de  $V_i$  para as barras *PQ* e  $\delta_i$  para todas as barras, de modo que os  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  sejam nulos (ou o mais próximo possível de zero).

O problema consiste então em resolver as equações:

$$P_i^{esp} - V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) = 0 \quad (3.18a)$$

Para as barras *PQ* e *PV*, e as equações:

$$Q_i^{esp} - V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) = 0 \quad (3.18b)$$

Observa-se que há, então,  $2n_{PQ} + n_{PV}$  equações a serem resolvidas. Para tanto, utilizar-se-á o método de Newton-Raphson.

Para melhor entendimento da aplicação do método ao problema específico, pode-se reescrever as equações (3.18), para cada barra *PQ* e *PV* como:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i(V_k, \delta_k) = 0 \quad (3.19a)$$

E para as barras *PQ* tem-se também:

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i(V_k, \delta_k) = 0 \quad (3.19b)$$

Onde os subscritos *k* indicam que as funções  $P_i$  e  $Q_i$  dependem das tensões em todas as barras do sistema, não só da barra *i*. Pode-se escrever  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  em forma vetorial, como:

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{P}^{esp} - \mathbf{P}_i(V_k, \delta_k) = 0 \quad (3.20a)$$

Vetor este com dimensão  $(n_{pq} + n_{pv}) \times 1$ .

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{esp} - \mathbf{Q}_i(V_k, \delta_k) = 0 \quad (3.20b)$$

Vetor este com dimensão  $n_{pq} \times 1$ .

Pode-se definir, em analogia ao vetor  $\mathbf{D}$  composto pelos  $F_i(x)$ , definido na introdução ao método, outro vetor  $\mathbf{D}$  dos resíduos de potência, como:

$$D = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Definindo-se o vetor  $\mathbf{x}$  das incógnitas como:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \vdots \\ \delta_{n_{PV} + n_{PQ}} \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_{n_{PQ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Na suposição de que a barra 1 é a barra de referência, pode-se empregar o método iterativo de Newton-Raphson, resultando em:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (3.23)$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k)} = -[\mathbf{J}^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(k)} \quad (3.24)$$

Portanto, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k)} - [\mathbf{J}^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(k)} \quad (3.25)$$

A equação (3.25) representa o método de Newton-Raphson aplicado ao problema do fluxo de carga.

A matriz  $[\mathbf{J}^{(k)}]$  é a matriz jacobiana das equações (3.19), calculada em cada iteração. Explicitamente, tem-se:

$$\mathbf{J}' = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial \Delta P}{\partial \mathbf{V}} \right] \\ \left[ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \mathbf{V}} \right] \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Para facilitar a notação, é usual utilizar:

$$\mathbf{J}' = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V}} \right] \\ \left[ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} \right] \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Uma das características principais do método de Newton-Raphson e que se constitui numa grande desvantagem é o fato de que  $[\mathbf{J}']$  tem que atualizada e invertida a cada iteração. Em sistemas com muitas barras, em que a ordem de  $[\mathbf{J}']$  é grande, efetuar todas estas operações pode demandar um tempo de processamento excessivo.

Por isso, a fim de tornar menos onerosa a tarefa de construir  $[\mathbf{J}']$ , é usual utilizar uma notação alternativa, em que se substitui  $\Delta \mathbf{V}$  por  $\Delta \mathbf{V}/\mathbf{V}$ . Com isso, tem-se

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \mathbf{V}/\mathbf{V} \end{bmatrix}^{(k)} = -[\mathbf{J}^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (3.28)$$

Onde  $[\mathbf{J}]$  é a matriz jacobiana modificada.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} \right] & \left[ \mathbf{V} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V}} \right] \\ \left[ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \delta} \right] & \left[ \mathbf{V} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} \right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{J}_1] & [\mathbf{J}_2] \\ [\mathbf{J}_3] & [\mathbf{J}_4] \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

O motivo pelo qual se torna menos trabalhoso obter  $[\mathbf{J}]$  com a notação alternativa ficará evidente agora. Observe-se pela equação (3.25) que a matriz jacobiana é composta de quatro submatrizes, a saber:

1. Submatriz  $[\mathbf{J}_1] = \left[ \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \delta} \right]$

$$J_1(i, k) = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = \frac{\partial}{\partial \delta_k} [P_{Gi} - P_{Ci} - P_{Ti}] = -\frac{\partial P_{Ti}}{\partial \delta_k} = -V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (3.30)$$

$$J_1(i, i) = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \frac{\partial}{\partial \delta_i} [P_{Gi} - P_{Ci} - P_{Ti}] = -\frac{\partial P_{Ti}}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_k (-G_{ik} \text{sen} \delta_{ik} + B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (3.31)$$

$$J_1(i, i) = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \text{sen} \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) + V_i^2 B_{ii} \quad (3.32)$$

$$J_1(i, i) = Q_{Ti} + V_i^2 B_{ii}$$

$$(3.33)$$

$$2. \quad \text{Submatriz } [\mathbf{J}_2] = \left[ V \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial V} \right]$$

$$J_2(i, k) = V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_k \frac{\partial}{\partial V_k} [P_{Gi} - P_{Ci} - P_{Ti}] = -V_k \frac{\partial P_{Ti}}{\partial V_k} = -V_i V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} - B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) \quad (3.34)$$

$$J_2(i, i) = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_i \frac{\partial}{\partial V_i} [P_{Gi} - P_{Ci} - P_{Ti}] = -V_i \frac{\partial P_{Ti}}{\partial V_i} \quad (3.35)$$

$$J_2(i, i) = -V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) - V_i^2 G_{ii} \quad (3.36)$$

$$J_2(i, i) = -P_{Ti} - V_i^2 G_{ii} \quad (3.37)$$

$$3. \quad \text{Submatriz } [\mathbf{J}_3] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]$$

$$J_3(i, k) = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} = \frac{\partial [Q_{Gi} - Q_{Ci} - Q_{Ti}]}{\partial \delta_k} = -\frac{\partial Q_{Ti}}{\partial \delta_k} = V_i V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) \quad (3.38)$$

$$J_3(i, i) = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \frac{\partial [Q_{Gi} - Q_{Ci} - Q_{Ti}]}{\partial \delta_i} = -\frac{\partial Q_{Ti}}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{k=1, k \neq i}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) \quad (3.39)$$

$$J_3(i, i) = \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) + V_i^2 G_{ii} \quad (3.40)$$

$$J_3(i, i) = -P_{Ti} + V_i^2 G_{ii} \quad (3.41)$$

$$4. \quad \text{Submatriz } [\mathbf{J}_4] = \left[ V \frac{\partial Q}{\partial V} \right]$$

$$J_4(i, k) = V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = V_k \frac{\partial [Q_{Gi} - Q_{Ci} - Q_{Ti}]}{\partial V_k} = -V_k \frac{\partial Q_{Ti}}{\partial V_k} = -V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (3.42)$$

$$J_4(i, i) = V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = V_i \frac{\partial [Q_{Gi} - Q_{Ci} - Q_{Ti}]}{\partial V_i} = -V_i \frac{\partial Q_{Ti}}{\partial V_i} \quad (3.43)$$

$$J_4(i, i) = -V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} - B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) + V_i^2 G_{ii} \quad (3.44)$$

$$J_4(i, i) = -Q_{Ti} + V_i^2 G_{ii} \quad (3.45)$$

Observação: os índices  $i$  e  $k$  dos elementos da matriz jacobiana representam as barras do sistema, e não a posição dos elementos da matriz.

Concluído o cálculo dos elementos da matriz jacobiana, pode-se perceber a obtenção de uma simplificação muito importante, expressa nas equações (3.46 a) e (3.46 b).

$$J_1(i, k) = J_4(i, k) \quad (3.46a)$$

$$J_2(i,k) = - J_3(i,k) \quad (3.46b)$$

Esta simplificação decorre da notação alternativa utilizada e permite boa economia no tempo de processamento e gasto de memória do computador.

Depois de resolvido o problema iterativo de determinar  $V_i$  e  $\delta_i$  para todas as barras, passe-se ao cálculo de  $P_i$  para a barra de referência e de  $Q_i$  para as barras PV e de referência, completando o balanço de potência.

$$P_i = P_{Gi} - P_{Ci} = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (3.47a)$$

(Para a barra de referência)

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Ci} = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (3.47b)$$

(Para as barras PV e de referência)

### 3.2.3 – Critérios de Parada do Método de Newton-Raphson

Em geral, o critério utilizado é o do máximo desvio de potência ficar restrito dentro de uma tolerância, como:

$$\text{Máx} (|\Delta S|) \leq \varepsilon \quad (3.48)$$

### 3.2.4 - Número de Iterações, Convergência e Esforço Computacional do Método

O método de Newton-Raphson tem boas características de convergência desde que adotada uma razoável estimativa inicial das variáveis. Apresenta convergência quadrática perto da solução, isto é, quanto mais se aproxima da solução, mais rápido converge para ela. Longe da solução, no entanto, pode não haver convergência. O número de iterações necessário para a convergência do método é insensível a alguns fatores que podem causar problemas em outros métodos (como o de Gauss-Siedel), tais como a escolha do nó de referência, presença de capacitores série, elementos shunt, entre outros. Valores do número de iterações para sistemas típicos são da ordem de 3 a 5, adotando-se o critério de parada de  $\text{máx} (|\Delta S_i|) \leq 0,01$  pu.

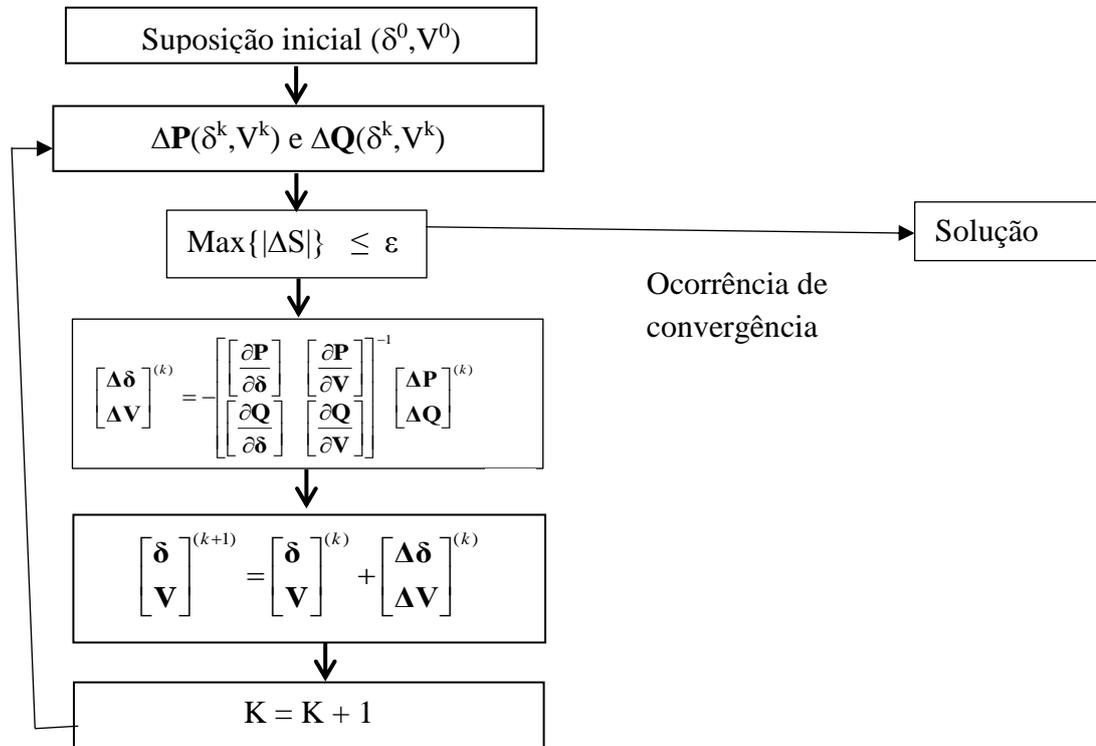
Uma desvantagem do método de Newton-Raphson como foi apresentado, é a necessidade de, em cada iteração, construir e inverter a matriz jacobiana. Na prática, a inversão é evitada através de técnicas de fatoração matricial. Além disso, técnicas de ordenação ótima das equações e armazenamento compacto da matriz jacobiana triangularizada permitem grande economia computacional, tanto em gasto de memória quanto na diminuição da quantidade de operações aritméticas necessárias, uma vez que se evita que o computador faça operações com elementos nulos.

Técnicas de desacoplamento e estratégias como manter a matriz jacobiana constante, ou só atualizá-lo de duas em duas iterações também podem ser úteis na economia de tempo e processamento. Ainda assim, a formação dessa matriz e a implementação das técnicas citadas consomem razoável memória, tempo de processamento e exige sofisticada programação. Mesmo utilizando a característica de esparsidade da matriz  $[J]$ , os gastos em memória são proporcionais a  $n$  ( $n$  = número de barras do sistema).

### 3.2.5 – Fluxograma do Método de Newton-Raphson

Abaixo na figura 3.3 está descrito o método de Newton-Raphson através de esquema de fluxograma.

Figura 3.3: Fluxograma do método de Newton-Raphson



Fonte: R. B. Gomes, Resolução do Problema do Fluxo de Cargas para Rede de Distribuição Utilizando o Método Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos [5].

### 3.3- Desacoplado Rápido

Embora o método de Newton-Raphson seja considerado confiável [11], este método possui uma desvantagem, a qual é a necessidade de inversão da matriz jacobiana a cada iteração, sendo um processo computacional lento, como forma de superar tal inconveniente, formulou-se o método Desacoplado rápido [12]. Tal método considera desprezíveis a influência da potência ativa com relação a tensão e a potência reativa com relação ao ângulo da tensão, dessa forma realizando-se as devidas manipulações na equação (3.28), a matriz simplifica-se de maneira a tornar as equações de tensão e ângulo de tensão conforme mostrado abaixo:

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} - [B'']^{-1} \Delta P / V^{(k)} \quad (3.49)$$

$$V^{(k+1)} = V^{(k)} - [B']^{-1} \Delta Q / V^{(k)} \quad (3.50)$$

Onde:

[B'] - matriz de susceptâncias [B] sem as linhas e colunas referentes à barra de referência;

[B''] - matriz susceptância [B] sem as linhas e colunas referentes às barras PV e de referência.

Dessa forma, percebe-se a diminuição do esforço computacional, uma vez que será necessário inverter duas matrizes cujos parâmetros são constantes. Entretanto tal método é

indicado para redes de transmissão em extra-alta tensão (EAT;  $V > 230$  kV) e ultra-alta tensão (UAT;  $V > 750$  kV), para um sistema de distribuição a metodologia do desacoplamento é pouco válida, pois em tais redes os valores da razão  $R/X$  são elevados, tornando assim mais intensas as relações  $PV-Q\delta$ . Como consequência tem-se a possibilidade do método não convergir para tais redes.

Com o objetivo de superar o referido obstáculo, foram elaboradas metodologias para modificações no algoritmo do método Desacoplado como encontradas em [5] e [6], as quais correspondem respectivamente ao método Desacoplado com rotação de eixos e Desacoplado com normalização complexa. Tais operações são feitas com base na escolha de um ângulo base que possui o intuito de reduzir o valor  $R/X$ , a ser aplicado na potência base seja através da técnica de rotação de eixos, ou através de normalização complexa.

### 3.4 - Desacoplado Rápido com Rotação de Eixo

#### 3.4.1 - Introdução

As aproximações e simplificações consideradas na elaboração do método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido, apresentadas no tópico anterior, estão associadas, principalmente, as relações entre reatâncias e resistências ( $R/X$ ) dos elementos da rede. As relações  $R/X$  das linhas de transmissão, por sua vez, dependem do tipo de cabo e do nível de tensão do sistema. Quanto mais alto o nível de tensão, maiores são as relações  $R/X$ , conseqüentemente, maior é o acoplamento  $P-\delta$ ,  $Q-V$ , ou seja, mais adequadas são as referidas aproximações.

Os sistemas de transmissão, onde os níveis de tensão são iguais ou superiores a 230kV, apresentam relações  $R/X$  geralmente inferiores a unidade, garantindo o bom desempenho dos métodos Desacoplados. No entanto, as linhas de transmissão dos alimentadores dos sistemas de distribuição, que envolvem tensões inferiores a 69kV, possuem relações muito baixas, podendo ser inferiores a unidade. Portanto, os métodos Desacoplados, na sua forma convencional, não podem ser aplicados a sistemas de distribuição.

A técnica de rotação utilizada nesse trabalho foi proposta em meados da década de 80, conforme usada em [5] e consiste basicamente em mudar o sistema de referência complexo através de uma rotação dos eixos real e imaginário, de modo que as impedâncias representadas no novo sistema de referência possuam relação  $R/X$  favorável ao desacoplamento adotado pelo método de fluxo de potência Desacoplado rápido.

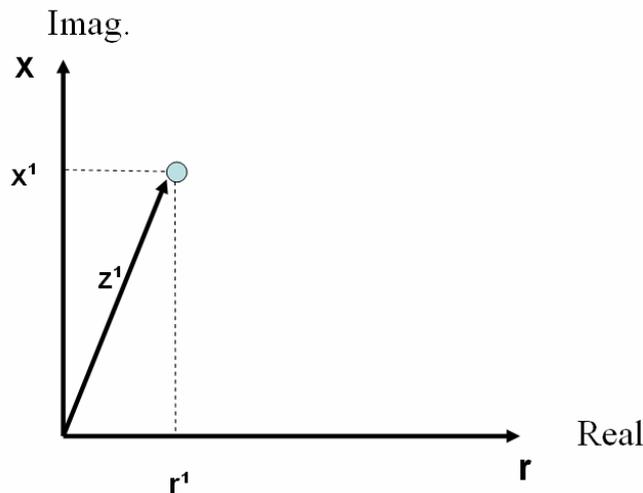
Neste tópico a técnica proposta é baseada na idéia de rotação dos eixos complexos, possibilitando, assim, a adequação da relação  $R/X$  de forma similar à rotação de eixos.

Finalmente, esse tópico apresenta a metodologia proposta nesse trabalho de um fluxo de potência unificado para redes de transmissão interconectadas a alimentadores de distribuição, através da aplicação da normalização complexa, ou rotação de eixos, aos elementos dos alimentadores, permitindo a utilização dos métodos de Newton e suas variações desacopladas.

### 3.4.2- Relações R/X Típicas em Sistemas de Transmissão e Distribuição

As linhas de transmissão dos sistemas de distribuição, ao contrário daquelas presentes em sistemas de transmissão, apresentam, tipicamente, valores de resistência série de ordem equivalente, ou mesmo superiores aos seus valores de reatância série. A Figura 3.4 ilustra a representação gráfica de uma impedância série típica de uma linha de transmissão de um sistema de alta tensão. Nesta é possível perceber que o valor da resistência  $r$  ( $\Omega$  ou p.u) é muito pequeno em relação ao valor da reatância  $x$  ( $\Omega$  ou p.u). Essas características das redes de alta tensão implicam em um forte acoplamento entre a abertura angular e o fluxo de potência ativa e, também, entre a diferença de potencial e a potência reativa, resultando no conhecido desacoplamento P $\delta$ -QV.

Figura 3.4: representação gráfica da impedância típica de alta tensão



Fonte: T. Loddi, cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de newton Desacoplado rápido com rotação de eixos. [29].

Valores típicos de relação R/X para sistemas de transmissão e distribuição em função do cabo utilizado são apresentados na tabela 3.1.

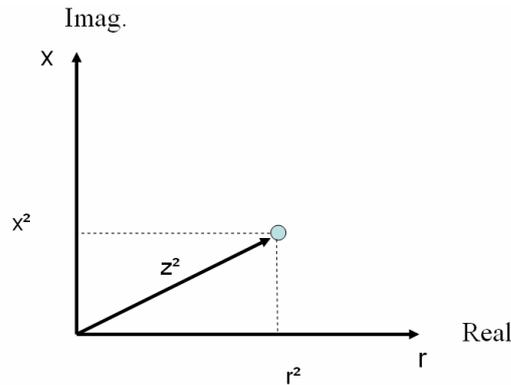
Tabela 3.1: Valores típicos da relação R/X para transmissão e distribuição

Cabos utilizados na rede de transmissão			Cabos utilizados na rede de distribuição		
Tipo	Bitola	R/X	Tipo	Bitola	R/X
Cobre	450 MCM a 9000 MCM	0,29 a 0,17	Cobre	6 AWG a 300 MCM	3,13 a 0,33
Alumínio com alma de aço	556,5 MCM a 1,75 pol	0,41 a 0,21	Alumínio sem alma de aço	4 AWG a 336,4 MCM	3,2 a 0,51

Fonte: T. Loddi, cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de newton Desacoplado rápido com rotação de eixos. [29].

Na Figura 3.5 está ilustrada graficamente uma impedância série típica de um alimentador de um sistema de distribuição. Neste caso percebe-se que o valor da resistência  $r$  ( $\Omega$  ou p.u) e da reatância  $x$  ( $\Omega$  ou p.u) tem proporções equivalentes, impedindo a aplicação das técnicas de desacoplamento adotadas pelos métodos Desacoplados.

Figura 3.5: Representação gráfica de impedância de media tensão



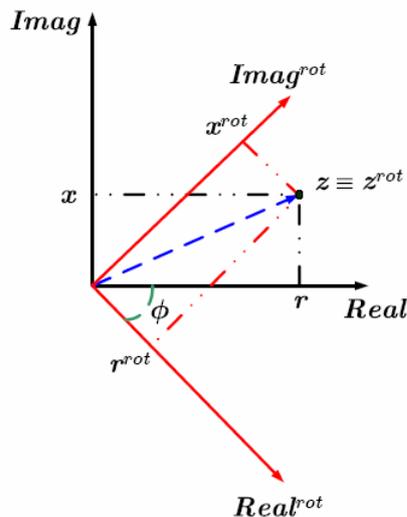
Fonte: T. Loddi, cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de newton Desacoplado rápido com rotação de eixos. [29].

### 3.4.3 - Rotação de Eixos Complexos

Como já dito anteriormente, os sistemas de distribuição possuem linhas com valores de reatância e resistência séries de ordem equivalentes e que podem chegar, em alguns casos, em relações  $x/r$  inferiores à unidade..

Seja a impedância  $z = r + jx$ , representada no plano complexo (Real, Imag), conforme a figura 3.6:

Figura 3.6: Rotação de eixos de uma impedância de Baixa Tensão.



Fonte: T. Loddi, cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de newton Desacoplado rápido com rotação de eixos. [29].

A rotação de eixos [5] consiste em mudar o sistema de referência complexo da rede em estudo através de uma rotação de eixos real e imaginário. Na figura 3.6 existe outro plano (*Real rot*, *Imag rot*), rotacionado de um ângulo  $\phi$  em relação ao primeiro. Neste, o ponto correspondente à impedância  $z$  torna-se  $Z^{rot} = r^{rot} + jx^{rot}$ .

Sendo assim devido a rotação:

$$z^{rot} = r^{rot} + jx^{rot} = ze^{j\phi} \quad (3.51)$$

De onde aplicando a relação de Euler:

$$r^{rot} = r\cos\phi - x\sin\phi \quad (3.52a)$$

$$x^{rot} = r\sin\phi + x\cos\phi \quad (3.53b)$$

Sendo todos os ramos rotacionados de um mesmo ângulo  $\phi$ , a relação R/X de cada ramo passa a ser:

$$\frac{r^{rot}}{x^{rot}} = \frac{r\cos\phi - x\sin\phi}{r\sin\phi + x\cos\phi} \quad (3.54)$$

Trabalhando com esse novo sistema de referência, é possível obter relações R/X que sejam mais favoráveis à aplicação do método Desacoplado rápido, dependendo do ângulo de rotação  $\phi$ . No entanto, para evitar a necessidade de uma aplicação de um processo de “desrotação” aos estados da rede, é preciso que se mantenha o mesmo estado de operação da rede original, isto é, as mesmas magnitudes e ângulos de tensão em cada barra da rede fictícia. Para que isso aconteça, é necessário rotacionar também as injeções de potência ativa e reativa. Sendo assim, das relações:

$$S = V_x I^* \quad (3.76)$$

$$I = V/Z \quad (3.77)$$

Tem-se após substituir  $Z$  por  $Z^{rot}e^{-j\phi}$ :

$$I = V/(Z^{rot}e^{-j\phi}) \quad (3.78)$$

Podemos observar da equação (3.78) que, se for aplicada uma rotação de mesmo ângulo nas correntes, mas de sentido oposto à aplicada as impedâncias, as tensões complexas serão as mesmas do sistema original.

$$I^{rot} = Ie^{-j\phi} = V/Z^{rot} \quad (3.79)$$

Assim, para a potência complexa, tem-se:

$$S^{rot} = V^{(rot)*} \quad (3.80)$$

Ou

$$S^{rot} = S e^{j\phi} \quad (3.81)$$

Ou seja, as potências são rotacionadas de maneira idêntica às impedâncias, daí tem-se:

$$P^{rot} = P \cos\phi - Q \sin\phi \quad (3.82a)$$

$$Q^{rot} = P \sin\phi + Q \cos\phi \quad (3.82b)$$

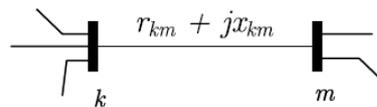
Desse modo, após a aplicação da rotação de eixos aos valores especificados de potência ativa e reativa, bem como aos valores de impedância série, tem-se uma nova rede fictícia para qual o método Desacoplado rápido obtém um bom desempenho e o estado fornecido (tensões complexas) é o mesmo que o da rede original. Após a resolução do problema, aplica-se uma rotação inversa às grandezas de interesse, obtendo então o resultado final, ou seja, os valores reais da rede.

#### 3.4.4 - Cálculo do Ângulo de Rotação

A metodologia para se encontrar o ângulo de rotação para o método Desacoplado com rotação de eixos é baseado em [5], neste trabalho denomina-se o método como rotação ótima de eixos. Tal algoritmo é muito eficiente para redes de pequeno porte, porém a medida que aumenta-se o tamanho do sistema, o desempenho do método Desacoplado modificado tende a tornar-se menos satisfatório [5].

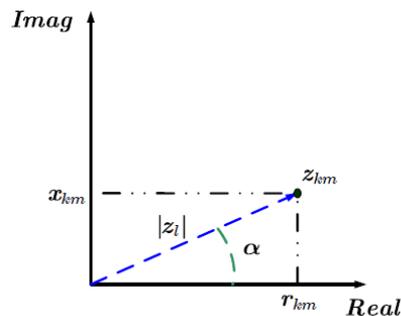
Sejam duas barras  $k$  e  $m$  e um ramo  $l$  conectando-as. Este ramo tem uma impedância  $Z_{km} = r_{km} + jx_{km}$ , como mostrado na figura 3.7, também ilustra-se na figura 3.8 uma representação fasorial da impedância da linha genérica  $l$ .

Figura 3.7: Representação de ligação barra ramo.



Fonte: R. B. Gomes, Resolução do Problema do Fluxo de Cargas para Rede de Distribuição Utilizando o Método Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos [5].

Figura 3.8: Representação fasorial da impedância da linha  $l$ .



Fonte: R. B. Gomes, Resolução do Problema do Fluxo de Cargas para Rede de Distribuição Utilizando o Método Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos [5]. [5] modificado.

Considere-se que a relação R/X do ramo l é alta (fato comum para redes de distribuição), do plano complexo da figura 3.9 mostrada, tem-se:

$$z_l = r_{km} + jx_{km} = ||z_l||e^{-j\alpha} \quad (3.83a)$$

$$||z_l|| = \sqrt{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3.83b)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{x_{km}}{r_{km}}\right) \quad (3.83c)$$

Adotando as seguintes aproximações, em geral válidas para redes elétricas:

- As tensões  $V_k$  são muito próximas da unidade (em p.u.);
- $\theta_{km}$  é pequeno, de tal forma que  $\cos \theta_{km}$  é muito próximo da unidade;
- $B_{km}$  é, em magnitude, muito maior que  $G_{km}\text{sen}\theta_{km}$ .

Aplicando essas simplificações às equações (3.37) e (3.41), chega-se a (desprezando, para efeito de simplificação nas deduções, os transformadores):

$$j2 = -g_{km} \quad (3.84a)$$

$$j3 = g_{km} \quad (3.84b)$$

Também aqui, a idéia é garantir o mínimo acoplamento entre as variáveis  $PV$  e  $Q\delta$ . O ângulo procurado deve minimizar as matrizes  $\mathbf{j2}^{\text{rot}}$  e  $\mathbf{j3}^{\text{rot}}$ . Portanto busca-se as condições para que essas matrizes sejam nulas. Observando (3.84a) e (3.84b), vê-se que, para satisfazer o critério de desacoplamento, faz-se necessário:

$$g_{km} \approx 0 \Rightarrow r_{km} \approx 0 \quad (3.85)$$

Deve-se, para isso, rotacionar os eixos de um ângulo  $\phi$  de tal forma que, após a rotação, tenhamos, para o ramo l,  $r_{km}^{\text{rot}} = 0$ . Este cálculo é orientado a ramo. Dessa forma, de acordo com a figura 3.9, formula-se:

$$\delta_l = 90^\circ - \alpha \quad (3.86)$$

Por ser orientado a ramo, conclui-se que será encontrado um respectivo valor para o ângulo de rotação para cada outro ramo da rede. Sendo o objetivo um único ângulo para toda a rede, aplica-se um critério de minimização de erros para calculá-lo. Utilizando a técnica dos mínimos quadrados:

$$\text{Min}\{f_l = \sum_{l=1}^{nr} (\phi - \delta_l)^2\} \quad (3.87)$$

Aplicando a condição de otimalidade:

$$\frac{df_l}{d\phi} = 0 \Rightarrow \sum_{l=1}^{nr} 2(\phi - \delta_l) = 0 \quad (3.88)$$

Finalmente, o ângulo procurado é:

$$\phi = \frac{1}{NR} \sum_{l=1}^{nr} \delta_l \quad (3.89)$$

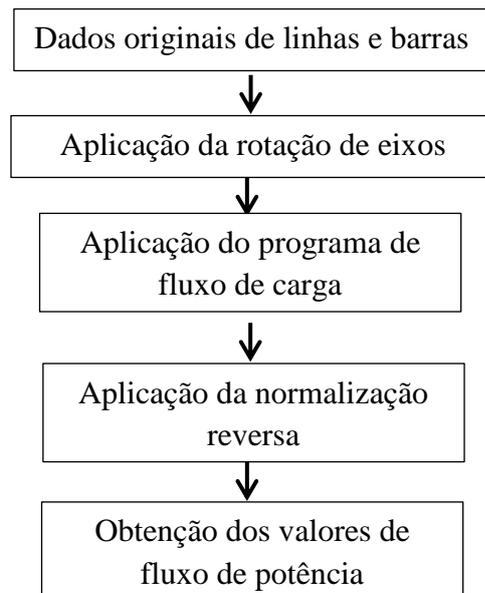
Este é o ângulo a ser utilizado para rotacionar as impedâncias e potências complexas da rede em estudo. É uma média aritmética dos ângulos que seriam utilizados para rotacionar os respectivos ramos, caso fossem tratados em separado, como no início da demonstração. Esta média simples é um resultado trivial da aplicação dos mínimos quadrados, uma vez que não se utiliza pesos diferentes para os ramos.

O resultado é intuitivamente confortável. Chega-se, assim, a um cálculo simples, que fornece um único valor para a rotação de toda a rede, baseado em um critério de otimização. É interessante notar que a expressão (3.89) aparece anteriormente em [5]. Essa referência também aborda o aperfeiçoamento do MDR para relações R/X desfavoráveis, porém a sua proposta é baseada em análise heurística para minimizar o acoplamento entre as partes ativa e reativa, sendo este um conceito bastante diferente da técnica de rotação de eixos.

### 3.4.5- Fluxograma

Abaixo na figura 3.9 está descrito o método Desacoplado com rotação de eixos através de esquema de fluxograma.

Figura 3.9: Fluxograma do método Desacoplado com rotação de eixos



Fonte: O autor

## 3.5- Desacoplado Rápido com Normalização Complexa

### 3.5.1- Introdução

O método Desacoplado com normalização complexa [6] propõe uma generalização na normalização por unidade, a qual denomina-se normalização por unidade complexa (cpu), o qual possui o objetivo de melhorar o desempenho do método Desacoplado rápido quando utilizado para sistemas de distribuição. Tal abordagem leva em consideração as recentes tendências já enfrentadas pelas redes de distribuição, como alta penetração de fontes de geração e interconexões entre alimentadores, além disso leva-se em conta o alto valor da razão R/X das

linhas de tais redes. Essas características representam inconveniências para o tradicional método Desacoplado rápido.

A principal fundamentação da normalização complexa é centrada no uso de uma potência base complexa, a qual tem capacidade de superar os problemas numéricos ocorridos pelo alto valor R/X dos alimentadores de distribuição. Como resultado, após utilização da metodologia proposta, o método de fluxo de carga Desacoplado rápido pode ser aplicado com alta eficiência em sistemas de distribuição.

### 3.5.2- Normalização por Unidade Complexa

Tradicionalmente, os parâmetros e variáveis do sistema de potência são utilizados, após esses serem normalizados em por unidade (p.u), onde são escolhidos valores reais para potência e tensão base. Tal procedimento é realizado com o objetivo de simplificar cálculos numéricos em estudos elétricos, como o fluxo de carga. A normalização cpu pode ser entendida como uma extensão do conceito da normalização convencional, dessa inicialmente adota-se uma potência base complexa como mostrado na equação abaixo:

$$\dot{S}_{base} = ||\dot{S}_{base}|| e^{-j\delta_{base}} \quad (3.90)$$

A tensão base, todavia, mantém-se real e definida da mesma forma daquela utilizada na normalização convencional, ou seja, um valor de magnitude diferente (mas relacionado) é adotado para cada nível de tensão:

$$\dot{V}_{base} = ||\dot{V}_{base}|| e^{-j0} = V_{base} \quad (3.91)$$

De acordo com as equações (3.90) e (3.91), a impedância base também será complexa, com o mesmo ângulo base aplicado à potência base, como demonstrado abaixo:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = ||\dot{Z}_{base}|| e^{-j\delta_{base}} \quad (3.92)$$

Dessa forma os valores de impedância após normalização cpu, podem ser determinados através de:

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R(\Omega) + jX(\Omega)}{\dot{Z}_{base}} = \frac{\dot{Z}(\Omega) e^{j\delta}}{||\dot{Z}_{base}|| e^{-j\delta_{base}}} = ||\dot{Z}_{pu}|| e^{j(\delta_{base} + \delta)} \quad (3.93)$$

A magnitude da impedância base é a mesma, independente da normalização ser de maneira convencional ou complexa. No entanto, na cpu o ângulo da impedância base varia, devido à influência do ângulo de base da potência na normalização, como mostrado em 3.93. Assim os valores normalizados de resistência e reatância podem ser encontrados como:

$$r_{cpu} = ||Z_{pu}|| \cdot \cos(\delta + \delta_{base}) \quad (3.94)$$

$$x_{cpu} = \|Z_{pu}\|.sen(\delta + \delta_{base}) \quad (3.95)$$

Ao se operar a razão de  $x_{cpu}$  por  $r_{cpu}$ , obtém-se uma expressão na qual pode se observar a capacidade de manipulação dos valores R/X da rede:

$$\frac{x_{cpu}}{r_{cpu}} = tg(\delta + \delta_{base}) \quad (3.96)$$

A relação expressa acima mostra que através de uma adequada escolha do valor  $\phi$ , pode-se obter valores R/X pequenos, tal característica permite uma utilização eficiente do método Desacoplado rápido para sistemas de distribuição.

Uma vez que os valores de resistência e reatância tenham sido alterados de acordo com a equação 3.94 e 3.95, para que se mantenha o estado original da rede, ou seja, conservar as tensões complexas das barras, as injeções de potência ativa e reativa também devem ser alteradas.

$$\dot{S}_{cpu} = \frac{\dot{S}(VA)e^{j\delta}}{\|\dot{S}_{base}\|e^{-j\delta_{base}}} = \|\dot{S}_{pu}\|e^{j(\delta_{base} + \delta)} \quad (3.97)$$

$$\dot{S}_{cpu} = (P_{pu} + jQ_{pu}) e^{j\delta_{base}} \quad (3.98)$$

As injeções de potência ativa e reativa na nova representação normalizada passam a ser calculadas por:

$$P_{cpu} = \|S_{pu}\|.cos(\delta + \delta_{base}) \quad (3.99)$$

$$Q_{cpu} = \|S_{pu}\|.sen(\delta + \delta_{base}) \quad (3.100)$$

Para mostrar que a solução do fluxo de carga não é afetada pela normalização cpu, a corrente base é apresentada abaixo:

$$I_{base} = \frac{V_{base}}{\|\dot{Z}_{base}\|e^{-j\delta_{base}}} = \|\dot{I}_{base}\|e^{j\delta_{base}} \quad (3.101)$$

$$\dot{i}_{cpu} = \frac{\|\dot{I}_A\|e^{j\beta}}{\|\dot{I}_{base}\|e^{j\delta_{base}}} = \|\dot{I}_{pu}\|e^{j(\beta - \delta_{base})} \quad (3.102)$$

Substituindo-se as equações 3.97 e 3.102 na equação  $\dot{S} = \dot{V}\dot{I}^*$ , chega-se a equação (3.103), a qual assegura que as variáveis de estado sejam as mesmas, independentemente da normalização.

$$\dot{V}_{cpu} = \frac{\|\dot{S}_{pu}\|e^{j(\delta_{base} + \delta)}}{\|\dot{I}_{pu}\|e^{-j(\beta - \delta_{base})}} = \|\dot{I}_{pu}\| e^{j(\beta - \delta_{base})} = \|\dot{V}_{pu}\|e^{j(\delta + \beta)} = \dot{V}_{pu} \quad (3.103)$$

Donde se conclui que a aplicação da normalização cpu em uma rede implica em valores de tensões complexas das barras idênticos aos valores resultantes do emprego da normalização convencional, ou seja, os estados do sistema encontrado por ambas as normalizações são equivalentes.

A metodologia de normalização cpu pode ser aplicada a programas de fluxo de carga pré-existentes, ou ainda essa pode ser incorporada a algoritmos de rotina de fluxo de carga. No entanto é importante enfatizar que quando tal normalização é aplicado a programas de fluxo de carga pré-existentes, a abordagem apresentada não afeta o algoritmo principal de fluxo de carga, desde que a normalização cpu ocorra apenas em estágios de pré e pós-processamento do fluxo de carga. Nesse caso, os valores finais de fluxo de potência ativa e reativa podem ser obtidos facilmente através de uma normalização reversa

### 3.5.3 - Cálculo do Ângulo Base

A abordagem utilizada neste tópico [6] é baseada na evidência de que, quanto menor o valor R/X melhor será o desempenho do método Desacoplado rápido com rotação de eixo (desde que seja maior o desacoplamento  $P\delta - QV$ ).

Dessa forma a escolha de um ângulo de rotação deve ser guiado pelo valor original do valor R/X das linhas de distribuição do sistema que estiver sendo utilizado em cada fluxo de carga. O primeiro passo do método proposto é achar a média aritmética dos diferentes valores de x/r do sistema de distribuição, como mostrado em (3.104).

$$\alpha_{avg} = \sum_{i=1}^n \frac{\arctg(x_i/r_i)}{n} \quad (3.104)$$

Ainda assim, alguns sistemas de distribuição podem exibir diferenças grandes dos valores de x/r de um tipo de linha para outro. Em alguns casos, o valor da média aritmética entre o valor máximo e mínimo de x/r pode ser feito como mostrado na equação (3.105) ou também como mostrado em (3.106).

$$\gamma_{avg} = \frac{\arctg\left(\frac{x}{r}\right)_{MAX} + \arctg\left(\frac{x}{r}\right)_{min}}{2} \quad (3.105)$$

A média aritmética dos dois ângulos dados pelas equações (3.104) e (3.105) fornece uma condição melhor para se encontrar o ângulo de rotação. Como mencionado antes a determinação do ângulo requerido é guiado pelo perfeito desacoplamento, o que está implícito em (3.106):

$$\delta^{rot} = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{avg} + \gamma_{avg}}{2} \quad (3.106)$$

Outra influência que ocorre na determinação do ângulo de rotação é o fator de potência das cargas. Com o objetivo de contrabalancear o efeito do baixo fator de potência das cargas, uma correção adicional pode ser aplicada ao ângulo de rotação como mostrado em (3.107):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l \cos(\arctg(Q_i/P_i))}{l} \quad (3.107)$$

Dessa forma, o ângulo de rotação final pode ser alcançado através da aplicação conjunta das equações (3.104) a (3.107), como mostrado abaixo:

$$\delta^{rot} = \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{avg} + \gamma_{avg}}{2} \right) (1 + \varepsilon) \quad (3.108)$$

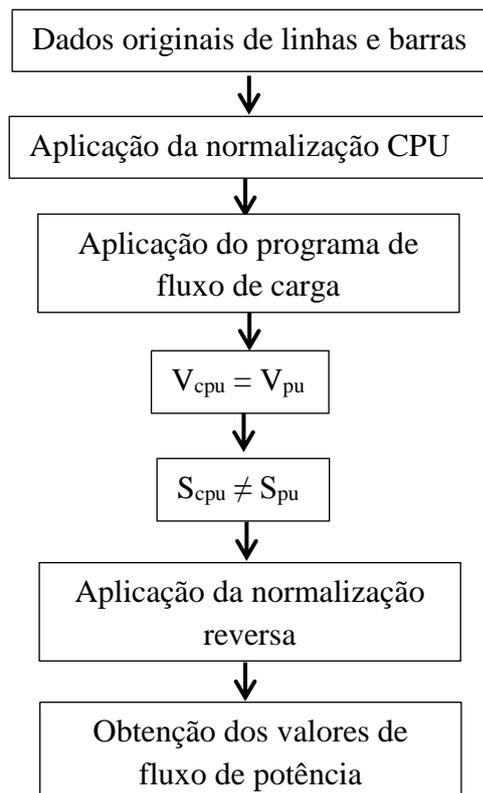
A equação (3.108) leva a uma simples, mas efetiva forma de se determinar um ângulo de rotação adequado. É importante de se notar que para redes com baixa variação do valor R/X e cargas com fator de potência elevado, a determinação do ângulo final se torna até mais simples, considerando-se nesse caso  $\alpha_{avg} \approx \gamma_{avg}$  e  $\varepsilon \approx 0$ .

Além disso pequenas variações na configuração (ou carregamento) da rede geralmente não produzem impactos consideráveis no ângulo base. Considerando este fato, uma avaliação exaustiva de fluxo de carga pode ser realizada, com objetivo de se obter o ângulo de rotação perfeito. E assim este poder ser mantido como ângulo de rotação constante.

### 3.5.4- Fluxograma

Abaixo na figura 3.10 está descrito o método Desacoplado com normalização complexa através de esquema de fluxograma.

Figura 3.10: Fluxograma do método Desacoplado com normalização complexa.



Fonte: O autor.

### 3.5.5 – Aspectos Computacionais dos Métodos Desacoplados

A convergência dos métodos Desacoplados é mais lenta que a do método tradicional, sendo esta característica, no entanto, compensada pela rapidez das iterações.

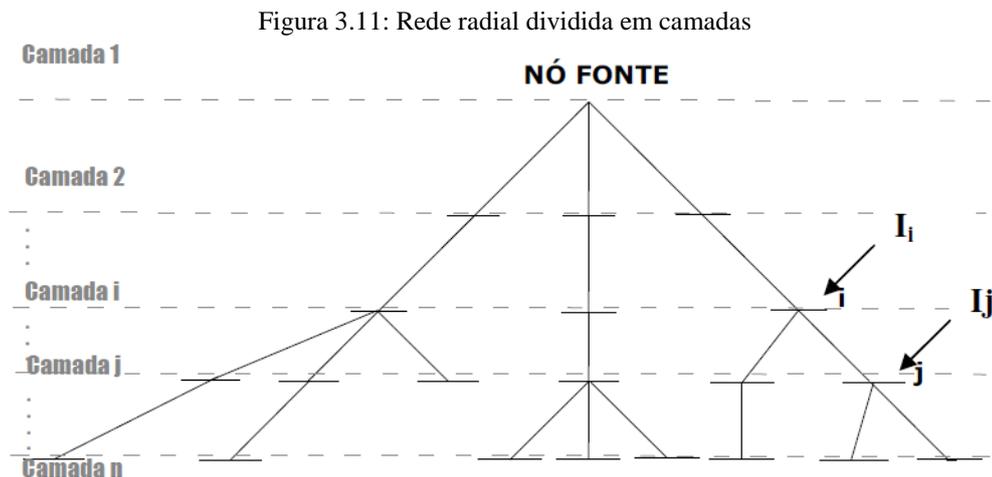
A convergência do método Desacoplado rápido é geométrica, levando, para sistemas típicos, 4 a 7 iterações para convergir, independentemente do número de barras do sistema. Levando em conta que o tempo de duração de uma iteração do método Desacoplado corresponde, em média, a 1/5 do tempo de uma iteração do método de Newton-Raphson, que os gastos com memória são cerca de 40% menores e que a dificuldade na implementação dos programas diminui sensivelmente, pode-se concluir que os métodos Desacoplados, principalmente o método Desacoplado rápido, oferecem boas vantagens sobre todos os demais até hoje implementados.

### 3.6 – Somatório de Corrente (Backward/ Forward Sweep).

#### 3.6.1 - Introdução

O Método Somatório de correntes soluciona o problema de fluxo de potência em redes radiais com a aplicação direta das leis de Kirchoff das correntes e das tensões. Diferentemente dos métodos clássicos nodais usados para redes radiais de distribuição, este algoritmo é orientado por ramos divididos em camadas. A numeração de todos os ramos de um novo nível só inicia quando todos os ramos da camada anterior tenham sido numerados. Deve ser uma numeração simples e direta, começando do ramo mais distante até a barra fonte da subestação.

A figura 3.11 apresenta uma rede radial típica de distribuição com  $n$  nós e  $n-1$  ramos. A definição de cada camada pode ser vista nesta figura pelas linhas horizontais tracejadas e numeradas a partir da barra fonte da subestação. Em cada camada, os ramos podem assumir uma numeração crescente até atingirem os ramos terminais da rede de distribuição. Esta numeração é conveniente para efeito de programação, porém outros esquemas de numeração podem ser utilizados.



Fonte: M. E. L, Tostes, Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em consumidores em baixa tensão. [30].

#### 3.6.2 – Descrição Geral do Método

O algoritmo geral do método somatório de corrente é composto por duas etapas básicas, a varredura – *backward* – na qual se calculam as correntes ou fluxos de potência com os possíveis dados de tensão e corrente de iterações anteriores, na segunda etapa tem-se a varredura – *forward* – onde se realiza cálculos para a obtenção dos dados das quedas de tensão

com as atualizações das correntes ou fluxos de potência. As duas etapas são repetidas até que se consiga a convergência do método.

A resolução do método se inicia com a determinação do valor de tensão em todas as barras do sistema de distribuição, usualmente define-se como sendo a tensão da subestação. Após essa pré-definição das tensões as correntes de carga de cada barra são calculadas.

É realizado o somatório das correntes de carga, partindo-se das últimas barras de cada ramo (processo *Backward*), até a chegada à barra da subestação, encontrando a corrente total da rede de distribuição.

Dessa forma, com a utilização dos valores das correntes dos ramos e iniciando na subestação calculam-se os novos valores das tensões em todas as barras do sistema (processo *forward*). Em seguida refaz-se o cálculo das correntes do sistema.

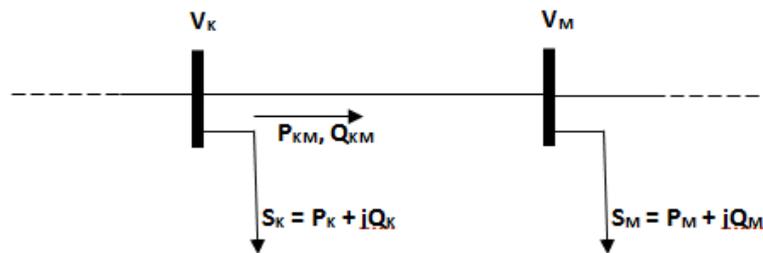
Tal processo é repetido até que se obtenha a convergência ou algum critério de parada seja satisfeito, como por exemplo um número máximo de iterações admissíveis. Nesse trabalho será utilizado como critério de parada as variações dos módulos das tensões e dos valores das fases das tensões de cada barra do sistema em duas iterações consecutivas, ou seja, quando a subtração entre duas iterações dos módulos das tensões e dos ângulos das tensões for menor que um erro mínimo pré-estabelecido.

### 3.6.3 – Determinação da Corrente das Cargas

Pode-se ver na figura 3.12 abaixo, duas barras de uma rede de distribuição radial. Dessa forma, a carga da barra  $k$  é caracterizada como  $S_k = P_k + jQ_k$  e a expressão para a tensão fasorial em cada barra é representada por  $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$ . Portanto a corrente de carga é dada por:

$$I_k = (S_k/V_k)^* - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (3.109)$$

Figura 3.12: Ramo de uma rede de distribuição.



Fonte: M. R. Carvalho, Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial. [31]

Fazendo-se  $I_k = I_{kr} + jI_{ki}$ , e igualando com a relação anterior podemos separar as componentes real e imaginária da corrente da carga ou seja:

$$I_{kr} = R\{I_k\} \quad (3.110a)$$

$$I_{ki} = I\{I_k\} \quad (3.110b)$$

### 3.6.4 – Varredura Reversa.

A etapa do algoritmo denominada varredura reversa se trata do somatório das correntes das cargas para a obtenção das correntes dos ramos. Assim iniciando-se nas últimas barras de cada ramo, desloca-se em direção a subestação, calcula-se então a corrente em cada ramo  $I_{km}$  da seguinte forma:

$$I_{km} = I_m + \sum_{j \in F_m} I_{mj} \quad (3.111)$$

Onde  $F_m$  é o conjunto das barras alimentadas pela barra  $m$  e  $I_m$  corresponde a corrente de malha somada às correntes shunt que existirem na proximidade da malha.

A exemplo da corrente de carga, a corrente de ramos pode ser dividida em parte real e imaginária como mostrado abaixo nas equações 3.112:

$$I_{kmr} = R\{I_{km}\} \quad (3.112a)$$

$$I_{kmi} = I\{I_{km}\} \quad (3.112b)$$

### 3.6.5 – Varredura Direta.

Iniciando-se da subestação e deslocando-se no sentido das últimas barras de cada ramo, as tensões das barras são calculadas da seguinte forma:

$$V_m = V_k - Z_{km} \cdot I_{km} \quad (3.113)$$

Onde:

$$Z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (3.114)$$

Que também pode ser separada na parte real e imaginária, da seguinte maneira:

$$V_{kmr} = R\{V_{km}\} \quad (3.115a)$$

$$V_{kmi} = I\{V_{km}\} \quad (3.115b)$$

Deduz-se facilmente da relação anterior que:

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km} I_{kmr} + x_{km} I_{kmi} \quad (3.116a)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km} I_{kmi} + x_{km} I_{kmr} \quad (3.116b)$$

### 3.6.6 – Método Aplicado à Redes de Distribuição com Geração Distribuída

Para redes de distribuição ativas, ou seja, com a presença de geração distribuída em uma ou mais barras do sistema pode-se considerar essas como barras PQ ou P. No primeiro caso, considera-se que a GD tem um controle de fator de potência na qual as potências ativas e reativas geradas são mantidas constantes, com a tensão de saída não sendo controlada.

No que se refere ao algoritmo para a implementação de redes com barras de geração PQ, determina-se inicialmente as potências ativas e reativas a serem fornecidas ao sistema, após isso para aquela barra com GD, subtrai-se da carga ativa e reativa as potências ativas e reativas respectivamente, no caso da existência de consumidores naquela barra, se isso não for verdadeiro a potência gerada é inserida nos dados de potências demandadas, porém com sinal negativo.

Para o caso de se considerar a geração distribuída com barras PV, para essas procede-se a subtração da potência da carga pela potência fixa gerada pela barra, como descrito acima, porém é necessário fazer a injeção de corrente reativa para que as tensões nessas barras PV obtenham no final do fluxo de carga módulo igual ao módulo de tensão já estabelecido para essas barras, tal método é semelhante ao utilizado em [8] e será explicado a seguir.

Encontra-se a corrente reativa  $I_q$  para cada barra PV para que a magnitude de tensão  $V$  dessas barras se torne igual a magnitude já estabelecida. Uma vez que a relação entre  $I_q$  e  $V$  não é linear, a referida corrente somente poderá ser obtida iterativamente. Uma matriz de sensibilidade para nós PV é criada para aproximar a relação não linear entre  $V$  e  $I_q$ .

A relação incremental entre a magnitude de tensão e a magnitude da corrente reativa é expressa por:

$$[Z_V] [I_q]^{(k)} = [\Delta V]^{(k)} \quad (3.117)$$

Onde  $[\Delta V]$  é uma matriz coluna, cujas linhas são iguais ao número de barras PV, dessa forma essa matriz corresponde em cada linha a subtração do módulo da tensão desejado para as barras PV e o módulo que foi realmente obtido ao final de uma iteração para cada barra PV a qual a linha  $i$  de  $[\Delta V]$  se refere, a diferença, onde  $[Z_V]$  é uma matriz constante real referente a matriz de sensibilidade para barras PV.

A matriz  $Z_V$  é quadrada e sua dimensão também é igual ao número de barras PV. Os elementos  $z_{ii}$  da diagonal principal correspondem ao módulo da soma das impedâncias em cada trecho do sistema de distribuição entre o nó PV e o nó da subestação. Quanto aos elementos fora da diagonal principal, o valor de cada  $z_{ij}$  dependerá do caminho que as barras PV  $i$  e  $j$  compartilham ou não até o nó de subestação, caso não haja trechos em comum entre os nós  $i$  e  $j$  até a subestação então  $z_{ij} = 0$ , se por outro lado as barras  $i$  e  $j$  compartilhem um trecho em comum até o nó raiz então  $z_{ij}$  será igual a soma do módulo das impedâncias desse caminho em comum até a subestação.

Devido a necessidade de se inverter a matriz  $[Z_v]$ , para a obtenção de  $[I_q]$ , torna-se conveniente o uso de técnicas de fatoração como a LU, antes que qualquer iteração de fluxo de carga aconteça, com objetivo de diminuir custos computacionais, devido ao fato já conhecido que a inversão de matrizes é um comando de execução lenta em linguagens de programação e computacionalmente oneroso.

Sendo assim o processo iterativo para a correção da magnitude de tensão para cada barra PV é feito da seguinte maneira:

1. Calcula-se o erro para todas as barras PV, como se vê abaixo:

$$\Delta V_i^{(k)} = |V_i^{esp}| - |V_i^{(k)}| \quad (3.118)$$

Onde  $V_i^{esp}$  corresponde a tensão especificada para a barra a barra PV  $i$  e  $V_i^{(k)}$  é a tensão obtida no final da iteração  $k$  para a mesma barra PV.

2. Obtém-se para cada nó PV a injeção de corrente reativa com a utilização da equação 3.96. Tal método provê uma aproximação linear da injeção de corrente puramente imaginária necessária para eliminar a magnitude do erro entre a tensão programada e a realmente obtida no final de cada iteração. Uma vez que na realidade a capacidade de geração de potência reativa de um gerador é sempre limitada, esse limite de geração de reativos deve ser observado em cada iteração, com o objetivo de verificar se é possível na iteração  $k$  adicionar a corrente reativa no sistema sem que os referidos limites sejam ultrapassados.
3. Calcula-se então a requerida potência reativa gerada  $Q_G$  para todas as barras PV, como mostrado abaixo:

$$Q_{Gi} = Q_i'^{(k)} + Q_{ic} \quad (3.119)$$

Onde  $Q_{ic}$  corresponde a carga reativa que estiver presente na barra PV  $i$  e  $Q_i'^{(k)}$  é a nova injeção de potência reativa para o mesmo nó  $i$ , que é calculada usando a tensão na barra PV e uma nova injeção de corrente  $I_i'^{(k)}$ .

$$Q_i'^{(k)} = \text{Im}[V_i I_i']^{(k)} \quad (3.120)$$

Essa nova injeção de corrente na barra PV  $i$  é uma combinação da corrente reativa já calculada cuja formulação está em (3.117) e a corrente de carga  $I_{ci}^{(k)}$  da mesma barra:

$$I_i'^{(k)} = I_{qi}^{(k)} + I_{ci}^{(k)} \quad (3.121)$$

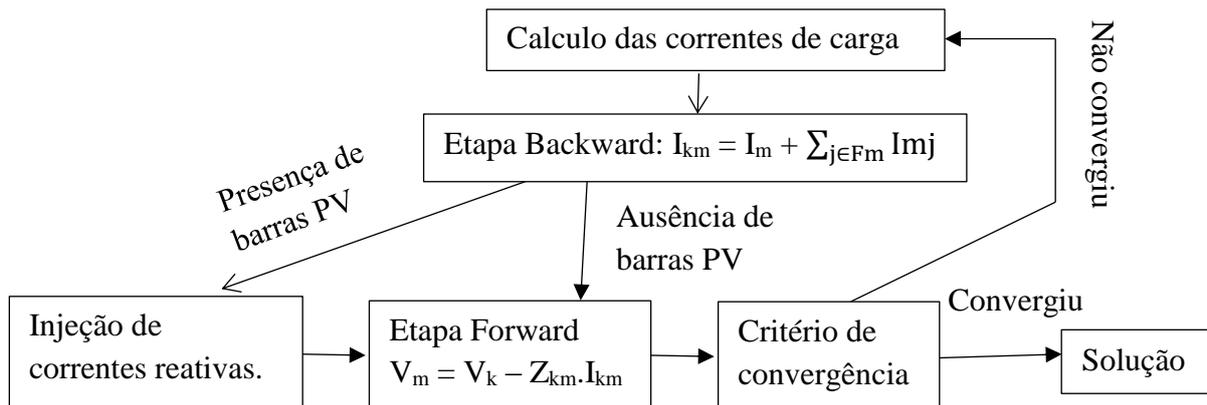
4.  $Q_{Gi}$  calculado em (3.119) então é comparado com a potência reativa máxima do gerador presente na barra PV  $i$ . Se  $Q_{Gi}$  estiver dentro dos limites de geração, ou seja,  $Q_{Gi}^{\min} < Q_{Gi}^{(k)} < Q_{Gi}^{\max}$  então a corrente reativa  $I_{qi}$  correspondente é injetado no nó PV como mostrado em (3.98). Entretanto se o limite de geração de reativos for violado, então  $Q_{Gi}$  será igualado a  $Q_{Gi}^{\max}$  e combinado com a carga reativa, para a obtenção da corrente reativa  $I_{qi}$ . Como consequência, são removidas as linhas e colunas da matriz de sensibilidade para barras PV  $[Z_v]$ , correspondendo a esse nó, onde tiver ocorrido a violação já citada.

O processo iterativo descrito acima de 1-4 continuará até que a magnitude do erro de tensão para todas as barras PV como calculado em (3.118) se torne menor que um limiar aceitável previamente estabelecido.

### 3.6.7- Fluxograma

Abaixo na figura 3.13 está descrito o método Somatório de correntes através de esquema de fluxograma.

Figura 3.13: Fluxograma do método Somatório de correntes



Fonte: O autor

### 3.7- Conclusão

O presente capítulo apresentou a descrição teórica e matemática dos métodos de fluxo de carga abordados nesse trabalho, os quais são: Newton-Raphson, Desacoplado com rotação de eixos, Desacoplado com normalização complexa e Somatório de correntes. Analisando-se o algoritmo de cada método, pode-se perceber que todos eles podem ser aplicados em sistemas de distribuição, entretanto existem algumas características que podem tornar um ou outro método menos eficiente em relação aos demais, como o tempo de processamento. Por isso torna-se necessária uma análise comparativa entre diferentes métodos de fluxo de carga.

No próximo capítulo será apresentado os resultados obtidos de simulações de fluxo de carga, para redes de distribuições com diferentes números de barras, com caráter passivo e posteriormente ativo. Assim analisar-se-á a influência que a GD possui em redes de distribuição, ao se variar o grau de penetração dessas, no número de iterações e no tempo de processamento de cada método.

## 4- RESULTADOS

### 4.1- Introdução

No presente capítulo são apresentados resultados de simulações de fluxo de carga e comentários destes realizados em sistemas de distribuição, utilizando os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado rápido com rotação de eixos, Desacoplado rápido com normalização complexa e Somatório de correntes.

É apresentado a princípio o efeito da variação do valor R/X sobre os diferentes métodos de fluxo de carga utilizados neste trabalho, para redes de distribuição ativas, utilizando-se em tais análises o número de iterações como critério de avaliação.

Também é realizado a análise de simulações em redes de distribuição ativas, utilizando-se para isso, os métodos citados, de duas formas considerando-se unidades GD, como barras PQ, ou seja, como unidades de geração de potências ativa e reativa fixas e também como barras PV (com controle de tensão). Tais procedimentos são realizados com o objetivo de se verificar os efeitos da inserção de unidades GD e da variação do grau de penetração desses em sistemas de distribuição, com relação ao número de iterações necessários para cada método convergir e tempo de processamento.

Também é analisado nesse capítulo a influência da escolha do ângulo base utilizados nos métodos Desacoplados modificados utilizados nesse trabalho, com relação ao número de iterações, através de sucessivas simulações para cada sistema utilizado. Assim adota-se um método heurístico para a determinação de tal ângulo, dessa forma pode-se verificar a eficiência da metodologia para escolha do ângulo base adotada, tanto para o método com rotação de eixos, quanto para o método com normalização complexa.

### 4.2- Análise dos resultados

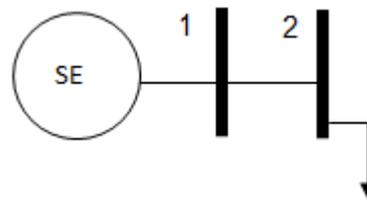
#### 4.2.1- Considerações Iniciais

Quanto a implementação dos métodos de fluxo de carga, para todos empregou-se a linguagem Matlab, cuja versão adotada foi R2015a, além disso, utilizou-se o pacote Matpower versão 5.1, para os métodos Newton-Raphson, Desacoplado rápido com rotação de eixos e Desacoplado rápido com normalização complexa, sendo que para esses dois últimos métodos foram necessários a elaboração de linhas de código na linguagem Matlab, para a adaptação dos dados de linhas e barras antes de cada simulação, obedecendo a metodologia descrita nos subtópicos 3.4.4 e 3.5.3. Quanto ao método somatório de corrente, este foi implementado totalmente através de rotinas computacionais na linguagem matlab.

As simulações foram todas realizadas no computador Dell Inspiron 14 5000, com memória RAM de 4 GB e sistema operacional versão Windows 7 Home Premium de 64 bits. O processador nesse computador é o intel(R) Pentium(R) CPU N3700 @ 1,84 GHz.

O número de sistemas testes utilizados foram 4, com características radiais, seguindo o padrão do típico sistema de distribuição, como já mencionado no capítulo 2. Posteriormente a tais sistemas foram adicionadas unidades GD. Quanto a descrição de tais redes utilizadas, estas são chamadas de sistema teste 1 o qual possui apenas duas barras, sistema teste 2 que apresenta 69 barras [13], sistema teste 3 formado por 476 barras [14] e sistema teste 4 com 1080 barras [15]. Os dados de linhas e barras de cada sistema teste são detalhados no anexo A deste trabalho. Na figura 4.1, pode ser visto ilustração dos sistemas teste 1, os demais não foram representados por serem demasiadamente extensos.

Figura 4.1: Sistema teste 1.



Fonte: Autor.

Para todas as simulações desconsiderou-se a presença de reatância shunt e também não se considerou a presença em qualquer um dos sistemas, compensação de reativos seja por banco de capacitores ou reatores série ou shunt.

O erro mínimo aceitável foi de  $10^{-6}$  em todos os métodos, e esse erro era calculado para o método somatório de corrente conforme o critério de convergência adotado em [7], na qual subtrai-se a potência aparente de cada barra pelo valor obtido na iteração anterior, tal operação é mostrada nas equações 4.1 e 4.2. para os demais métodos foi utilizado os desvios de potência residuais ativas e reativas, como na equação 3.48.

$$S^{(k)} = V^{(k)} I^{(k)*} - Y_i / |V^{(k)}|^2 \quad (4.1)$$

$$\text{Máx}(S^{(k)} - S^{(k-1)}) \leq \varepsilon \quad (4.2)$$

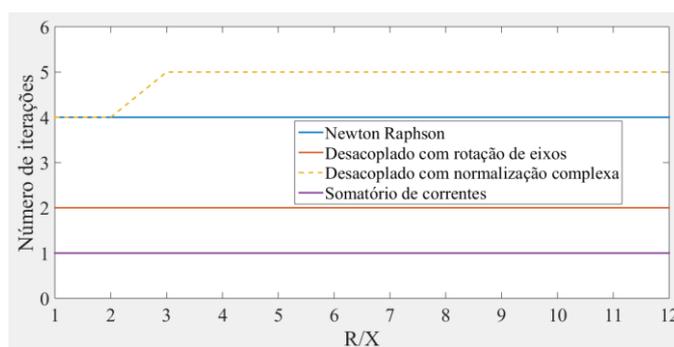
O valor máximo de número de iterações estabelecido para todos os métodos alcançarem convergência, foi estipulado em 50.

#### 4.2.2- O Efeito do Aumento do Valor R/X

Nesta primeira etapa verificou-se o efeito da variação da razão R/X sobre cada um dos métodos envolvidos neste trabalho e que já foram descritos no capítulo 3, ou seja, os métodos

de Newton-Raphson, Desacoplado rápido com rotação de eixos e com normalização complexa e Somatório de correntes. O efeito avaliado foi com relação ao número de iterações necessários para cada método convergir. Nestas simulações atribuiu-se aos valores de resistência para cada ramo, os respectivos valores de reatância para  $R/X = 1$ , para  $R/X = 2$ , atribuiu-se o dobro do valor de reatância para cada ramo, e assim sucessivamente, tais parâmetros de reatância são aqueles indicados no anexo A para todos os sistemas testes. Os resultados obtidos para o sistema teste 1, no que se refere ao número de iterações necessários para que cada método convirja, estão expressos abaixo na figura 4.2:

Figura 4.2: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se  $R/X$ , para o sistema teste 1.

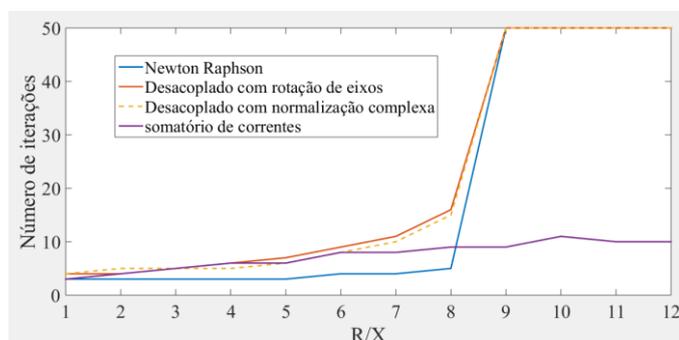


Fonte: Autor

De acordo com a figura mostrada acima, observa-se que todos os métodos apresentam pouca variação no número de iterações ao se alterar o valor  $R/X$ , pois independente desse valor, observa-se que o método Newton-Raphson demanda 4 iterações, o método Desacoplado rápido com normalização complexa demandou de 4 a 5 iterações, enquanto os métodos Desacoplado rápido com rotação de eixos e Somatório de correntes necessitaram respectivamente 2 e 1 iterações, para todos os valores  $R/X$ .

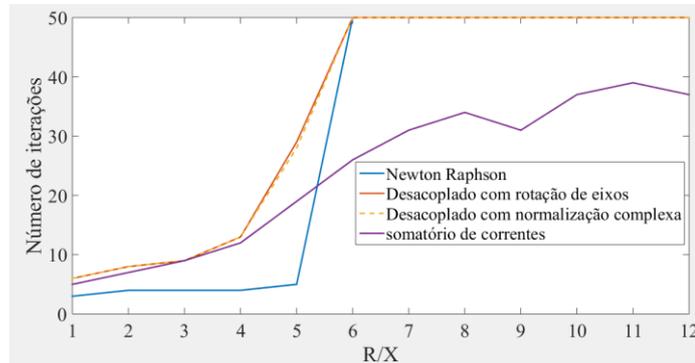
Tem-se nas figuras 4.3 a 4.5, os resultados referentes aos sistemas testes 2, 3 e 4, sem a presença de nenhuma unidade GD.

Figura 4.3: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se  $R/X$ , para o sistema teste 2.



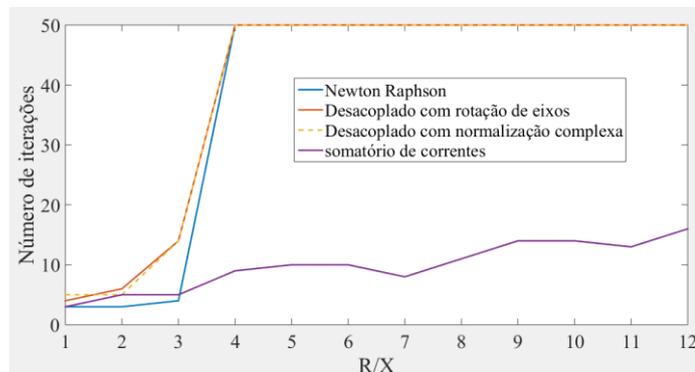
Fonte: Autor.

Figura 4.4: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 3.



Fonte: Autor

Figura 4.5: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 3.



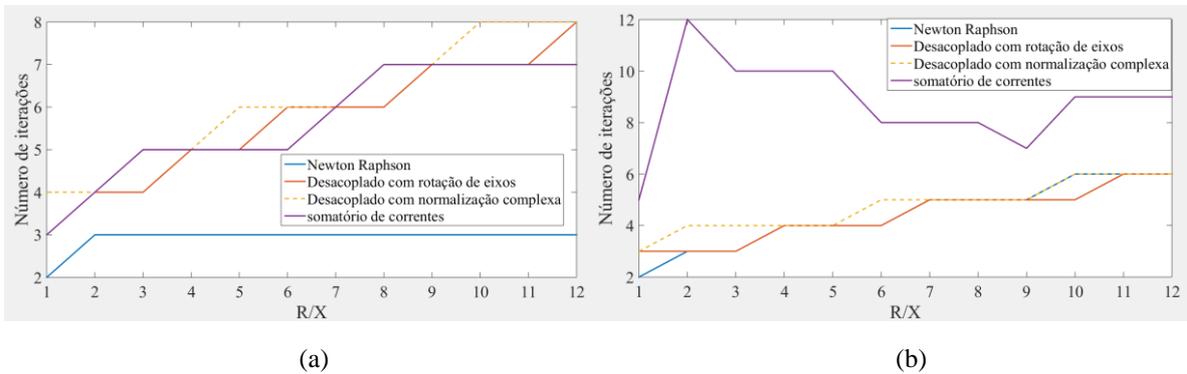
Fonte: Autor

Observa-se nas figuras 4.3 a 4.5 que os métodos Newton-Raphson, Desacoplado Rápido com normalização complexa e Desacoplado rápido com rotação de eixos, apresentam problemas de convergência para os sistemas testes 2, 3 e 4, pois o número máximo de iterações para cada método convergir é 50, assim observa-se que este valor é atingido a partir de determinados valores R/X, assim para esses valores, tais métodos não convergem. Percebe-se ainda que ao se aumentar o tamanho do sistema, ocorre a diminuição da faixa de valores R/X onde se percebe convergência.

Com relação ao método Somatório de correntes nota-se que este alcança convergência para os sistemas testes 2, 3 e 4, para qualquer situação de valor R/X, pois em nenhum momento alcançou-se o valor de 50 iterações. Entretanto verificou-se uma elevação no número de iterações ao se elevar o valor R/X, especialmente para o sistema teste 3, onde observa-se que o método demandou valores próximos a 40 iterações.

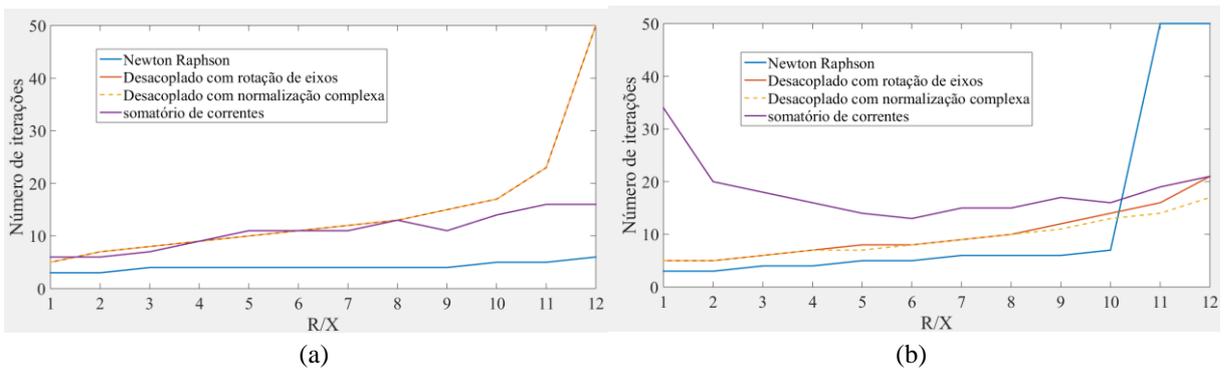
Nas figuras 4.6 a 4.8, são mostrados os resultados ao variar-se os valores R/X, para os sistemas testes 2, 3 e 4, considerando tais redes como ativas ao inserir-se 1 unidades GD em cada rede nas barras 65, 213 e 1057, respectivamente para os sistemas testes 2, 3 e 4. Para os quais, realizou-se simulações considerando as unidades GD, com grau de penetração de 50%. Nessas simulações considerou-se as barras com geração ora como barras PQ, com fator de potência unitário, ora como barras PV, com cada unidade GD tendo módulo de tensão especificada em 1 p.u.

Figura 4.6: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 2. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.



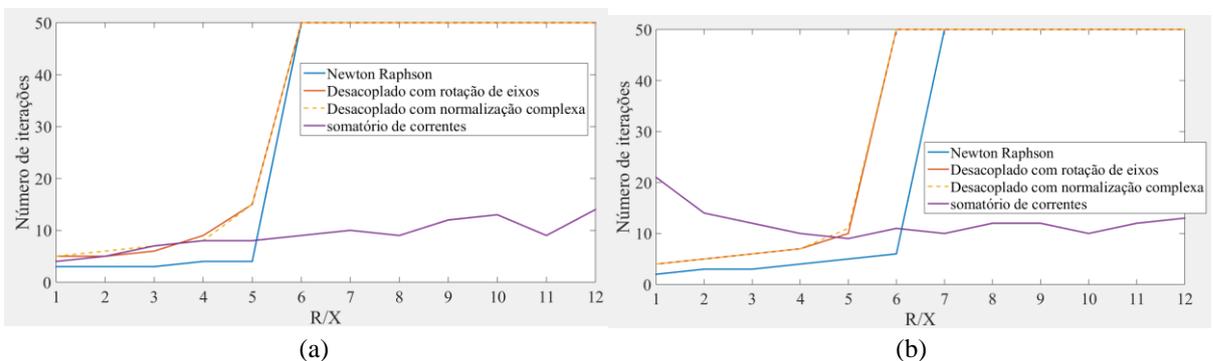
Fonte: Autor.

Figura 4.7: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 3. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.



Fonte: Autor.

Figura 4.8: Gráfico apresentando evolução de número de iterações ao variar-se R/X, para o sistema teste 4. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.



Fonte: Autor.

Verifica-se que os métodos Newton-Raphson, Desacoplado Rápido com normalização complexa e Desacoplado rápido com rotação de eixos apresentam resultados melhores em relação aqueles obtidos nas simulações sem unidades GD, pois para a maioria dos valores R/X, tais métodos convergem, para os sistemas teste 2 e 3. Entretanto para o sistema teste 4 verifica-

se que os métodos Newton-Raphson, Desacoplado Rápido com normalização complexa e Desacoplado rápido com rotação de eixos não convergem para valores R/X entre 5 e 6. Além disso, ao variar-se valores R/X nas situações em que ocorrem convergência, se verifica apenas um ligeiro aumento no número de iterações.

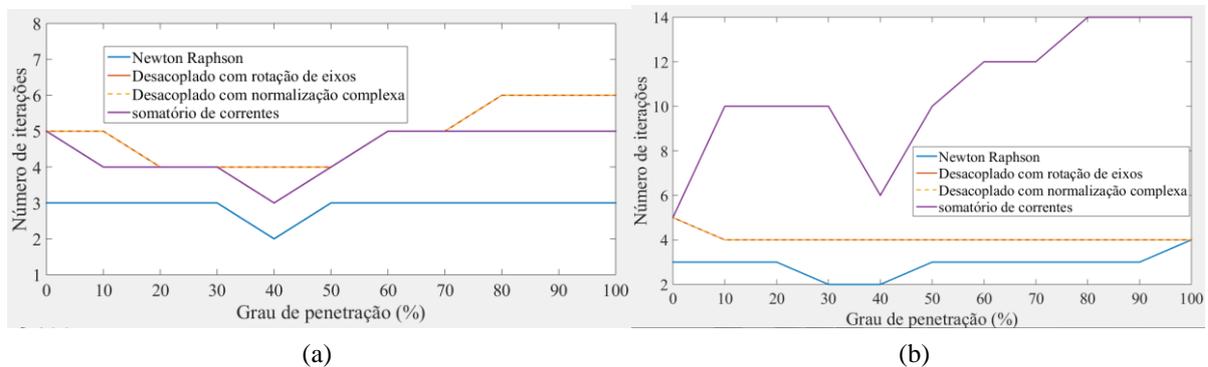
Todavia, observa-se que mais uma vez o método Somatório de correntes converge em todas as situações de valores R/X, embora se verifique valores próximos a 40 iterações para o sistema teste 3, ainda assim é possível verificar que na maioria das simulações para diferentes valores R/X, tem-se um valor inferior a 15 iterações. É possível notar que ao se considerar a unidade GD como barra PQ, o método Somatório de correntes apresenta um pequeno aumento no número de iterações, ao se elevar o valor R/X, ao se realizar isso quando se considera a GD como barra PV, para os sistemas teste 3 e 4, há um notável decréscimo no número de iterações.

#### 4.2.3- O Efeito da Variação do Grau de Penetração da GD.

Os próximos resultados, expressos através de tabelas, realizam uma investigação para os sistemas teste 2, 3 e 4 do efeito da variação do grau de penetração de 0 a 100% da GD, no número de iterações. Para estas simulações inserem-se 1 unidades GD em cada rede nas barras 65, 213 e 1057, respectivamente para os sistemas testes 2, 3 e 4. Nestas simulações também são consideradas as barras com unidades GD, tanto como PQ, com fator de potência unitário, quanto como PV, com tensão de geração para as GD's de 1 p.u. Com relação aos dados de barras e ramos utilizados nos sistemas testes 2, 3 e 4, são aqueles indicados nas tabelas A3 a A8, no anexo A.

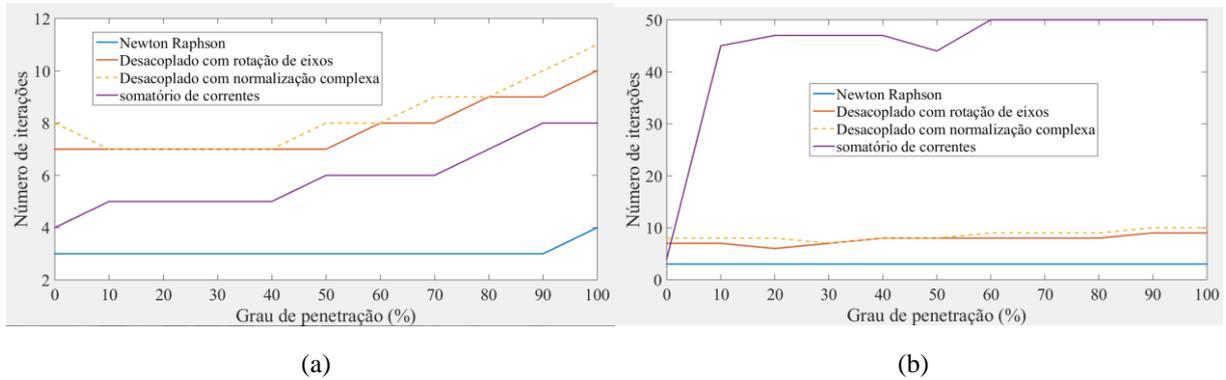
Os resultados para os sistemas testes 2, 3 e 4 ao variar-se o grau de penetração das GD's estão expressos nas figuras 4.9 a 4.11.

Figura 4.9: Efeito da variação do grau de penetração no número de iterações para o sistema teste 2. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.



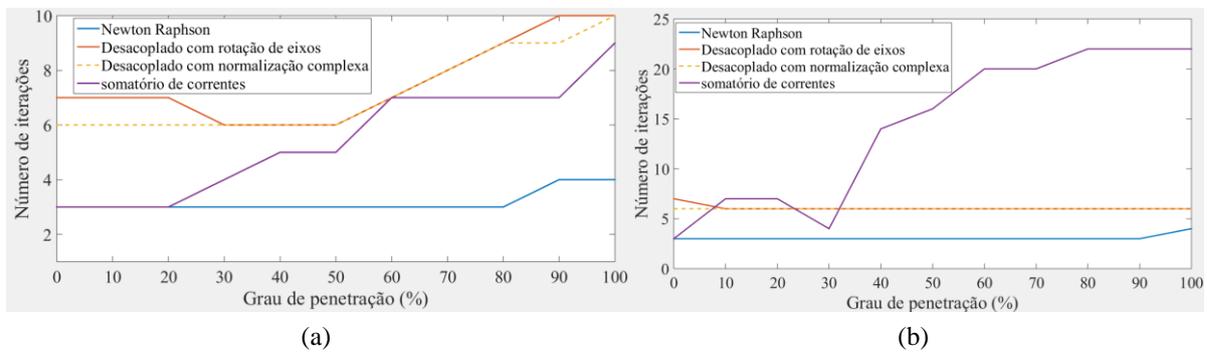
Fonte: Autor.

Figura 4.10: Efeito da variação do grau de penetração no número de iterações para o sistema teste 3. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.



Fonte: Autor.

Figura 4.11: Efeito da variação do grau de penetração no número de iterações para o sistema teste 4. (a) GD's sendo consideradas barras PQ. (b) GD's sendo consideradas barras PV.



Fonte: Autor.

Os resultados mostrados nas figuras acima mostram que para o método Newton-Raphson, há uma variação pequena no número de iterações, dessa forma independente do valor do grau de penetração, o método demanda apenas de 2 a 4 iterações, com relação ao número de iterações, este é o melhor resultado entre todos os métodos. Contudo, o fato de ser necessário inverter a matriz jacobiana a cada iteração torna o método oneroso computacionalmente, especialmente para redes com um número elevado de barras, como também será mostrado em simulações posteriores.

Os métodos Desacoplado com rotação de eixos e com normalização complexa obtiveram resultados muito semelhantes entre si, percebe-se que para ambos os métodos ocorre um ligeiro crescimento no número de iterações ao se aumentar o grau de penetração. Porém o número de iterações não ultrapassa 11, para os métodos citados. Percebe-se ainda que os métodos Desacoplado com rotação de eixos e com normalização complexa apresentam resultados melhores, quando se consideram a barra com GD como PV, pois verifica-se menores variações no número de iterações, os quais também foram os menores valores, nessas simulações, para os métodos Desacoplados, em comparação aos resultados, onde se considera as barras com GD, como PQ.

O método Somatório de correntes apresentou bons resultados para as simulações onde a barra com GD era tratada como PQ, embora possa se verificar, para os sistemas testes 3 e 4,

que com o aumento do grau de penetração, ocorre um crescimento do número de iterações, embora tais valores não ultrapassaram 9. Contudo para simulações, nas quais foram consideradas as barras com GD como PV, percebeu-se elevações consideráveis no número de iterações ao se aumentar o grau de penetração, de maneira que para o sistema teste 3, verificou-se valores de iterações superiores a 40, além disso para a mesma rede, observou-se que para valores de grau de penetração a partir de 60%, o método não alcançou convergência, o Somatório de correntes mostra-se assim, pouco eficaz para redes com barras PV.

#### 4.2.4- Efeito da Variação da Quantidade de Unidades GD.

Nessas simulações, analisa-se o efeito do aumento da inserção de unidades GD no número de iterações (it) e no tempo de processamento (Tp) para os métodos de fluxo de carga (Met.), Newton-Raphson (NR), Desacoplado com rotação de eixos (Dre), Desacoplado com normalização complexa (Dne) e Somatório de correntes (Sc). Tais análises foram realizadas considerando-se as barras com GD's, tanto com controle de tensão em 1 p.u, quanto com controle de fator de potência. Para este último modo de controle, foi estipulado fator de potência unitário. Cada unidade GD realiza uma injeção de potência ativa de 20% sobre a demanda total da rede. Realizou-se também simulações (Caso base) sem GD. O detalhamento das barras, nas quais foram aplicadas as unidades GD, para cada sistema teste utilizado estão descritas na tabela 4.1 abaixo:

Tabela 4.1: Barras escolhidas para inserção de unidades GD.

Redes	Barras escolhidas para se inserir GD		
	1 unidade GD	2 unidades GD	3 unidades GD
Sistema teste 2	65	27 e 65	27, 60 e 65
Sistema teste 3	213	195 e 213	195, 203 e 213
Sistema teste 4	1057	150 e 1057	150, 700 e 1057

Fonte: Autor.

Os resultados para os sistemas testes 2, 3 e 4, estão expressos respectivamente nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema teste 2 ao se variar unidades GD.

Met.	Caso base		GD's como barras PQ						GD's como barras PV					
			1 GD		2 GD		3 GD		1 GD		2 GD		3 GD	
	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)
NR	3	0,59	3	0,80	3	0,47	2	1,09	3	0,83	3	0,94	3	0,87
Dre	5	0,62	4	0,73	4	0,53	4	0,55	4	0,67	4	0,73	4	0,62
Dnc	5	0,55	4	0,58	4	0,61	4	0,73	4	0,58	4	0,90	4	0,72
Sc	5	0,09	4	0,09	4	0,08	3	0,06	10	0,12	10	0,12	8	0,19

Fonte: Autor.

Tabela 4.3: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema teste 3 ao se variar unidades GD.

Met.	Caso base		GD's como barras PQ						GD's como barras PV					
			1 GD		2 GD		3 GD		1 GD		2 GD		3 GD	
	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)
NR	3	11,23	3	10,58	3	9,73	3	9,67	3	12,11	3	11,73	3	13,06
Dre	7	1,01	7	1,22	7	1,33	8	0,90	6	1,95	8	1,81	8	2,65
Dnc	8	0,95	7	1,01	7	1,89	8	2,09	8	1,87	8	1,36	9	1,48
Sc	4	0,23	5	0,41	5	0,31	6	0,31	47	2,46	47	2,57	-	-

Fonte: Autor.

Tabela 4.4: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema teste 4 ao se variar unidades GD.

Met.	Caso base		GD's como barras PQ						GD's como barras PV					
			1 GD		2 GD		3 GD		1 GD		2 GD		3 GD	
	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)	it	Tp(s)
NR	3	85,69	3	96,32	3	96,25	3	99,11	3	90,43	2	51,87	3	92,37
Dre	7	2,01	7	1,89	6	2,59	6	1,68	6	3,24	9	4,32	9	4,04
Dnc	6	1,98	6	1,89	6	2,11	5	1,67	6	2,85	7	3,00	7	3,28
Sc	3	0,55	3	0,58	3	0,53	3	0,53	7	1,31	15	2,76	21	3,93

Fonte: Autor.

Como se observa nas tabelas 4.2 a 4.4, em todas as simulações o tradicional método de Newton-Raphson demanda os menores valores de iterações com números que oscilam entre 2 e 3, os quais não se alteram, mesmo variando-se a quantidade de unidades GD, ou quando essas são consideradas como barras PQ ou PV. Não obstante este é o método que demandou um maior tempo de processamento, principalmente para os sistemas teste 3 e 4, uma vez que a cada iteração é necessário realizar a inversão da matriz jacobiana, a qual possui uma ordem maior, quanto mais extensa é a rede utilizada nas simulações, além disso, a referida matriz precisa ser atualizada a cada iteração.

Os métodos Desacoplados com rotação de eixos e normalização complexa apresentaram desempenho semelhante entre si, com apenas pequenas diferenças em relação ao número de iterações. Além disso, ambos os métodos obtiveram valores baixos de iterações entre 4 e 9, o que mostra a adequação do método a sistema de distribuições ativos e ainda observa-se a característica de um tempo de processamento pequeno, típico do método Desacoplado tradicional [12], uma vez que a matriz jacobiana se reduz a duas matrizes de susceptância, cujos valores são constantes, logo se faz necessário apenas uma inversão.

Percebe-se ainda, para os métodos Desacoplados, utilizados neste trabalho, que ao se variar o número de unidades GD's, ou ao se considerar as GD's como barras PQ, ou PV, não ocorrem alterações significativas com relação ao tempo de processamento e número de iterações, em relação aos resultados sem a presença de GD's.

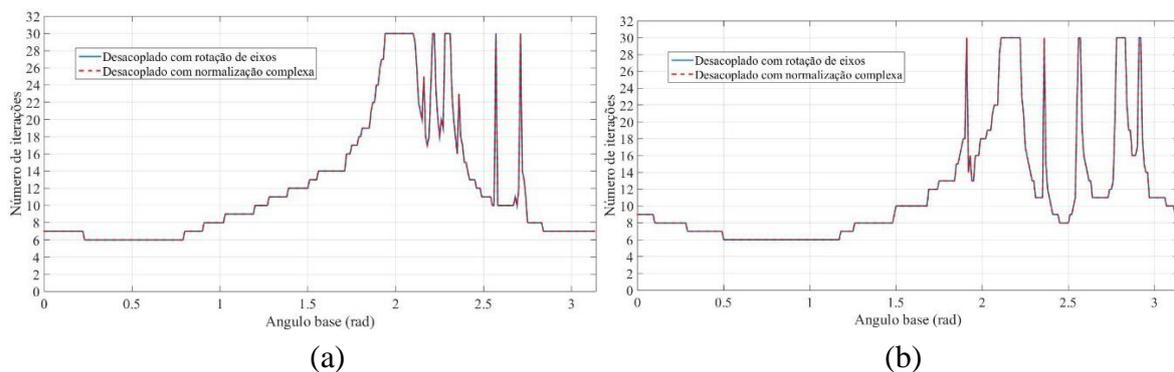
O método Somatório de correntes mostrou-se o método mais rápido na maioria das simulações, especialmente naquelas em que não se tinha unidades GD, ou quando estas eram consideradas como barras PQ. Além disso, para essas simulações, o método necessitou de poucas iterações para convergir. Tais fatos ocorrem porque o método possui um algoritmo que se baseia em operações matemáticas simples como detalhado nas equações 3.109 a 3.116.

Porém, para o método Somatório de correntes, percebe-se que ao se acrescentar aos sistemas testes, unidades GD, consideradas como barras PV, o número de iterações eleva-se consideravelmente, como na simulação para o sistema teste 3, onde foram necessárias 47 iterações, na presença de 1 e 2 barras PV. Entretanto, ao se considerar 3 barras PV, o método Somatório de correntes não convergiu. Além disso para os sistemas testes 2, 3 e 4, nas situações, onde se percebe convergência, o número de iterações eleva-se consideravelmente, o que revela um forte impacto para o método Somatório de correntes, quando surgem barras PV no sistema a ser simulado.

#### 4.2.5- Verificação da Escolha dos Ângulos Base para os Métodos Desacoplados Modificados.

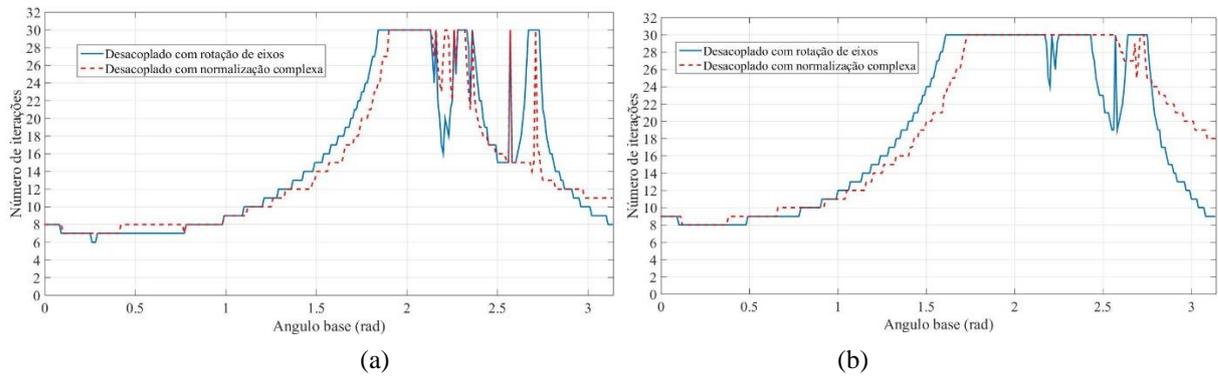
Realizou-se sucessivas simulações de fluxo de carga para os métodos Desacoplados, aplicando-se ângulos base diferentes entre 0 a 3,14 radianos, para assim se verificar qual o ângulo proporciona o menor número de iterações. Em seguida esse ângulo é comparado com aquele obtido em tais métodos a partir da abordagem apresentada em 3.4.4 e 3.5.3. Os resultados dessas simulações foram realizados apenas para os sistemas testes 3 e 4, considerando 3 unidades GD como barras PQ (para os graus de penetração de 60% e 100%) e como barras PV (para os graus de penetração de 10% e 30%). Os resultados estão expressos nas figuras 4.12 a 4.16.

Figura 4.12: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em redes passivas. (a) Para o sistema teste 3. (b) Para o sistema teste 4.



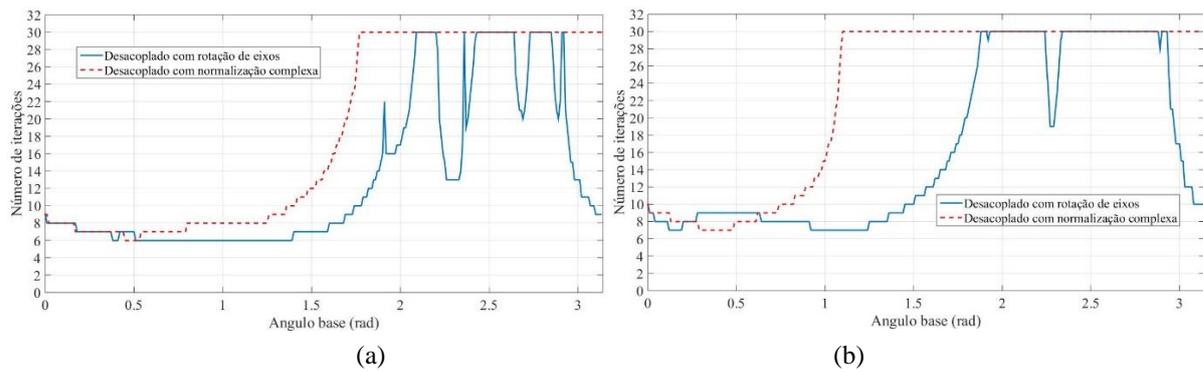
Fonte: Autor

Figura 4.13: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 3 cujas barras com GD são consideradas como PQ. (a)  $G_p = 60\%$ . (b)  $G_p = 100\%$ .



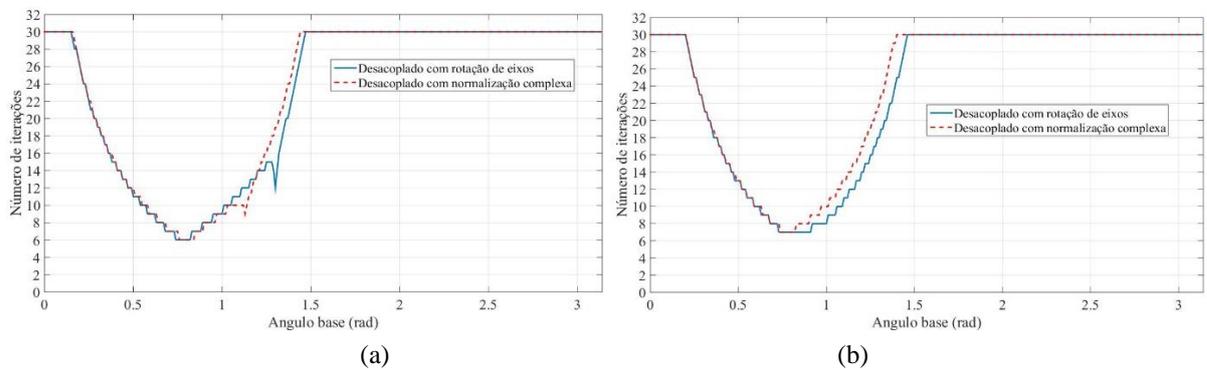
Fonte: Autor

Figura 4.14: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 4 cujas barras com GD são consideradas como PQ. (a)  $G_p = 60\%$ . (b)  $G_p = 100\%$ .



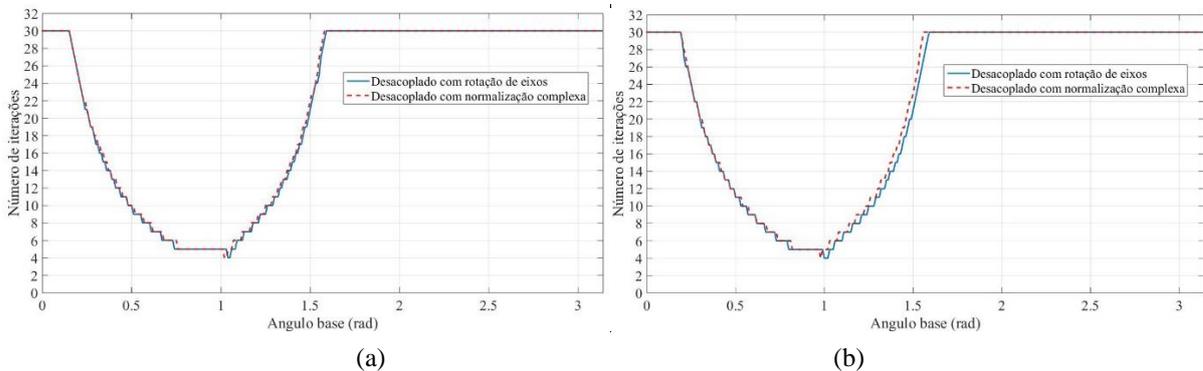
Fonte: Autor

Figura 4.15: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 3 cujas barras com GD são consideradas como PV. (a)  $G_p = 10\%$ . (b)  $G_p = 30\%$ .



Fonte: Autor

Figura 4.16: Resultados das simulações para obtenção do valor mínimo de iterações para os métodos Desacoplados em para os sistema teste 4 cujas barras com GD são consideradas como PV. (a)  $G_p = 10\%$ . (b)  $G_p = 30\%$ .



Fonte: Autor.

Para a facilitação da visualização dos resultados, apresenta-se abaixo tabelas indicando os valores de ângulo base ( $\delta^b(e)$ ) que fornecem os menores valores de iteração ( $it(e)$ ), ângulos que foram extraídos experimentalmente, ou seja através das simulações já apresentadas nesta subseção. Indica-se também nas tabelas 4.5 a 4.8, os valores de ângulo base ( $\delta^b(c)$ ) e número de iterações ( $it(c)$ ) obtidos através da metodologia apresentada nas subseções 3.4.4 e 3.5.3, apresenta-se ainda nas tabelas 4.5 a 4.8, os valores de  $it(e)$ .

Tabela 4.5: Comparação do ângulo base obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 3:

Met.	Caso base		GD como PQ				GD como PV			
			$G_p = 60\%$		$G_p = 100\%$		$G_p = 10\%$		$G_p = 30\%$	
	$\delta^b(c)$	$\delta^b(e)$								
Dre	0,848	0,5	0,848	0,9	0,848	0,23	0,848	0,78	0,848	0,78
Dnc	0,913	0,5	0,913	0,5	0,913	0,23	0,913	0,80	0,913	0,82

Fonte: Autor.

Tabela 4.6: Comparação do número de iterações obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 3:

Met.	Caso base		GD como PQ				GD como PV			
			$G_p = 60\%$		$G_p = 100\%$		$G_p = 10\%$		$G_p = 30\%$	
	$it(c)$	$it(e)$	$it(c)$	$it(e)$	$it(c)$	$it(e)$	$it(c)$	$it(e)$	$it(c)$	$it(e)$
Dre	9	6	8	6	10	8	7	6	7	7
Dnc	7	6	8	7	10	8	7	6	7	7

Fonte: Autor.

Tabela 4.7: Comparação do ângulo base obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 4:

Met.	Caso base		GD como PQ				GD como PV			
			$G_p = 60\%$		$G_p = 100\%$		$G_p = 10\%$		$G_p = 30\%$	
	$\delta^b(c)$	$\delta^b(e)$								
Dre	0,84	1.205	1.205	0,39	1.205	1,08	1.205	1,04	1,205	1,01
Dnc	0,84	1.114	1,114	0,49	1,114	0,37	1,114	1,02	1,114	0,98

Fonte: Autor.

Tabela 4.8: Comparação do número de iterações obtido experimentalmente e através de cálculo, para o sistema teste 4:

Met.	Caso base		GD como PQ				GD como PV			
			Gp = 60%		Gp = 100%		Gp = 10%		Gp = 30%	
	it(c)	it(e)	it (c)	it(e)	it (c)	it(e)	it (c)	it(e)	it (c)	it(e)
Dre	7	6	7	6	9	7	6	4	6	4
Dnc	6	6	6	6	9	7	6	4	6	4

Fonte: Autor.

Analisando-se as figuras 4.12 a 4.16, assim como as tabelas 4.5 a 4.8, pode-se perceber que para as simulações utilizando-se o caso base os números de iterações são exatamente os mesmos para quaisquer valores de ângulo base. Entretanto para as simulações onde se tem geração distribuída verifica-se visíveis diferenças nas curvas de um método em relação ao outro.

O método Desacoplado com rotação de eixos, na maioria das figuras acima, possui para determinados valores de ângulo, valores de iteração menores do que aqueles obtidos pelo método com normalização complexa. Tal fato ocorre porque no método com rotação de eixos, antes da aplicação da metodologia de cálculo de ângulo base, realiza-se a subtração em cada barra dos valores de carga pelos valores de potência gerada. Porém, tal procedimento não é adotado para o método com normalização complexa.

O procedimento citado, com relação aos métodos Desacoplados, foi realizada dessa forma em relação aos métodos, porque verificou-se melhores desempenho em relação ao número de iteração, ao não se considerar os valores de potência gerada para o método com normalização complexa.

Comparando-se os valores de número de iteração mínimos obtidos das sucessivas simulações, em relação aos valores obtidos dos cálculos de ângulo base, nota-se que não há uma discrepância muito grande. Percebe-se apenas, uma diferença máxima de apenas 2 unidades para o método com normalização complexa e de 3 para o método com rotação de eixos. Tal fato mostra que a abordagem para cálculo de ângulo base utilizada neste trabalho é bem eficaz.

Com relação ao ângulo base calculado, verificou-se nas tabelas 4.8 e 4.10, que na maioria das simulações eles não se distanciam muito daqueles obtidos nas sucessivas simulações, fato que atesta mais uma vez a eficácia da abordagem utilizada neste trabalho para se encontrar um ângulo que proporcione um valor pequeno de iterações.

Percebe-se ainda, para cada sistema teste, que em relação ao valor calculado para o caso base, os valores de ângulo quase não se alteram para simulações com inserção de unidades GD, logo pode-se pensar em se utilizar sempre um mesmo ângulo base para uma determinada rede,

podendo-se utilizar os ângulos obtidos através da aplicação de vários valores de ângulo base, como realizado nesta subseção.

O procedimento de cálculo poderia ser dispensado, ao sempre se aplicar um mesmo ângulo para a rede. Porém, adotar um ângulo fixo poderia representar um inconveniente na ocorrência de uma mudança de topologia no sistema, como a perda de linhas ou o acionamento de uma linha normalmente fechada. Para essas novas condições de rede, seria necessário a aplicação de um novo ângulo base. Entretanto, tal ângulo não seria possível de se obter, uma vez que o cálculo de ângulo base seria dispensado.

#### 4.3- Conclusão

Através do presente capítulo apresentou-se os resultados obtidos nas várias simulações de fluxo de carga para os métodos Newton-Raphson, Desacoplado com rotação de eixos e normalização complexa e Somatório de correntes, assim verificou-se através de tabelas e figuras os resultados com relação ao número de iterações e tempo de processamento, nos quais os métodos Desacoplados apresentaram os melhores resultados, com relação a número de iterações e tempo de processamento.

## 5- CONCLUSÕES

### 5.1- Considerações Finais

Esta dissertação apresentou uma análise comparativa entre métodos de fluxo de carga para redes radiais de distribuição ativas, em termos de número de iterações e tempo de processamento. A comparação foi realizada entre os seguintes métodos: Newton-Raphson, Desacoplado rápido com rotação de eixos, Desacoplado rápido com normalização complexa e Somatório de Corrente.

Com relação ao método Newton-Raphson verificou-se, problemas de convergência do método para simulações onde foram impostos altos valores  $R/X$ . O método de Newton-Raphson convergiu somente até determinado valor de  $R/X$ , para sistemas com ausência ou presença de GD's. Logo verificou-se inadequações do método para sistemas de distribuição com altos valores  $R/X$ . Não obstante, o método de Newton-Raphson alcançou sempre convergência nas análises onde se variavam o grau de penetração de GD's para sistemas de distribuição, pois como se pode observar no anexo A, os valores  $R/X$ , dos alimentadores não são muito elevados, como se verifica tipicamente, em redes de distribuição primárias. Assim o método de Newton-Raphson não é recomendável, para redes de distribuição com altos valores  $R/X$ .

Os resultados mostraram, ainda, que o método de Newton-Raphson obteve bom desempenho com relação ao número de iterações quando comparado aos outros métodos. Esse resultado era esperado, tendo em vista a boa característica de convergência do método de Newton-Raphson, descrita como quadrática quando próxima da solução [16]. Entretanto, o método de Newton-Raphson demandou um elevado tempo de processamento. O qual aumenta à medida que o porte da rede de distribuição aumenta. Embora tal característica pode ser atenuada ao se aplicar técnicas como ordenamento ótimo e técnicas de esparsidade das matrizes, o método permanece oneroso [17]. Característica indesejável para aplicações em tempo real.

Os métodos Desacoplados com rotação de eixos e com normalização complexa apresentaram limitações com relação a convergência para determinados valores  $R/X$ , para os quais observou-se a não convergência a partir de determinados valores  $R/X$ , para os sistemas teste 3 e 4. Porém, para as simulações, nas quais se altera o grau de penetração de GD's, verificou-se bons resultados, com valores de iterações que não ultrapassaram 11 unidades. Além disso tais métodos não apresentaram alteração perceptível ao se alterar a quantidade de unidades GD. Dessa forma percebe-se uma melhor adequação dos métodos Desacoplados com rotação de eixos e com normalização complexa, para redes de distribuição ativas com valores  $R/X$  não muito elevados, como ocorre nas redes de distribuição primárias.

Os métodos Desacoplados com rotação de eixos e com normalização complexa apresentaram bons desempenhos, nas simulações em que convergiram, pois nestas, o número de iterações resultante ficou entre 4 e 10 iterações, além disso as resoluções de fluxo de carga por meio desses métodos apresentaram tempo de processamento pequeno. Para redes de

distribuição com centenas de barras, esses métodos demandaram um tempo muito inferior ao necessitado pelo método de Newton-Raphson. Logo os métodos com rotação de eixos e normalização complexa mostraram-se adequados para operações de fluxo de carga em tempo real.

Observou-se ainda uma boa eficácia para as metodologias usadas para cálculo de ângulo base para os métodos Desacoplados. Pois, para tais métodos, os valores de iterações encontrados se assemelharam muito com os valores encontrados através das simulações, nas quais se aplicava ângulos bases aos métodos Desacoplados de 0 a 3,14 radianos, com os resultados organizados em gráficos.

Portanto, verificou-se uma boa eficácia dos métodos Desacoplados modificados, quando aplicados em redes de distribuição primárias ativas, pois tais métodos utilizam técnicas de adaptação da rede a ser simulado com o objetivo de se reduzir o valor R/X a valores típicos encontrados em sistemas de transmissão de energia, o que torna assim, possível o bom desacoplamento das variáveis P-V e Q- $\delta$ .

O método Somatório de correntes apresentou um desempenho satisfatório para as redes de distribuição passivas e também nas simulações com a presença de GD's como barras PQ, nas quais percebeu-se um tempo de processamento pequeno, poucas iterações. Porém ao se adicionar unidades de GD com controle de tensão, foi verificada uma elevação considerável do número de iterações e do tempo de processamento. E além disso o método não convergiu para algumas condições de grau de penetração de GD's ao serem consideradas como barras PV.

Entretanto, o método Somatório de correntes alcançou convergência para todas as simulações onde se alterava o valor R/X, o que mostra uma boa adequação do método em redes de distribuição com elevados valores R/X.

Portanto, o método Somatório de correntes mostra-se mais indicado para redes de distribuição passivas ou ativas, nas quais se possa considerar as unidades GD como barras PQ, pelo fato de demandar valores pequenos de iterações e tempo de processamento. Contudo, o método de varredura não se mostra confiável para sistemas de distribuição ativos, com controle de tensão, pois para esses casos, pode não ocorrer convergência para determinados valores de grau de penetração.

Conclui-se que os métodos Desacoplados com rotação de eixos e com normalização complexa são os mais indicados para sistemas radiais de distribuição primários e ativos, com qualquer nível de grau de penetração, pois eles demandam um baixo número de iterações e baixo tempo de processamento. Entretanto para redes de distribuição com altos valores R/X, o somatório de correntes mostrou-se o mais recomendável.

## 5.2- Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros sugere-se um estudo de análise comparativa do desempenho de métodos de fluxo de carga, semelhante ao realizado nesta dissertação, para redes de distribuição, porém realizando-se análise trifásica, para que se verifique o efeito da presença de cargas e GD desbalanceadas, em simulações de fluxo de carga.

Propõe-se também um trabalho, considerando outros métodos de varredura tais como somatório de potência, como realizado em [18]. Além disso, pode ser feita análise para o método Desacoplado rápido com rotação de eixos utilizando o método apresentado em [5] para redes de distribuição ativas, com presença de barras PV, o qual é baseado também em uma matriz de sensibilidade como utilizado tanto em [8] quanto neste trabalho no método somatório de corrente para redes com barras PV.

Sugere-se ainda análises considerando presença de regulador de tensão, ou seja com presença de comutador de tape sob carga, para redes de distribuição ativas com presença de barras PV, pois de acordo com [19], o método somatório de corrente em sua implementação convencional de proposta em [8] não converge, porém ao se realizar modificações no algoritmo, o método de varredura alcança convergência.

Recomenda-se também uma investigação para os métodos baseados em Newton-Raphson, com relação ao possível mau condicionamento da matriz jacobiana, pois em certas condições de carga que ocorrem em sistemas de distribuição, tal matriz pode ser constituída de forma a tornar-se aproximadamente singular, logo nenhum dos métodos baseados em Newton-Raphson alcançaria convergência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chowdhury, S.; Chowdhury, S.P.; Crossley, P. *Microgrids and Active Distribution Networks*. Renewable Energy Series 6, IET - The Institution of Engineering and Technology, Londres, 2009.
- [2] Stott, B.; Tech, M.Sc. Effective starting process for Newton-Raphson load flows, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 118, Issue: 8, pp. 983-987, Agosto, 1971.
- [3] Stott, B.; Alsac, O. Fast Decoupled Load Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-93, Issue: 3, pp. 859 – 869, Maio 1974.
- [4] Wu, F. Theoretical study of the convergence of the fast decoupled load flow. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-96, no. 1, pp. 268-275, Jan. 1977.
- [5] GOMES, R. B. Resolução do Problema do Fluxo de Cargas para Rede de Distribuição Utilizando o Método Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos. 2006. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [6] Tortelli, O. L.; Lourenço, E. M.; Garcia, A. V.; Pal, B. C. IEEE. Fast Decoupled Power Flow to Emerging Distribution Systems via Complex *pu* Normalization. Vol. 30. Issue: 3. Maio, 2015.
- [7] Shirmohammadi, D.; Hong, H. W.; Semlyen, A. and Luo, G. X. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, May 1988, pp.753-762.
- [8] Shirmohammadi, D.; Cheng. C. S. A Three-Phase Power Flow Method For Real-Time Distribution System Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, May 1995, pags 671 – 679.
- [9] AZEVEDO, F.H. Otimização de Rede de Distribuição de Energia Elétrica Subterrânea Reticulada através de Algoritmos Genéticos. 140f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- [10] Torres, J. 4ª Conferência ELECPO-UNESA, EDP, 2010, [http://www.elecpo.pt/document/8\\_JTorres011110.pdf](http://www.elecpo.pt/document/8_JTorres011110.pdf), consultado em 12-12-2018.
- [11] SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. Impact of Distributed Generation on Power Systems Transient Stability. *IEEE power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, EUA. 25 de julho, 2002.
- [12] AZMY, A. M.; ERLICH, I. Impact of Distributed Generation on the Stability of Electrical Power Systems. *IEEE – Power Engineering Society General Meeting*, Tallahassee, EUA. 12 a 16 julho, 2005.
- [13] Baran, M. E., WU, F. F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System. *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 4, pp. 725-734, Janeiro, 1989.

- [14] Costa, J. S. Técnicas de otimização aplicadas a sistemas Elétricos de distribuição. 2008. 107f. Dissertação de mestrado (mestrado em engenharia elétrica) - UFJF, Juiz de fora, MG, Agosto, 2008.
- [15] Puger, E. B. Fluxo de Carga Não – Iterativo para a Análise de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais e Malhados. 2013. 96f. Dissertação de mestrado (mestrado em engenharia elétrica) – UNESP. Ilha solteira SP, fevereiro, 2013.
- [16] Tinney, W.; Hart, C. Power flow solution by Newton's method. IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-86, no. 11, pp. 1449–1460. Novembro, 1967.
- [17] Tinney, W.; Walker, J. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization. Proc. IEEE, vol. 55, no. 11, pp. 1801–1809. Novembro, 1967.
- [18] da Silva, R. K. Análise multifásica de fluxo de potência em redes radiais de distribuição de energia elétrica. 1995. 188f. Dissertação de mestrado (dissertação em engenharia elétrica) - UFPA, Belém. Setembro, 1995.
- [19] Massignan, J. A. D.; Pereira, R. P. Jr.; London J. B. A. Load Flow Calculation with Voltage Regulators Bidirectional Mode and Distributed Generation. Vol. 32. Issue: 2. Março, 2017. Pags: 1576 – 1577.
- [20] Jenkins, N.; Ekanayake, J.B.; Strbac, G. Distributed Generation. Renewable Energy Series 1, IET - The Institution of Engineering and Technology, Londres, 2009.
- [21] Lopes, J. A. P. Microgeração e microrredes. <https://paginas.fe.up.pt/~jpl/textos/Microger.pdf>. Consultado em 13-12-2018.
- [22] Oliveira, R. D; Júnior, J. C. M. V. Benefícios e desafios de redes inteligentes. Revista eletrônica de energia. Salvador. Vol: 2. n.1. Pags: 3-14. Jan./dez. 2012.
- [23] [pt.cnequipment.net](http://pt.cnequipment.net). Consultado em 13-12-2018.
- [24] Eletrobras, Cepel. Aplicações dos sistemas eólicos. [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=251](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=251). Consultado em 13-12-2018.
- [25] Jenkins, N.; et. al, Embedded Generation, The Institution of Electrical and Electronics Engineers, Londres, 2000.
- [26] Mcdermott, T. E.; Dugan, R. C. Distributed Generation Impact on Reliability and Power Quality Indices. Rural Electric Power Conference, Colorado Springs. 2002.
- [27] Tinney, W. F. Compensation Methods for Network Solutions by Triangular Factorization. Proc. Of PICA Conference, Boston, Mass., May 24-26, 1971.
- [28] Bezerra U.H. Curso de análise de sistema de potência, Capítulos 2 e 3, UFPA, Brasil, 2012.

- [29] Loddi, T. Cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de newton Desacoplado rápido com rotação de eixos. 2010. 116f. Dissertação de mestrado (dissertação em engenharia elétrica) – UFPR. Curitiba. 2010.
- [30] Tostes M. E, Avaliação dos impactos causados pela geração de harmônicos na rede de distribuição em consumidores em baixa tensão. 2003. 201f. Tese de doutorado (tese em engenharia elétrica) – UFPA. Belém. Dezembro, 2003.
- [31] Carvalho M. R. Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial. 2006. 94f. Dissertação de mestrado (Dissertação em engenharia elétrica) - USP, São Carlos. 2006.
- [32] Thong, V.V.; Driesen, J.; Belmans, R. Power quality and voltage stability of distribution system with distributed energy resources. International Journal of Distributed Energy Resources, Volume 1 Number 3. Editora: Technology & Science Publishers, Kassel, Alemanha, 2005.
- [33] Tostes, M. E. Distribuição de energia elétrica, capítulo 1, UFPA, Brasil, 2015.
- [34] Preto, V.M.M. Redes de distribuição ativas. 2012. 80f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Eléctrotécnica e de computadores) - Faculdade de engenharia do porto. Porto. Março, 2012.
- [35] Costa J.P. Análise estática e dinâmica de redes de distribuição com presença de geração distribuída utilizando o *software* simulight. 2014. 78f. Trabalho de conclusão de curso (TCC em Engenharia elétrica) – UFPA. Belém. Janeiro, 2014.
- [36] Pilo, F. Advanced DMS to Manage Active Distribution Networks, IEEE, 2009. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/F05281947.pdf>. Consultado em 12-12-2018.
- [37] Unesp. Sistemas testes. <http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193> Consultado em 25-10-2018.

## ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTE UTILIZADOS.

Tabela A.1: Dados de barras do sistema teste 1:

Barras	P (MVA)	Q (MVA)
1	0	0
2	0,100	0,060

Fonte: Autor

Tabela A.2: Dados de Ramos do sistema teste 1.

De	Para	R (p.u)	X(p.u)
1	2	0,0575	0,0293

Fonte: Autor

Tabela A.3: Dados de barras do sistema teste 2:

Bar.	P(MVA)	Q(MVA)	Bar.	P(MVA)	Q(MVA)	Bar.	P(MVA)	Q(MVA)
1	0	0	24	0,028	0,02	47	0	0
2	0	0	25	0	0	48	0,079	0,056
3	0	0	26	0,013	0,01	49	0,384	0,274
4	0	0	27	0,013	0,01	50	0,384	0,274
5	0	0	28	0,026	0,018	51	0,04	0,028
6	0,002	0,002	29	0,026	0,018	52	0,003	0,002
7	0,04	0,029	30	0	0	53	0,004	0,003
8	0,075	0,053	31	0	0	54	0,026	0,018
9	0,03	0,021	32	0	0	55	0,024	0,017
10	0,028	0,018	33	0,013	0,01	56	0	0
11	0,145	0,103	34	0,019	0,014	57	0	0
12	0,145	0,103	35	0,006	0,004	58	0	0
13	0,007	0,005	36	0,026	0,018	59	0,1	0,071
14	0,007	0,005	37	0,026	0,018	60	0	0
15	0	0	38	0	0	61	1,244	0,887
16	0,045	0,029	39	0,023	0,016	62	0,032	0,022
17	0,06	0,034	40	0,023	0,016	63	0	0
18	0,06	0,034	41	0,001	0	64	0,227	0,161
19	0	0	42	0	0	65	0,059	0,041
20	0,001	0	43	0,006	0,004	66	0,017	0,012
21	0,114	0,08	44	0	0	67	0,017	0,012
22	0,005	0,003	45	0,039	0,026	68	0,028	0,02
23	0	0	46	0,039	0,026	69	0,028	0,02

Fonte: M.E. Baran, Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System. [13].

Tabela A.4: Dados de ramos do sistema teste 2:

De	Para	R (p.u)	X(p.u)	De	Para	R (p.u)	X(p.u)
1	2	0,0003	0,0007	34	35	0,9197	0,304
2	3	0,0003	0,0007	36	37	0,0399	0,0976
3	4	0,0009	0,0022	37	38	0,0657	0,0767
4	5	0,0157	0,0183	38	39	0,019	0,0221
5	6	0,2284	0,1163	39	40	0,0011	0,0013
6	7	0,2377	0,1211	40	41	0,4544	0,5309
7	8	0,0575	0,0293	41	42	0,1934	0,226
8	9	0,0308	0,0157	42	43	0,0256	0,0298
9	10	0,511	0,1689	43	44	0,0057	0,0072
10	11	0,1168	0,0386	44	45	0,0679	0,0857
11	12	0,4439	0,1467	45	46	0,0006	0,0007
12	13	0,6426	0,2121	4	47	0,0021	0,0052
13	14	0,6514	0,2153	47	48	0,0531	0,1924
14	15	0,6601	0,2181	48	49	0,1808	0,4424
15	16	0,1227	0,0406	49	50	0,0513	0,1255
16	17	0,2336	0,0772	8	51	0,0579	0,0295
17	18	0,0029	0,001	51	52	0,2071	0,0695
18	19	0,2044	0,0676	9	53	0,1086	0,0553
19	20	0,1314	0,0431	53	54	0,1267	0,0645
20	21	0,2131	0,0704	54	55	0,1773	0,0903
21	22	0,0087	0,0029	55	56	0,1755	0,0894
22	23	0,0993	0,0328	56	57	0,992	0,333
23	24	0,2161	0,0714	57	58	0,489	0,1641
24	25	0,4672	0,1544	58	59	0,1898	0,0628
25	26	0,1927	0,0637	59	60	0,2409	0,0731
26	27	0,1081	0,0357	60	61	0,3166	0,1613
3	28	0,0027	0,0067	61	62	0,0608	0,0309
28	29	0,0399	0,0976	62	63	0,0905	0,046
29	30	0,2482	0,082	63	64	0,4433	0,2258
30	31	0,0438	0,0145	64	65	0,6495	0,3308
31	32	0,219	0,0724	11	66	0,1255	0,0381
32	33	0,5235	0,1757	66	67	0,0029	0,0009
33	34	1,0657	0,3523	12	68	0,4613	0,1525

Fonte: Fonte: M.E. Baran, Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System [13].

Tabela A.5: Dados de barras do sistema teste 3:

Bar.	P(MVA)	Q(MVA)	Bar.	P(MVA)	Q(MVA)	Bar.	P(MVA)	Q(MVA)
1	0	0	159	0	0	318	0	0
2	0	0	160	0,78375	0,25761	319	0	0

3	0	0	161	0	0	320	0,00779	0,00256
4	0,43015	0,17782	162	0	0	321	0	0
5	0	0	163	0	0	322	0	0
6	0	0	164	0	0	323	0	0
7	0	0	165	0	0	324	0	0
8	0	0	166	0	0	325	0	0
9	0,43015	0,17782	167	0	0	326	0	0
10	0,43015	0,17782	168	0	0	327	0	0
11	0,43015	0,17782	169	0	0	328	0,01055	0,00347
12	0	0	170	0	0	329	0	0
13	0	0	171	0,21334	0,06139	330	0	0
14	0	0	172	0	0	331	0	0
15	0	0	173	0	0	332	0	0
16	0,43015	0,17782	174	0	0	333	0	0
17	0,43015	0,17782	175	0	0	334	0	0
18	0	0	176	0	0	335	0	0
19	0	0	177	0	0	336	0	0
20	0,43015	0,17782	178	0	0	337	0	0
21	0	0	179	0	0	338	0	0
22	0	0	180	0	0	339	0	0
23	0	0	181	0	0	340	0	0
24	0	0	182	0	0	341	0	0
25	0	0	183	0	0	342	0	0
26	0	0	184	0	0	343	0,00437	0,00144
27	0	0	185	0	0	344	0	0
28	0	0	186	0	0	345	0	0
29	0	0	187	0	0	346	0	0
30	0	0	188	0	0	347	0	0
31	0,43015	0,17782	189	0	0	348	0,00608	0,002
32	0	0	190	0	0	349	0	0
33	0	0	191	0	0	350	0	0
34	0	0	192	0	0	351	0,01074	0,00353
35	0	0	193	0	0	352	0	0
36	0	0	194	0	0	353	0	0
37	0	0	195	0	0	354	0	0
38	0	0	196	0	0	355	0	0
39	0	0	197	0	0	356	0	0
40	0	0	198	0	0	357	0	0
41	0	0	199	0	0	358	0,02062	0,00678
42	0	0	200	0	0	359	0	0

43	0	0	201	0	0	360	0,02765	0,00909
44	0	0	202	0	0	361	0	0
45	0	0	203	0	0	362	0,0058	0,00191
46	0	0	204	0	0	363	0	0
47	0	0	205	0	0	364	0,00513	0,00169
48	0	0	206	0	0	365	0	0
49	0	0	207	0	0	366	0,00551	0,00181
50	0	0	208	0	0	367	0	0
51	0	0	209	0	0	368	0,00019	0,0625
52	0,001	-0,0028	210	0	0	369	0	0
53	0	0	211	0	0	370	0	0
54	0	0	212	0	0	371	0	0
55	0	0	213	0,32015	0,10523	372	0	0
56	0	0	214	0	0	373	0	0
57	0	0	215	0	0	374	0	0
58	0	0	216	0	0	375	0	0
59	0,43015	0,17782	217	0	0	376	0	0
60	0	0	218	0	0	377	0	0
61	0	0	219	0	0	378	0,00694	0,00228
62	0	0	220	0	0	379	0	0
63	0	0	221	0	0	380	0	0
64	0	0	222	0	0	381	0,01112	0,00365
65	0	0	223	0	0	382	0	0
66	0,43015	0,17782	224	0	0	383	0	0
67	0,323	0,10617	225	0	0	384	0	0
68	0	0	226	0	0	385	0	0
69	0	0	227	0	0	386	0	0
70	0,43015	0,17782	228	0	0	387	0,01226	0,00403
71	0	0	229	0	0	388	0,01967	0,00646
72	0	0	230	0	0	389	0	0
73	0	0	231	0	0	390	0	0
74	0	0	232	0	0	391	0,02024	0,00665
75	0	0	233	0	0	392	0	0
76	0	0	234	0	0	393	0,07534	0,02476
77	0	0	235	0	0	394	0	0
78	0	0	236	0	0	395	0,01083	0,00356
79	0	0	237	0	0	396	0,00409	0,00134
80	0	0	238	0	0	397	0,02423	0,00796
81	0	0	239	0	0	398	0	0
82	0	0	240	0	0	399	0,01853	0,00609

83	0	0	241	0	0	400	0	0
84	0	0	242	0	0	401	0,0172	0,00565
85	0	0	243	0	0	402	0	0
86	0	0	244	0	0	403	0	0
87	0	0	245	0	0	404	0	0
88	0	0	246	0	0	405	0	0
89	0	0	247	0	0	406	0	0
90	0	0	248	0	0	407	0	0
91	0,43015	0,17782	249	0	0	408	0	0
92	0	0	250	0	0	409	0	0
93	0,00069	0,00203	251	0	0	410	0	0
94	0	0	252	0	0	411	0,01093	0,00359
95	0	0	253	0	0	412	0,03401	0,01118
96	0	0	254	0	0	413	0	0
97	0,00082	0,00137	255	0	0	414	0,002	0,00066
98	0	0	256	0	0	415	0	0
99	0,13015	0,04278	257	0	0	416	0	0
100	0	0	258	0	0	417	0	0
101	0	0	259	0	0	418	0,0875	0,02876
102	0	0	260	0	0	419	0	0
103	0	0	261	0,01701	0,00559	420	0	0
104	0	0	262	0	0	421	0	0
105	0	0	263	0,038	0,01249	422	0	0
106	0	0	264	0	0	423	0	0
107	0	0	265	0	0	424	0	0
108	0	0	266	0	0	425	0	0
109	0	0	267	0	0	426	0	0
110	0	0	268	0,03952	0,01299	427	0,01169	0,00384
111	0	0	269	0,02708	0,0089	428	0	0
112	0,0005	0,0015	270	0	0	429	0,01587	0,00522
113	0	0	271	0,02955	0,00971	430	0	0
114	0	0	272	0	0	431	0	0
115	0	0	273	0	0	432	0,00865	0,00284
116	0	0	274	0,01207	0,00397	433	0	0
117	0,04675	0,02498	275	0,01321	0,00434	434	0,04	0,01315
118	0	0	276	0,01577	0,00518	435	0	0
119	0	0	277	0	0	436	0	0
120	0	0	278	0	0	437	0	0
121	0	0	279	0,01007	0,00331	438	0,0209	0,00687
122	0	0	280	0,0267	0,00877	439	0,00219	0,00072

123	0	0	281	0	0	440	0	0
124	0,47025	0,15456	282	0	0	441	0	0
125	0	0	283	0	0	442	0	0
126	0	0	284	0,00561	0,00184	443	0	0
127	0	0	285	0	0	444	0	0
128	0	0	286	0,01102	0,00362	445	0,00551	0,00181
129	0	0	287	0	0	446	0,0114	0,00375
130	0	0	288	0	0	447	0,12749	0,0419
131	0	0	289	0,04266	0,01402	448	0	0
132	0	0	290	0	0	449	0	0
133	0	0	291	0,01634	0,00537	450	0	0
134	0	0	292	0,01501	0,00493	451	0	0
135	0	0	293	0	0	452	0	0
136	0	0	294	0	0	453	0	0
137	0	0	295	0	0	454	0,00703	0,00231
138	0	0	296	0	0	455	0	0
139	0	0	297	0	0	456	0	0
140	0	0	298	0	0	457	0,01254	0,00412
141	0,00059	0,00112	299	0	0	458	0	0
142	0	0	300	0,00627	0,00206	459	0	0
143	0,08351	0,02056	301	0	0	460	0	0
144	0	0	302	0	0	461	0	0
145	0	0	303	0	0	462	0,01207	0,00397
146	0	0	304	0	0	463	0,01606	0,00528
147	0	0	305	0,01482	0,00487	464	0,02062	0,00678
148	0	0	306	0,0019	0,00063	465	0	0
149	0,14024	0,07493	307	0,00542	0,00178	466	0	0
150	0	0	308	0	0	467	0	0
151	0	0	309	0,03534	0,01162	468	0,00409	0,00134
152	0	0	310	0,01131	0,00372	469	0,01473	0,00484
153	0,04631	0,02967	311	0	0	470	0,01739	0,00571
154	0	0	312	0	0	471	0,00646	0,00212
155	0	0	313	0	0	472	0,02527	0,00831
156	0	0	314	0,02746	0,00902	473	0	0
157	0	0	315	0	0	474	0,01292	0,00425
158	0	0	316	0	0	475	0	0
			317	0	0	476	0,01292	0,00425

Fonte: J. S. Costa, Técnicas de otimização aplicadas a sistemas Elétricos de distribuição. [14].

Tabela A.6: Dados de ramos do sistema teste 3:

De	Para	R (p.u)	X(p.u)	De	Para	R (p.u)	X(p.u)
1	258	0,000284	0,000378	239	235	0,000961	0,000441
2	1	1,00E-05	1,00E-05	240	236	0,00052	0,000236
3	2	0,000299	0,000599	241	238	0,000315	0,000142
4	3	0,001008	0,000457	242	239	0,001119	0,00052
5	3	0,000205	0,000425	243	239	0,000473	0,000221
6	5	9,45E-05	0,000189	244	240	0,001071	0,000488
7	6	0,000599	0,001182	245	240	0,001024	0,000457
8	6	0,00011	0,000221	246	242	1,00E-05	1,00E-05
9	7	0,000189	0,000362	247	243	0,000504	0,000236
10	7	3,15E-05	6,30E-05	248	246	0,000504	0,000236
11	8	9,45E-05	0,000173	249	247	1,00E-05	1,00E-05
12	9	0,000205	0,00041	250	248	0,000488	0,000221
13	12	7,88E-05	0,000173	251	249	0,000347	0,000158
14	13	1,00E-05	1,00E-05	252	250	0,000473	0,000221
15	14	0,00011	0,000221	253	250	0,000614	0,000284
16	15	0,000268	0,00052	254	253	0,000914	0,000425
17	15	3,15E-05	6,30E-05	255	254	0,00052	0,000236
18	15	9,45E-05	0,000189	256	254	0,001056	0,000488
19	17	0,000284	0,000331	257	255	0,000425	0,000205
20	18	9,45E-05	0,000205	259	258	7,88E-05	0,000158
21	19	0,00011	0,000221	260	259	1,00E-05	1,00E-05
22	21	1,00E-05	1,00E-05	261	260	0,000693	0,001386
23	22	1,58E-05	3,15E-05	262	261	6,30E-05	0,000126
24	23	0,00011	0,000221	263	262	0,000441	0,000898
25	23	9,45E-05	4,73E-05	264	262	1,00E-05	1,00E-05
26	23	0,000457	0,000221	265	263	0,000221	0,000457
27	24	0,00011	0,000205	266	264	0,000536	0,000252
28	25	1,00E-05	1,00E-05	267	265	0,000236	0,000473
29	27	0,000221	0,000457	268	265	0,000299	0,000142
30	28	0,000394	0,000189	269	266	0,000567	0,000252
31	29	3,15E-05	6,30E-05	270	266	0,000252	0,00011
32	29	7,88E-05	0,000158	271	267	0,000173	0,000236
33	29	7,88E-05	0,000158	272	267	6,30E-05	0,000142
34	30	0,000331	6,30E-05	273	270	0,000205	9,45E-05
35	32	0,000504	0,000236	274	270	0,000158	7,88E-05
36	33	1,00E-05	1,00E-05	275	270	0,000898	0,00041
37	35	1,00E-05	1,00E-05	276	272	0,00011	0,000221
38	36	0,000189	0,000378	277	272	9,45E-05	4,73E-05
39	37	0,000394	6,30E-05	278	273	1,00E-05	1,00E-05
40	38	3,15E-05	7,88E-05	279	273	0,001119	0,00052
41	40	0,00011	0,000205	280	276	0,000315	0,00063

42	40	0,000315	0,000142	281	277	1,00E-05	1,00E-05
43	40	0,000331	0,000677	282	278	0,000173	7,88E-05
44	41	0,00011	0,000221	283	280	9,45E-05	0,000205
45	43	9,45E-05	0,000189	284	281	0,00041	0,000189
46	44	1,00E-05	1,00E-05	285	283	1,00E-05	1,00E-05
47	45	0,000473	0,000221	286	284	0,000488	0,000221
48	45	0,000268	0,000536	287	285	9,45E-05	0,000189
49	46	6,30E-05	0,000126	288	287	0,000126	7,88E-05
50	47	0,000441	0,000205	289	287	9,45E-05	0,000205
51	48	7,88E-05	0,000158	290	288	1,00E-05	1,00E-05
52	49	3,15E-05	4,73E-05	291	289	0,000205	0,00041
53	50	0,000441	0,000205	292	290	0,000142	9,45E-05
54	52	0,000126	0,000142	293	291	4,73E-05	9,45E-05
55	52	0,000205	0,000221	294	292	0,000221	0,000142
56	52	7,88E-05	7,88E-05	295	294	1,58E-05	3,15E-05
57	53	1,00E-05	1,00E-05	296	295	4,73E-05	9,45E-05
58	54	9,45E-05	0,00011	297	295	1,58E-05	3,15E-05
59	55	0,00041	0,000835	298	296	1,00E-05	1,00E-05
60	56	1,00E-05	1,00E-05	299	297	9,45E-05	6,30E-05
61	57	9,45E-05	4,73E-05	300	298	0,000126	0,000252
62	58	1,00E-05	1,00E-05	301	298	0,000126	0,000252
63	60	0,000142	0,000173	302	299	9,45E-05	0,000173
64	60	7,88E-05	9,45E-05	303	300	0,00011	0,000205
65	61	0,000425	0,000205	304	303	1,00E-05	1,00E-05
66	61	0,000866	0,000394	305	304	9,45E-05	0,000189
67	62	0,000488	0,000221	306	305	9,45E-05	0,000189
68	64	7,88E-05	9,45E-05	307	306	0,000126	0,000252
69	68	0,000536	0,000614	308	307	0,000126	0,000252
70	68	0,000268	0,000299	309	308	7,88E-05	0,000173
71	69	0,000142	0,000158	310	309	0,000158	0,000331
72	71	1,00E-05	1,00E-05	311	310	7,88E-05	0,000158
73	72	0,00052	0,000583	312	311	1,00E-05	1,00E-05
74	73	0,000126	0,000142	313	312	0,000189	0,000394
75	74	0,000347	0,000394	314	313	6,30E-05	0,00011
76	74	0,000425	0,000205	315	313	4,73E-05	9,45E-05
77	75	0,000236	0,000268	316	313	0,000158	0,000331
78	76	1,00E-05	1,00E-05	317	314	0,00011	0,000205
79	77	0,000205	0,00041	318	316	1,00E-05	1,00E-05
80	78	0,003056	0,001402	319	318	0,000347	0,000693
81	79	0,000189	0,000394	320	319	7,88E-05	0,000142
82	79	0,000315	0,000142	321	320	7,88E-05	0,000173
83	79	0,001323	0,000614	322	321	0,000142	0,000299
84	80	0,000347	0,000158	323	321	1,00E-05	1,00E-05
85	80	0,00156	0,000725	324	322	3,15E-05	4,73E-05
86	80	0,000378	0,000158	325	323	4,73E-05	3,15E-05

87	81	9,45E-05	0,000189	326	324	9,45E-05	0,000189
88	82	1,00E-05	1,00E-05	327	326	1,00E-05	1,00E-05
89	86	1,00E-05	1,00E-05	328	327	0,00011	0,000205
90	87	1,00E-05	1,00E-05	329	328	0,00011	0,000205
91	88	0,000189	9,45E-05	330	329	1,00E-05	1,00E-05
92	89	0,001134	0,000504	331	329	0,000425	0,000851
93	90	3,15E-05	6,30E-05	332	330	0,000331	0,000142
94	92	0,000331	0,000142	333	331	1,58E-05	3,15E-05
95	92	0,002205	0,001008	334	331	1,58E-05	4,73E-05
96	93	1,00E-05	1,00E-05	335	331	7,88E-05	0,000173
97	93	0,00011	0,000221	336	332	1,00E-05	1,00E-05
98	94	0,000961	0,000425	337	333	1,00E-05	1,00E-05
99	96	0,000284	0,000126	338	334	1,00E-05	1,00E-05
100	97	6,30E-05	0,000126	339	335	0,000142	0,000284
101	97	6,30E-05	0,000126	340	335	0,000173	0,000362
102	97	0,000236	0,000473	341	335	1,58E-05	3,15E-05
103	98	0,000299	0,000126	342	336	0,000299	0,000142
104	98	0,002158	0,000992	343	337	9,45E-05	0,000189
105	100	9,45E-05	0,000173	344	338	0,000378	0,000158
106	101	0,000362	0,000173	345	339	1,00E-05	1,00E-05
107	101	0,000457	0,000221	346	340	1,00E-05	1,00E-05
108	101	1,58E-05	3,15E-05	347	343	0,000284	0,000126
109	102	9,45E-05	0,000189	348	344	0,000378	0,000158
110	104	0,002001	0,000914	349	344	1,00E-05	1,00E-05
111	105	1,00E-05	1,00E-05	350	345	7,88E-05	0,000158
112	105	0,00011	0,000205	351	346	7,88E-05	0,000173
113	106	0,000536	0,000252	352	347	1,00E-05	1,00E-05
114	106	1,00E-05	1,00E-05	353	349	0,000347	0,000158
115	107	1,00E-05	1,00E-05	354	350	0,000331	0,000662
116	108	1,00E-05	1,00E-05	355	350	1,00E-05	1,00E-05
117	111	3,15E-05	7,88E-05	356	351	9,45E-05	0,000173
118	112	1,00E-05	1,00E-05	357	352	0,000189	7,88E-05
119	112	7,88E-05	0,000158	358	354	0,00011	0,000205
120	113	1,00E-05	1,00E-05	359	354	1,00E-05	1,00E-05
121	114	0,000457	0,000221	360	355	0,000284	0,000126
122	115	0,000504	0,000236	361	356	4,73E-05	0,00011
123	116	3,15E-05	6,30E-05	362	356	0,00063	0,000284
124	118	0,000299	0,000142	363	358	0,000221	0,000158
125	119	1,00E-05	1,00E-05	364	359	0,000126	6,30E-05
126	120	0,000567	0,000252	365	361	7,88E-05	3,15E-05
127	122	0,00156	0,000725	366	361	0,001638	0,000756
128	123	3,15E-05	6,30E-05	367	361	9,45E-05	0,000189
129	125	7,88E-05	0,000158	368	363	0,00011	7,88E-05
130	126	0,000583	0,000268	369	363	1,00E-05	1,00E-05
131	127	0,001213	0,000551	370	365	1,00E-05	1,00E-05

132	127	0,000473	0,000221	371	367	1,00E-05	1,00E-05
133	128	4,73E-05	9,45E-05	372	368	0,00011	7,88E-05
134	128	1,00E-05	1,00E-05	373	369	0,000599	0,000268
135	129	0,00063	0,000284	374	370	0,000236	0,00011
136	129	0,00041	0,000835	375	371	7,88E-05	0,000173
137	130	0,000536	0,000252	376	372	0,000315	0,000142
138	132	1,00E-05	1,00E-05	377	372	6,30E-05	3,15E-05
139	134	0,00052	0,000221	378	374	0,000457	0,000221
140	135	1,00E-05	1,00E-05	379	374	1,00E-05	1,00E-05
141	136	9,45E-05	0,000173	380	375	0,000268	0,000536
142	137	0,000362	0,000473	381	375	0,000126	0,000252
143	138	0,000331	0,000158	382	375	1,58E-05	3,15E-05
144	139	1,00E-05	1,00E-05	383	376	0,000173	7,88E-05
145	140	0,000473	0,000221	384	376	1,00E-05	1,00E-05
146	141	0,000142	0,000299	385	377	1,00E-05	1,00E-05
147	141	1,00E-05	1,00E-05	386	378	0,001245	0,000567
148	142	0,000158	0,000221	387	379	0,000252	0,00011
149	144	0,000173	7,88E-05	388	380	0,00011	0,000221
150	145	0,00052	0,000236	389	380	1,00E-05	1,00E-05
151	146	0,000488	0,000992	390	381	6,30E-05	0,000126
152	146	0,001024	0,000473	391	382	0,00052	0,000236
153	147	0,000315	0,000142	392	383	1,00E-05	1,00E-05
154	148	0,000473	0,000221	393	384	0,000315	0,000142
155	150	1,00E-05	1,00E-05	394	385	0,000142	9,45E-05
156	150	0,001418	0,000662	395	386	0,00074	0,000331
157	151	0,000693	0,000315	396	386	0,000268	0,000126
158	151	0,00011	4,73E-05	397	386	0,001371	0,00063
159	151	1,58E-05	3,15E-05	398	388	0,00011	0,000221
160	155	0,000252	0,00011	399	389	0,000347	0,000158
161	156	0,002111	0,000977	400	390	1,00E-05	1,00E-05
162	156	0,000394	0,000189	401	392	0,000142	6,30E-05
163	158	1,00E-05	1,00E-05	402	394	6,30E-05	4,73E-05
164	159	1,00E-05	1,00E-05	403	394	0,000221	0,000158
165	163	0,000504	0,000236	404	396	0,000567	0,000252
166	164	0,00011	0,000221	405	397	0,00041	0,000189
167	165	1,00E-05	1,00E-05	406	398	0,00011	0,000221
168	166	1,00E-05	1,00E-05	407	398	1,00E-05	1,00E-05
169	166	3,15E-05	6,30E-05	408	400	7,88E-05	0,000142
170	167	0,000599	0,000268	409	402	1,00E-05	1,00E-05
171	168	0,000599	0,000268	410	403	1,00E-05	1,00E-05
172	169	0,000189	0,000378	411	404	0,00052	0,000236
173	170	0,000158	7,88E-05	412	404	0,00074	0,000331
174	170	0,000284	0,000126	413	405	1,00E-05	1,00E-05
175	172	0,000284	0,000567	414	407	0,000315	0,000142
176	173	1,00E-05	1,00E-05	415	408	0,000126	0,000252

177	174	1,00E-05	1,00E-05	416	408	7,88E-05	0,000158
178	175	0,000331	0,000158	417	408	0,000158	0,000315
179	175	0,00011	0,000221	418	409	0,000284	0,000126
180	176	0,000504	0,000236	419	410	0,000268	0,000173
181	177	0,000882	0,00041	420	413	0,000362	0,000173
182	178	1,00E-05	1,00E-05	421	415	1,00E-05	1,00E-05
183	178	0,000252	0,00011	422	417	0,000662	0,000299
184	179	7,88E-05	0,000158	423	417	0,000189	0,000394
185	180	0,00156	0,000725	424	419	0,000158	9,45E-05
186	181	1,00E-05	1,00E-05	425	419	0,00041	0,000268
187	181	0,000803	0,000362	426	419	0,000252	0,000488
188	182	0,001402	0,000646	427	421	6,30E-05	0,00011
189	183	1,00E-05	1,00E-05	428	422	1,00E-05	1,00E-05
190	185	0,001197	0,000551	429	426	0,000236	0,000488
191	185	0,000567	0,000252	430	426	1,00E-05	1,00E-05
192	186	0,000331	0,000158	431	427	4,73E-05	9,45E-05
193	187	0,00041	0,000189	432	428	0,000425	0,000205
194	188	1,00E-05	1,00E-05	433	429	0,000158	0,000315
195	188	0,000914	0,000425	434	430	0,000299	0,000142
196	189	0,000362	0,000173	435	431	1,00E-05	1,00E-05
197	190	1,00E-05	1,00E-05	436	431	0,000158	0,000299
198	190	0,000362	0,000173	437	432	0,002048	0,000945
199	191	0,000567	0,000252	438	435	0,000378	0,000173
200	193	0,000835	0,000378	439	436	0,000268	0,000126
201	194	0,000315	0,000142	440	436	1,58E-05	3,15E-05
202	195	0,00104	0,000473	441	437	0,000473	0,000221
203	195	1,00E-05	1,00E-05	442	437	1,00E-05	1,00E-05
204	196	0,001182	0,000551	443	440	4,73E-05	7,88E-05
205	197	0,003214	0,001481	444	440	0,00011	4,73E-05
206	198	0,000394	0,000189	445	440	0,000819	0,000378
207	199	0,000268	0,000126	446	441	0,00104	0,000473
208	199	9,45E-05	4,73E-05	447	442	0,000299	0,000142
209	200	0,000709	0,000331	448	443	0,000299	0,000142
210	200	0,000677	0,000315	449	443	0,000315	0,000142
211	200	0,000614	0,000284	450	443	0,000252	0,000504
212	201	0,000347	0,000158	451	444	1,00E-05	1,00E-05
213	203	0,000158	7,88E-05	452	448	1,00E-05	1,00E-05
214	205	0,001103	0,000504	453	449	1,00E-05	1,00E-05
215	206	1,00E-05	1,00E-05	454	451	0,000473	0,000221
216	208	1,00E-05	1,00E-05	455	452	0,001701	0,000788
217	209	1,00E-05	1,00E-05	456	453	0,001764	0,000803
218	210	1,00E-05	1,00E-05	457	454	0,000441	0,000205
219	215	0,001182	0,000551	458	455	0,000284	0,000126
220	216	0,00052	0,000236	459	455	0,000299	0,000142
221	217	0,001386	0,000646	460	455	0,000315	0,000142

222	218	0,000221	0,00011	461	456	9,45E-05	4,73E-05
223	219	0,01443	1,58E-05	462	456	0,001481	0,000677
224	220	0,000567	0,000252	463	458	0,000425	0,000205
225	220	1,00E-05	1,00E-05	464	458	0,000488	0,000221
226	221	0,000441	0,000205	465	459	1,00E-05	1,00E-05
227	221	0,000473	0,000221	466	460	0,000331	0,000142
228	222	0,001938	0,000898	467	461	0,000441	0,000205
229	223	0,000378	0,000173	468	461	0,001418	0,000662
230	225	0,000189	9,45E-05	469	463	0,00041	0,000189
231	227	1,00E-05	1,00E-05	470	464	0,000504	0,000252
232	228	0,000236	0,00011	471	465	0,000362	0,000173
233	229	1,00E-05	1,00E-05	472	466	0,000488	0,000221
234	229	0,001544	0,000709	473	467	1,00E-05	1,00E-05
235	231	0,000851	0,000394	474	471	0,000252	0,00011
236	233	0,001276	0,000551	475	473	0,000142	6,30E-05
237	235	0,000362	0,000173	476	474	0,000299	0,000142
238	235	0,000851	0,000394				

Fonte: J. S. Costa, Técnicas de otimização aplicadas a sistemas Elétricos de distribuição. [14].

Tabela A.7: Dados de barra para o sistema teste 4.

Bar.	P(MVA)	Q(MVA)	Bar.	P(MVA)	Q(MVA)	Bar.	P(MVA)	Q(MVA)
1	0	0	361	0	0	721	0	0
2	0	0	362	0,0054	0,0041	722	0	0
3	0	0	363	0	0	723	0,0123	0,0088
4	0	0	364	0	0	724	0,0063	0,0051
5	0	0	365	0	0	725	0,0105	0,0084
6	0	0	366	0,0025	0,0018	726	0	0
7	0	0	367	0	0	727	0,0049	0,0036
8	0	0	368	0	0	728	0	0
9	0,0404	0,0202	369	0,007	0,005	729	0	0
10	0,0098	0,0085	370	0,0113	0,0085	730	0,0023	0,0017
11	0	0	371	0	0	731	0,0078	0,0062
12	0	0	372	0	0	732	0,0035	0,0028
13	0	0	373	0,0037	0,0027	733	0,0039	0,0034
14	0,012	0,0096	374	0	0	734	0,011	0,0078
15	0	0	375	0	0	735	0,0009	0,0007
16	0	0	376	0	0	736	0	0
17	0	0	377	0,0022	0,0016	737	0	0
18	0,0027	0,0013	378	0,0028	0,0022	738	0,0086	0,0061
19	0	0	379	0,0087	0,007	739	0	0
20	0	0	380	0	0	740	0,0126	0,009
21	0	0	381	0	0	741	0,0099	0,008
22	0,0087	0,007	382	0	0	742	0	0

23	0	0	383	0,0043	0,0031	743	0	0
24	0,0107	0,0086	384	0,004	0,0028	744	0,0033	0,0026
25	0,0051	0,0041	385	0,0044	0,0032	745	0,0072	0,0058
26	0,0143	0,0115	386	0,0028	0,002	746	0,0032	0,0023
27	0,0376	0,0188	387	0,0157	0,0112	747	0	0
28	0	0	388	0	0	748	0	0
29	0	0	389	0	0	749	0,0188	0,0159
30	0	0	390	0	0	750	0	0
31	0	0	391	0,0043	0,0031	751	0,0105	0,0075
32	0	0	392	0	0	752	0	0
33	0,0021	0,0017	393	0,0029	0,0023	753	0	0
34	0,0073	0,0059	394	0	0	754	0	0
35	0,0104	0,0084	395	0	0	755	0,0085	0,0068
36	0	0	396	0	0	756	0	0
37	0,005	0,004	397	0	0	757	0,0125	0,009
38	0	0	398	0,0099	0,0079	758	0	0
39	0	0	399	0	0	759	0,004	0,0032
40	0,0074	0,0059	400	0,0126	0,009	760	0	0
41	0,0009	0,0007	401	0,0035	0,0028	761	0	0
42	0,0086	0,0069	402	0,0329	0,0228	762	0	0
43	0	0	403	0	0	763	0,013	0,0099
44	0	0	404	0,0084	0,0067	764	0,0202	0,0144
45	0	0	405	0,0012	0,0009	765	0	0
46	0,0115	0,0092	406	0	0	766	0,0095	0,0076
47	0	0	407	0	0	767	0,0022	0,0018
48	0	0	408	0,0063	0,0051	768	0	0
49	0	0	409	0	0	769	0,0033	0,0027
50	0	0	410	0	0	770	0,0024	0,002
51	0,0094	0,0076	411	0	0	771	0	0
52	0	0	412	0	0	772	0	0
53	0	0	413	0	0	773	0	0
54	0	0	414	0	0	774	0	0
55	0	0	415	0	0	775	0	0
56	0	0	416	0	0	776	0	0
57	0,0058	0,0042	417	0	0	777	0,0011	0,0009
58	0	0	418	0	0	778	0	0
59	0	0	419	0,0064	0,0051	779	0,0039	0,0034
60	0,0049	0,0039	420	0	0	780	0	0
61	0,0112	0,009	421	0	0	781	0,008	0,0064
62	0	0	422	0,0028	0,002	782	0	0
63	0	0	423	0,0084	0,006	783	0	0
64	0,0118	0,0095	424	0	0	784	0	0
65	0	0	425	0	0	785	0,0054	0,0044
66	0	0	426	0	0	786	0	0
67	0,0092	0,0074	427	0,008	0,0057	787	0	0

68	0,0083	0,0067	428	0,0052	0,0037	788	0,0045	0,0036
69	0,0121	0,01	429	0	0	789	0,0049	0,0039
70	0	0	430	0	0	790	0	0
71	0,0117	0,0096	431	0	0	791	0	0
72	0,014	0,0112	432	0,0042	0,0033	792	0	0
73	0	0	433	0	0	793	0	0
74	0	0	434	0,0084	0,0066	794	0,0044	0,0031
75	0,0155	0,0125	435	0,0099	0,008	795	0	0
76	0,0101	0,0082	436	0,0101	0,0081	796	0,0079	0,0057
77	0	0	437	0,007	0,0056	797	0,0025	0,0018
78	0	0	438	0,0065	0,0052	798	0,001	0,0008
79	0	0	439	0	0	799	0	0
80	0,0128	0,0104	440	0,0053	0,0038	800	0	0
81	0	0	441	0,0015	0,0012	801	0,0052	0,0041
82	0,0141	0,0113	442	0,0065	0,0056	802	0	0
83	0	0	443	0,0146	0,0104	803	0	0
84	0,016	0,0131	444	0,0112	0,008	804	0,0064	0,0046
85	0,0117	0,0097	445	0,0151	0,0108	805	0	0
86	0,0159	0,0127	446	0,0105	0,0081	806	0	0
87	0	0	447	0	0	807	0	0
88	0,0129	0,0105	448	0,0028	0,0022	808	0,004	0,0033
89	0,0083	0,0067	449	0,003	0,0021	809	0	0
90	0,0088	0,0071	450	0,0031	0,0025	810	0	0
91	0,0141	0,0113	451	0	0	811	0	0
92	0,0145	0,0118	452	0	0	812	0,0062	0,0044
93	0	0	453	0,0067	0,0054	813	0,0106	0,0076
94	0	0	454	0	0	814	0	0
95	0	0	455	0	0	815	0,0045	0,0036
96	0	0	456	0	0	816	0	0
97	0,0138	0,011	457	0	0	817	0	0
98	0	0	458	0	0	818	0	0
99	0	0	459	0	0	819	0	0
100	0,0421	0,0336	460	0	0	820	0	0
101	0	0	461	0	0	821	0,0066	0,0047
102	0,0092	0,0074	462	0	0	822	0,0048	0,0036
103	0,01	0,0084	463	0,0026	0,0019	823	0,0069	0,0049
104	0	0	464	0	0	824	0	0
105	0,012	0,0096	465	0	0	825	0,0103	0,0073
106	0	0	466	0	0	826	0,0171	0,0122
107	0,0138	0,0112	467	0	0	827	0	0
108	0,0123	0,0098	468	0,005	0,0039	828	0	0
109	0,0157	0,0131	469	0,0031	0,0025	829	0,0043	0,0031
110	0	0	470	0	0	830	0	0
111	0	0	471	0,0006	0,0005	831	0,0051	0,0037
112	0	0	472	0,0064	0,0046	832	0	0

113	0,0116	0,0093	473	0	0	833	0	0
114	0,0087	0,0072	474	0,0107	0,0082	834	0	0
115	0	0	475	0	0	835	0	0
116	0	0	476	0,009	0,0064	836	0,0025	0,0018
117	0	0	477	0,0057	0,0041	837	0,0085	0,0061
118	0	0	478	0	0	838	0,0039	0,0031
119	0	0	479	0,0167	0,0119	839	0	0
120	0	0	480	0,0054	0,0043	840	0	0
121	0	0	481	0	0	841	0	0
122	0,0087	0,0071	482	0	0	842	0,0062	0,0049
123	0	0	483	0	0	843	0	0
124	0,011	0,0088	484	0,0076	0,0061	844	0,0104	0,0075
125	0	0	485	0	0	845	0	0
126	0,0136	0,011	486	0	0	846	0,0048	0,0039
127	0	0	487	0	0	847	0	0
128	0	0	488	0,0041	0,003	848	0	0
129	0,0081	0,0065	489	0	0	849	0,0007	0,0006
130	0	0	490	0,0076	0,0054	850	0	0
131	0	0	491	0,0015	0,0013	851	0	0
132	0	0	492	0	0	852	0	0
133	0	0	493	0	0	853	0	0
134	0	0	494	0,0059	0,0045	854	0,0107	0,0077
135	0	0	495	0	0	855	0	0
136	0	0	496	0,0082	0,0059	856	0,0048	0,0034
137	0,0099	0,0079	497	0	0	857	0	0
138	0	0	498	0	0	858	0	0
139	0	0	499	0	0	859	0,0043	0,0035
140	0,0061	0,0048	500	0,0075	0,0061	860	0,0009	0,0007
141	0,0052	0,0042	501	0	0	861	0,0052	0,0037
142	0	0	502	0	0	862	0,0065	0,0049
143	0,0151	0,0121	503	0,0093	0,0073	863	0	0
144	0	0	504	0	0	864	0	0
145	0,0074	0,006	505	0	0	865	0,0026	0,0021
146	0	0	506	0,0028	0,0022	866	0	0
147	0,0119	0,0096	507	0	0	867	0	0
148	0	0	508	0	0	868	0	0
149	0,012	0,0097	509	0,0055	0,0044	869	0,0022	0,0018
150	0,0261	0,0217	510	0	0	870	0	0
151	0,0106	0,009	511	0,0022	0,0016	871	0,003	0,0022
152	0,0089	0,0072	512	0	0	872	0	0
153	0	0	513	0,0227	0,0162	873	0	0
154	0	0	514	0	0	874	0,0085	0,0069
155	0,0109	0,0087	515	0,006	0,0049	875	0	0
156	0	0	516	0	0	876	0	0
157	0,0066	0,0053	517	0	0	877	0	0

158	0	0	518	0	0	878	0	0
159	0,0083	0,0067	519	0,0041	0,0033	879	0	0
160	0	0	520	0	0	880	0,0049	0,0035
161	0	0	521	0,0025	0,0018	881	0,004	0,0032
162	0	0	522	0	0	882	0	0
163	0	0	523	0	0	883	0	0
164	0,0141	0,0113	524	0	0	884	0	0
165	0,0131	0,0105	525	0,0036	0,0029	885	0	0
166	0	0	526	0	0	886	0,0105	0,0075
167	0	0	527	0	0	887	0,001	0,0007
168	0	0	528	0	0	888	0	0
169	0,008	0,0065	529	0	0	889	0	0
170	0,0095	0,0079	530	0,0076	0,0058	890	0,0062	0,0049
171	0	0	531	0,004	0,0033	891	0	0
172	0	0	532	0	0	892	0	0
173	0	0	533	0,007	0,0056	893	0	0
174	0,0075	0,006	534	0	0	894	0,0051	0,0041
175	0	0	535	0	0	895	0,0032	0,0023
176	0	0	536	0	0	896	0,0028	0,002
177	0	0	537	0,0037	0,003	897	0	0
178	0	0	538	0,003	0,0022	898	0,0027	0,0022
179	0,0086	0,0069	539	0,0018	0,0014	899	0,0031	0,0022
180	0,008	0,0065	540	0	0	900	0	0
181	0	0	541	0,008	0,0057	901	0	0
182	0	0	542	0,0085	0,006	902	0,0029	0,0024
183	0	0	543	0,0134	0,0096	903	0	0
184	0,0086	0,0069	544	0	0	904	0	0
185	0,0068	0,0054	545	0	0	905	0,0069	0,0034
186	0	0	546	0	0	906	0	0
187	0	0	547	0,003	0,0023	907	0	0
188	0,0035	0,0028	548	0	0	908	0	0
189	0,0097	0,0079	549	0	0	909	0	0
190	0,0116	0,0093	550	0	0	910	0	0
191	0	0	551	0	0	911	0	0
192	0,012	0,0097	552	0	0	912	0,0066	0,0053
193	0	0	553	0	0	913	0	0
194	0	0	554	0,0042	0,0034	914	0	0
195	0,0068	0,0041	555	0	0	915	0	0
196	0	0	556	0	0	916	0,002	0,0016
197	0,0016	0,0012	557	0,0061	0,005	917	0	0
198	0,0112	0,009	558	0,012	0,0096	918	0,0096	0,0072
199	0	0	559	0	0	919	0,0114	0,0088
200	0	0	560	0	0	920	0,0037	0,003
201	0	0	561	0,0112	0,008	921	0	0
202	0	0	562	0,0049	0,0035	922	0,0042	0,0033

203	0,0092	0,0074	563	0	0	923	0,0054	0,0043
204	0,0102	0,0082	564	0	0	924	0	0
205	0,0085	0,0068	565	0,002	0,0016	925	0	0
206	0	0	566	0,0023	0,0019	926	0,0036	0,0027
207	0,0072	0,0058	567	0	0	927	0	0
208	0	0	568	0	0	928	0,0019	0,0015
209	0	0	569	0	0	929	0,0091	0,0072
210	0,0038	0,0027	570	0	0	930	0,0108	0,0082
211	0	0	571	0,0039	0,0028	931	0	0
212	0,0475	0,0393	572	0,004	0,0029	932	0,0032	0,0026
213	0,0038	0,0031	573	0,0032	0,0023	933	0,0062	0,005
214	0,0016	0,0013	574	0	0	934	0	0
215	0,0067	0,0048	575	0	0	935	0	0
216	0,0101	0,0081	576	0	0	936	0	0
217	0,0058	0,0046	577	0,0058	0,0041	937	0	0
218	0	0	578	0	0	938	0,0047	0,0038
219	0,0107	0,0086	579	0,0067	0,0053	939	0	0
220	0	0	580	0	0	940	0	0
221	0	0	581	0	0	941	0,0013	0,0011
222	0	0	582	0	0	942	0	0
223	0	0	583	0,0048	0,0035	943	0,009	0,0065
224	0,0056	0,004	584	0,0023	0,0017	944	0	0
225	0	0	585	0	0	945	0	0
226	0	0	586	0,0019	0,0015	946	0,0016	0,0011
227	0	0	587	0,0027	0,0022	947	0	0
228	0	0	588	0	0	948	0	0
229	0,011	0,0088	589	0	0	949	0	0
230	0,0057	0,0046	590	0,0068	0,0052	950	0,0071	0,0051
231	0	0	591	0,0031	0,0024	951	0	0
232	0	0	592	0,0154	0,0123	952	0	0
233	0,0064	0,0051	593	0	0	953	0,0028	0,0022
234	0	0	594	0,0056	0,0045	954	0	0
235	0	0	595	0,0065	0,0051	955	0,0042	0,0034
236	0,0038	0,0031	596	0	0	956	0	0
237	0	0	597	0	0	957	0,0093	0,0067
238	0	0	598	0,0042	0,0034	958	0,0111	0,0079
239	0	0	599	0,0047	0,0037	959	0	0
240	0	0	600	0,0092	0,0066	960	0,0065	0,0051
241	0	0	601	0,0028	0,002	961	0,0045	0,0036
242	0,0064	0,0051	602	0,0031	0,0022	962	0,006	0,0047
243	0	0	603	0,0062	0,0049	963	0	0
244	0	0	604	0	0	964	0	0
245	0,0049	0,0039	605	0	0	965	0	0
246	0,0052	0,0042	606	0,0053	0,0038	966	0	0
247	0	0	607	0,0071	0,005	967	0,003	0,0024

248	0,0012	0,001	608	0,0097	0,0077	968	0,0063	0,005
249	0,0061	0,0048	609	0	0	969	0,0045	0,0036
250	0,0438	0,0219	610	0	0	970	0,0014	0,0011
251	0	0	611	0	0	971	0	0
252	0,0083	0,0064	612	0	0	972	0	0
253	0,0082	0,0059	613	0,0041	0,0033	973	0	0
254	0	0	614	0	0	974	0	0
255	0,0039	0,0032	615	0,0032	0,0024	975	0	0
256	0,0029	0,0022	616	0	0	976	0,0066	0,0053
257	0,0014	0,001	617	0,0048	0,0039	977	0	0
258	0	0	618	0	0	978	0,0079	0,0063
259	0	0	619	0,0031	0,0025	979	0	0
260	0,0048	0,0038	620	0,0038	0,003	980	0,0032	0,0026
261	0,0075	0,006	621	0	0	981	0,0112	0,008
262	0	0	622	0	0	982	0	0
263	0	0	623	0,0025	0,0018	983	0	0
264	0	0	624	0,0057	0,004	984	0	0
265	0,0024	0,0019	625	0,0071	0,0057	985	0	0
266	0,0035	0,0028	626	0	0	986	0,0056	0,0045
267	0,0068	0,0054	627	0	0	987	0	0
268	0	0	628	0	0	988	0	0
269	0,0026	0,002	629	0,0051	0,0041	989	0,0022	0,0016
270	0	0	630	0,0051	0,0041	990	0	0
271	0	0	631	0	0	991	0,0061	0,0046
272	0,0027	0,0021	632	0,008	0,0059	992	0	0
273	0	0	633	0,0068	0,0052	993	0	0
274	0,0032	0,0026	634	0	0	994	0	0
275	0,0028	0,0021	635	0	0	995	0	0
276	0	0	636	0	0	996	0	0
277	0	0	637	0,0086	0,0069	997	0,0027	0,0022
278	0	0	638	0	0	998	0	0
279	0,0137	0,011	639	0,0035	0,0028	999	0	0
280	0	0	640	0,0039	0,0031	1000	0	0
281	0	0	641	0	0	1001	0	0
282	0	0	642	0	0	1002	0	0
283	0	0	643	0,0018	0,0013	1003	0	0
284	0,036	0,0279	644	0	0	1004	0,004683	0,003564
285	0,0038	0,003	645	0	0	1005	0	0
286	0,006	0,0048	646	0	0	1006	0	0
287	0	0	647	0	0	1007	0	0
288	0,0065	0,0046	648	0,0048	0,0038	1008	0,002584	0,002069
289	0	0	649	0,0094	0,0076	1009	0	0
290	0,0062	0,0044	650	0,0079	0,0064	1010	0	0
291	0,0034	0,0024	651	0,0041	0,0029	1011	0,010297	0,007562
292	0	0	652	0	0	1012	0	0

293	0	0	653	0,0064	0,0052	1013	0,005648	0,004522
294	0	0	654	0,0019	0,0016	1014	0	0
295	0	0	655	0	0	1015	0	0
296	0	0	656	0,0001	0,0001	1016	0	0
297	0,0049	0,0035	657	0	0	1017	0	0
298	0	0	658	0	0	1018	0,000167	0,000133
299	0,0033	0,0026	659	0,0076	0,0055	1019	0	0
300	0	0	660	0	0	1020	0,007184	0,005467
301	0,0024	0,0019	661	0	0	1021	0,005832	0,004518
302	0	0	662	0,0028	0,002	1022	0	0
303	0	0	663	0	0	1023	0	0
304	0,0033	0,0024	664	0,0108	0,0087	1024	0,00549	0,006705
305	0	0	665	0	0	1025	0,001543	0,001103
306	0	0	666	0	0	1026	0	0
307	0	0	667	0	0	1027	0	0
308	0,0025	0,002	668	0,0067	0,0053	1028	0,006285	0,005031
309	0	0	669	0,0063	0,0045	1029	0,0072	0,005763
310	0	0	670	0,007	0,0054	1030	0,002928	0,002268
311	0	0	671	0,0084	0,006	1031	0,004101	0,003231
312	0,0032	0,0028	672	0	0	1032	0	0
313	0,0027	0,0019	673	0	0	1033	0	0
314	0	0	674	0	0	1034	0	0
315	0,0074	0,0062	675	0,0036	0,0026	1035	0,014297	0,010219
316	0	0	676	0	0	1036	0,00429	0,003066
317	0,0022	0,0017	677	0,011	0,0085	1037	0	0
318	0,0091	0,0065	678	0	0	1038	0,003544	0,002666
319	0	0	679	0	0	1039	0	0
320	0	0	680	0	0	1040	0,00578	0,004627
321	0	0	681	0	0	1041	0,003026	0,002422
322	0	0	682	0	0	1042	0	0
323	0,0038	0,0029	683	0	0	1043	0	0
324	0	0	684	0,0025	0,0018	1044	0	0
325	0,0075	0,006	685	0	0	1045	0	0
326	0	0	686	0,0101	0,0081	1046	0,00268	0,002039
327	0,008	0,0065	687	0,0028	0,0022	1047	0	0
328	0	0	688	0	0	1048	0	0
329	0	0	689	0,0121	0,0087	1049	0,014629	0,010457
330	0	0	690	0	0	1050	0,003322	0,00266
331	0	0	691	0,0239	0,0137	1051	0,009805	0,007661
332	0,0076	0,0054	692	0	0	1052	0	0
333	0,0078	0,0055	693	0,0113	0,0091	1053	0,008373	0,005985
334	0	0	694	0	0	1054	0	0
335	0,0024	0,0017	695	0,0083	0,0063	1055	0	0
336	0	0	696	0,0064	0,0051	1056	0,003389	0,002713
337	0	0	697	0,0027	0,0023	1057	0,002019	0,001443

338	0	0	698	0	0	1058	0	0
339	0,0049	0,0038	699	0,0139	0,0099	1059	0	0
340	0	0	700	0,0092	0,0074	1060	0	0
341	0	0	701	0,0114	0,0081	1061	0	0
342	0,0082	0,0059	702	0,0083	0,0059	1062	0,005616	0,004014
343	0	0	703	0,0051	0,0038	1063	0	0
344	0,0025	0,002	704	0	0	1064	0,003103	0,002483
345	0,0086	0,0069	705	0,003	0,0022	1065	0	0
346	0,0105	0,0091	706	0,0206	0,0152	1066	0	0
347	0	0	707	0	0	1067	0	0
348	0	0	708	0	0	1068	0	0
349	0	0	709	0,001	0,0007	1069	0,00047	0,000376
350	0,0072	0,0051	710	0,0121	0,0087	1070	0,00595	0,004763
351	0	0	711	0,004	0,0028	1071	0,005444	0,004357
352	0	0	712	0	0	1072	0	0
353	0	0	713	0	0	1073	0,001183	0,000845
354	0,0085	0,0068	714	0,0075	0,0061	1074	0,002459	0,001969
355	0	0	715	0	0	1075	0,002206	0,001577
356	0,0025	0,002	716	0	0	1076	0	0
357	0,0012	0,0009	717	0	0	1077	0,000455	0,000364
358	0	0	718	0,0021	0,0017	1078	0	0
359	0	0	719	0,0021	0,0017	1079	0,001228	0,000878
360	0,004	0,0028	720	0,0028	0,0021	1080	0	0

Fonte: <http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193>. [37]

Tabela A.8: Dados de ramos do sistema teste 4.

De	Para	R (p.u)	X(p.u)	De	Para	R (p.u)	X(p.u)
1	2	0,007299	0,020535	523	542	0,108774	0,038622
2	3	0,034231	0,049632	523	543	0,157649	0,037161
2	4	0,007882	0,007786	523	544	0,169494	0,060182
3	5	0,051561	0,07476	524	545	0,043471	0,010247
3	6	0,002416	0,002386	524	546	0,271565	0,096423
3	7	0,001208	0,001193	526	547	0,192881	0,068486
5	8	0,10134	0,146935	526	548	0,135224	0,048013
5	9	0,258224	0,091687	527	549	0,814599	0,192018
8	10	0,17117	0,060777	527	550	0,292677	0,06899
8	11	0,019095	0,027686	529	551	0,168159	0,110737
11	12	0,012792	0,018548	529	552	0,028896	0,01026
11	13	0,004354	0,006312	531	553	0,552935	0,130339
12	14	0,045347	0,065749	532	554	0,018908	0,004457
12	15	0,048372	0,017175	532	555	0,021185	0,004994
14	16	0,015632	0,022665	533	556	0,048314	0,017155

15	17	0,013523	0,004802	534	557	0,356374	0,126537
15	18	0,008611	0,003057	534	558	0,123916	0,043998
16	19	0,031044	0,045011	536	559	0,103188	0,036638
16	20	0,038489	0,013666	536	560	0,065671	0,023318
19	21	0,026074	0,037806	544	561	0,092352	0,021769
19	22	0,135089	0,047966	544	562	0,328322	0,077392
20	23	0,098506	0,034976	544	563	0,19054	0,067654
20	24	0,100693	0,035753	546	564	0,192669	0,06841
21	25	0,030897	0,044799	546	565	0,074667	0,017601
21	26	0,04213	0,014959	548	566	0,109776	0,038978
23	27	0,298631	0,106034	548	567	0,006242	0,002216
23	28	0,028231	0,010024	548	568	0,018908	0,006713
25	29	0,00746	0,010817	549	569	0,241671	0,056967
29	30	0,030556	0,044304	549	570	0,154241	0,036358
29	31	0,09526	0,033824	549	571	0,132231	0,03117
30	32	0,078547	0,113888	550	572	0,10805	0,02547
30	33	0,110778	0,039333	550	573	0,383134	0,090313
31	34	0,257878	0,091564	551	574	0,120283	0,079209
31	35	0,332506	0,118062	551	575	0,030601	0,007213
32	36	0,009758	0,014149	552	576	0,803839	0,285416
32	37	0,192418	0,068321	552	577	0,022963	0,008153
33	38	0,433546	0,153938	556	578	0,141552	0,05026
35	39	0,36225	0,128623	556	579	0,445653	0,158237
36	40	0,005343	0,007748	556	580	0,01362	0,004836
36	41	0,012473	0,004429	557	581	0,036101	0,012818
39	42	0,060036	0,021317	559	582	0,035417	0,012575
39	43	0,037574	0,013341	559	583	0,021537	0,007647
39	44	0,056078	0,019911	563	584	0,094037	0,033389
40	45	0,07022	0,101813	563	585	0,065546	0,023273
45	46	0,004958	0,007189	564	586	0,568113	0,133916
45	47	0,059584	0,021156	564	587	0,072722	0,025821
46	48	0,02338	0,033899	569	588	0,218896	0,051599
47	49	0,015074	0,005352	569	589	0,130198	0,03069
47	50	0,008284	0,002941	570	590	0,354184	0,083489
47	51	0,045694	0,016224	570	591	0,038213	0,009008
48	52	0,006486	0,009404	574	592	0,180352	0,118767
48	53	0,000843	0,000832	578	593	0,01256	0,00446
52	54	0,008393	0,00829	578	594	0,176083	0,062521
52	55	0,052935	0,076751	578	595	0,078587	0,027904
55	56	0,102202	0,148185	579	596	0,035321	0,012541
55	57	0,012522	0,004446	581	597	0,037565	0,013338
56	58	0,006446	0,009346	581	598	0,096532	0,034275
56	59	0,00575	0,002042	582	599	0,140964	0,050052
56	60	0,08349	0,029645	582	600	0,237942	0,056088
58	61	0,067931	0,098495	585	601	0,024619	0,008742

58	62	0,020478	0,007271	585	602	0,238421	0,084655
61	63	0,044431	0,064422	587	603	0,278018	0,098715
63	64	0,014093	0,020433	588	604	0,200845	0,047343
63	65	0,05784	0,020537	588	605	0,429172	0,101165
64	66	0,014272	0,020693	589	606	0,038213	0,009008
65	67	0,160045	0,056827	589	607	0,092352	0,021769
65	68	0,09292	0,032993	592	608	0,134641	0,088665
66	69	0,032984	0,03258	595	609	0,345124	0,122542
66	70	0,007969	0,011555	597	610	0,01753	0,006224
66	71	0,048027	0,047439	597	611	0,218791	0,077685
67	72	0,106559	0,037835	599	612	0,285473	0,101362
68	73	0,032306	0,011471	603	613	0,19132	0,067931
69	74	0,00816	0,00806	604	614	0,801912	0,189028
70	75	0,032377	0,046944	604	615	0,137106	0,032319
70	76	0,050799	0,018037	608	616	0,071966	0,047391
71	77	0,031885	0,031495	609	617	0,370871	0,131684
73	78	0,051897	0,018427	609	618	0,031805	0,011293
73	79	0,057156	0,020294	611	619	0,040666	0,014439
74	80	0,067877	0,024101	611	620	0,077355	0,027466
74	81	0,06258	0,061814	612	621	0,04816	0,0171
75	82	0,037953	0,055029	612	622	0,227816	0,08089
76	83	0,123396	0,043814	614	623	0,206042	0,048568
77	84	0,12512	0,044426	614	624	0,017089	0,004028
77	85	0,007997	0,007899	616	625	0,032023	0,021088
79	86	0,143122	0,050818	616	626	0,105692	0,037528
79	87	0,035966	0,01277	617	627	0,034916	0,012398
80	88	0,145568	0,051686	618	628	0,062627	0,022237
81	89	0,034863	0,034436	618	629	0,029734	0,010558
81	90	0,190781	0,06774	620	630	0,300605	0,106735
82	91	0,037303	0,054086	621	631	0,212203	0,075346
83	92	0,042487	0,015086	621	632	0,430578	0,101497
83	93	0,015527	0,005513	622	633	0,127263	0,029999
83	94	0,029551	0,010493	622	634	0,078395	0,027835
84	95	0,08139	0,028899	625	635	0,081246	0,053502
85	96	0,015985	0,015789	626	636	0,023242	0,008252
87	97	0,153486	0,054498	626	637	0,107589	0,038201
87	98	0,066942	0,023769	626	638	0,068031	0,024155
88	99	0,033837	0,012014	628	639	0,203033	0,07209
89	100	0,06136	0,060609	628	640	0,091591	0,032521
90	101	0,032306	0,011471	630	641	0,116432	0,041341
91	102	0,04703	0,06819	631	642	0,301084	0,070972
92	103	0,190926	0,067791	631	643	0,206289	0,073246
95	104	0,016076	0,005708	632	644	0,272639	0,064267
95	105	0,098208	0,03487	634	645	0,852796	0,201022
95	106	0,089231	0,031683	634	646	0,276872	0,098308

96	107	0,094528	0,033564	635	647	0,005198	0,003423
96	108	0,109082	0,038732	635	648	0,413444	0,1468
96	109	0,013702	0,013534	638	649	0,234722	0,083342
100	110	0,042398	0,041878	638	650	0,103698	0,03682
102	111	0,068583	0,045164	640	651	0,202715	0,071977
103	112	0,137285	0,048745	641	652	0,203023	0,072087
105	113	0,190434	0,067617	641	653	0,144181	0,051194
106	114	0,044423	0,015773	642	654	0,107255	0,025282
106	115	0,013003	0,004617	642	655	0,505674	0,119198
106	116	0,064534	0,022914	643	656	1,056194	0,248967
109	117	0,022738	0,022459	644	657	0,252126	0,059431
110	118	0,00906	0,008949	644	658	0,059459	0,014016
110	119	0,062887	0,022329	645	659	0,271523	0,064004
110	120	0,006598	0,002343	645	660	0,106995	0,025221
111	121	0,202763	0,071994	646	661	0,082325	0,019406
111	122	0,071822	0,047297	646	662	0,325112	0,076636
111	123	0,00734	0,002606	647	663	0,16723	0,110125
112	124	0,013514	0,004798	647	664	0,197023	0,069956
112	125	0,010932	0,003882	647	665	0,025929	0,009207
112	126	0,21201	0,075278	648	666	0,035754	0,012695
113	127	0,045569	0,01618	649	667	0,07093	0,025185
114	128	0,035532	0,012616	652	668	0,081583	0,028967
116	129	0,089433	0,031755	652	669	1,839718	0,433661
116	130	0,011732	0,004166	654	670	0,763837	0,180053
116	131	0,018465	0,006556	657	671	0,163366	0,038509
117	132	0,012762	0,004532	657	672	0,044357	0,010456
117	133	0,06649	0,023608	657	673	0,208549	0,049159
117	134	0,024091	0,023795	660	674	0,376454	0,088738
118	135	0,042211	0,041693	660	675	0,092979	0,021917
118	136	0,037574	0,013341	663	676	0,068099	0,044845
119	137	0,134135	0,047627	663	677	0,172769	0,061345
119	138	0,064438	0,02288	664	678	0,547146	0,194273
121	139	0,194393	0,069022	667	679	0,080947	0,028742
121	140	0,030957	0,010992	667	680	0,077827	0,027634
122	141	0,183122	0,12059	670	681	0,129265	0,030471
127	142	0,088874	0,031556	673	682	0,133178	0,031393
127	143	0,177797	0,06313	673	683	0,214617	0,05059
127	144	0,086621	0,030756	673	684	0,79858	0,188242
130	145	0,029406	0,010441	676	685	0,0227	0,014948
130	146	0,087844	0,03119	676	686	0,065257	0,023171
133	147	0,044134	0,01567	677	687	0,364186	0,12931
133	148	0,014968	0,005315	678	688	0,125659	0,044617
133	149	0,108707	0,038598	678	689	0,352258	0,083035
134	150	0,007012	0,00249	679	690	0,0131	0,004651
134	151	0,002492	0,002461	679	691	0,024985	0,008871

135	152	0,081198	0,028831	680	692	0,244085	0,086666
135	153	0,048516	0,047922	680	693	0,222046	0,078841
135	154	0,009815	0,003485	681	694	0,504267	0,118867
138	155	0,089558	0,031799	681	695	0,47949	0,113026
138	156	0,01098	0,003899	685	696	0,157126	0,103471
138	157	0,076757	0,027254	685	697	0,309414	0,072936
139	158	0,057282	0,020339	688	698	0,225687	0,080134
139	159	0,152031	0,053981	688	699	0,166576	0,039265
139	160	0,006136	0,002179	690	700	0,088807	0,031532
141	161	0,047886	0,031534	690	701	0,193462	0,045603
142	162	0,007657	0,002719	692	702	0,081728	0,029019
142	163	0,009642	0,003423	692	703	0,045434	0,016132
142	164	0,048796	0,017326	693	704	0,064602	0,022938
144	165	0,037796	0,01342	694	705	0,104274	0,02458
144	166	0,020555	0,007298	694	706	0,092979	0,021917
144	167	0,0144	0,005113	696	707	0,032445	0,021366
146	168	0,014477	0,00514	698	708	0,753675	0,267605
146	169	0,114274	0,040575	698	709	0,151383	0,035684
146	170	0,061404	0,021803	699	710	0,093926	0,02214
147	171	0,030456	0,010814	701	711	0,316782	0,074672
151	172	0,009459	0,009343	702	712	0,102388	0,036355
152	173	0,184241	0,065418	704	713	0,213204	0,075702
153	174	0,091687	0,032555	704	714	0,128963	0,04579
153	175	0,057872	0,057163	705	715	0,905804	0,213517
153	176	0,013263	0,004709	706	716	0,763501	0,179973
155	177	0,163195	0,057945	707	717	0,092265	0,060759
157	178	0,073598	0,026132	707	718	0,490159	0,115541
158	179	0,227036	0,080613	708	719	0,864627	0,203811
158	180	0,088219	0,031324	708	720	0,201456	0,047488
158	181	0,004546	0,001614	711	721	0,340275	0,08021
161	182	0,11588	0,07631	712	722	0,190714	0,067716
161	183	0,362545	0,08546	712	723	0,083134	0,029518
173	184	0,086495	0,030712	713	724	0,33895	0,12035
173	185	0,043585	0,015476	713	725	0,046542	0,016525
173	186	0,021036	0,007469	713	726	0,090483	0,032127
175	187	0,023319	0,00828	715	727	0,031518	0,007429
175	188	0,011177	0,01104	715	728	0,514738	0,121335
177	189	0,046234	0,016416	716	729	0,089601	0,021121
177	190	0,161606	0,057381	716	730	0,054094	0,012751
178	191	0,125871	0,044693	717	731	0,166583	0,109699
178	192	0,065257	0,023171	717	732	0,045259	0,010668
179	193	0,218174	0,077466	718	733	0,596146	0,140524
182	194	0,022192	0,014614	721	734	0,031518	0,007429
182	195	0,085966	0,030524	721	735	0,636437	0,150022
183	196	0,198705	0,046839	721	736	0,449669	0,105997

183	197	0,145009	0,034182	722	737	0,122596	0,04353
185	198	0,139905	0,049676	722	738	0,017366	0,006166
187	199	0,015681	0,005568	724	739	0,293266	0,104129
188	200	0,034519	0,034096	725	740	0,576749	0,135952
189	201	0,135262	0,048027	726	741	0,059352	0,021074
190	202	0,13269	0,047114	726	742	0,017916	0,006361
191	203	0,025698	0,009125	726	743	0,015796	0,005609
191	204	0,165719	0,058841	727	744	0,276139	0,065092
191	205	0,16019	0,056878	728	745	2,725606	0,642483
193	206	0,229145	0,081362	728	746	0,114393	0,026965
193	207	0,030716	0,010906	729	747	0,097182	0,022908
194	208	0,036215	0,023849	731	748	0,073935	0,048688
194	209	0,125072	0,044409	733	749	0,40626	0,095764
196	210	0,169709	0,040004	736	750	0,251805	0,059356
196	211	0,154852	0,036502	736	751	0,041606	0,009807
200	212	0,128433	0,045602	737	752	0,228953	0,081293
200	213	0,003443	0,003401	737	753	0,137911	0,048968
201	214	0,17667	0,06273	739	754	0,378942	0,13455
201	215	0,217385	0,077186	739	755	0,050096	0,017787
202	216	0,022674	0,008051	740	756	0,656139	0,154666
202	217	0,193555	0,068725	747	757	0,095027	0,0224
202	218	0,014024	0,00498	747	758	0,120843	0,028485
203	219	0,193738	0,06879	748	759	0,225891	0,148755
206	220	0,093633	0,033246	748	760	0,034261	0,012165
206	221	0,109054	0,038721	751	761	0,280923	0,06622
206	222	0,01255	0,004456	752	762	0,051868	0,018417
208	223	0,031165	0,020523	752	763	0,155605	0,05525
208	224	0,019901	0,004691	753	764	0,032306	0,011471
213	225	0,020291	0,020043	753	765	0,164023	0,058239
214	226	0,300133	0,106567	754	766	0,295664	0,10498
216	227	0,034377	0,012206	754	767	0,089693	0,031847
217	228	0,239962	0,085202	754	768	0,015874	0,005636
219	229	0,158215	0,056177	755	769	0,22457	0,079737
220	230	0,048237	0,017127	757	770	0,277637	0,065445
220	231	0,009536	0,003386	759	771	0,069671	0,04588
220	232	0,013889	0,004932	760	772	0,219966	0,051851
221	233	0,06465	0,022955	760	773	0,126767	0,045011
221	234	0,202628	0,071947	761	774	0,140102	0,033025
223	235	0,059313	0,039059	761	775	0,11291	0,026615
225	236	0,110411	0,109058	762	776	0,247446	0,08786
225	237	0,213907	0,075951	762	777	0,024619	0,008742
226	238	0,117838	0,04184	765	778	0,211461	0,075083
226	239	0,262973	0,093373	765	779	0,019264	0,00684
228	240	0,432496	0,153565	766	780	0,206144	0,073195
228	241	0,003477	0,001235	767	781	0,244845	0,086936

228	242	0,120795	0,04289	769	782	0,095415	0,033879
230	243	0,024494	0,008697	770	783	0,686755	0,161883
233	244	0,03061	0,010869	771	784	0,020266	0,013346
234	245	0,029484	0,010469	771	785	0,033235	0,021886
234	246	0,21621	0,076769	772	786	0,020818	0,004907
235	247	0,218945	0,07774	772	787	0,016798	0,00396
235	248	0,054713	0,03603	772	788	0,179782	0,042378
236	249	0,074035	0,073128	773	789	0,169061	0,060028
237	250	0,050761	0,018023	773	790	0,014737	0,005233
237	251	0,26906	0,095534	775	791	0,323232	0,076193
238	252	0,034078	0,0121	775	792	0,066643	0,015709
238	253	0,021393	0,007596	776	793	0,344508	0,122323
240	254	0,317798	0,112839	776	794	0,020429	0,007254
240	255	0,038143	0,013543	778	795	0,185609	0,065903
247	256	0,038827	0,013786	778	796	0,043226	0,010189
247	257	0,301838	0,107173	778	797	0,034177	0,008056
248	258	0,019241	0,01267	780	798	0,136148	0,048342
249	259	0,009105	0,008994	780	799	0,022895	0,008129
252	260	0,260507	0,092497	780	800	0,125476	0,044552
254	261	0,03009	0,010684	782	801	0,098661	0,035031
254	262	0,051406	0,018253	782	802	0,342052	0,121451
256	263	0,137063	0,048667	783	803	0,103953	0,024504
258	264	0,087072	0,057339	783	804	0,107285	0,025289
258	265	0,030906	0,007285	784	805	0,124753	0,082153
259	266	0,075283	0,07436	784	806	0,030977	0,010999
259	267	0,240935	0,085548	790	807	0,112956	0,026626
260	268	0,540702	0,191985	790	808	0,227103	0,080637
261	269	0,514407	0,182649	791	809	0,273999	0,064587
262	270	0,00681	0,002418	791	810	0,427751	0,10083
262	271	0,014448	0,00513	793	811	0,125312	0,044494
262	272	0,055288	0,019631	793	812	0,02408	0,00855
263	273	0,079714	0,028304	795	813	0,104026	0,036936
263	274	0,021537	0,007647	795	814	0,269744	0,095777
264	275	0,012457	0,008203	800	815	0,152128	0,054015
264	276	0,261201	0,092744	800	816	0,040252	0,014292
266	277	0,03557	0,035134	800	817	0,035754	0,012695
268	278	0,151743	0,053879	801	818	0,324492	0,115216
268	279	0,309903	0,073051	802	819	0,173694	0,061673
273	280	0,127142	0,045144	802	820	0,209612	0,074426
273	281	0,068146	0,024197	803	821	0,055118	0,012992
275	282	0,040091	0,026401	803	822	0,290415	0,068457
277	283	0,084711	0,083673	804	823	0,185896	0,04382
277	284	0,506468	0,119385	805	824	0,076043	0,050076
278	285	0,017704	0,006286	805	825	0,194701	0,069132
278	286	0,140118	0,033029	810	826	0,164619	0,038804

280	287	0,214572	0,076187	810	827	2,929814	0,690619
280	288	0,015228	0,005407	811	828	0,068955	0,024484
281	289	0,109824	0,038995	811	829	0,043344	0,01539
281	290	0,303601	0,107798	814	830	0,12669	0,044983
282	291	0,214051	0,050456	814	831	0,241289	0,056877
282	292	0,082621	0,054408	818	832	0,018099	0,006426
283	293	0,020361	0,020111	818	833	0,007643	0,001802
283	294	0,093498	0,033198	818	834	0,189182	0,044594
285	295	0,051175	0,01817	819	835	0,02146	0,005059
286	296	0,015744	0,003711	819	836	0,700506	0,248726
287	297	0,083741	0,029733	820	837	0,026026	0,009241
287	298	0,029291	0,0104	820	838	0,553821	0,196643
291	299	0,240433	0,056675	822	839	0,360527	0,084984
292	300	0,079114	0,052099	823	840	0,199286	0,046976
292	301	0,025434	0,005995	824	841	0,262489	0,172856
293	302	0,026461	0,026137	824	842	0,188989	0,067104
293	303	0,033658	0,007934	828	843	0,152292	0,054074
295	304	0,319204	0,113339	828	844	0,017366	0,006166
295	305	0,09607	0,034111	830	845	0,173646	0,061656
295	306	0,006762	0,002401	834	846	0,572515	0,134954
296	307	0,135028	0,031829	838	847	0,167568	0,059498
296	308	0,435378	0,102628	839	848	0,685211	0,161519
300	309	0,04297	0,028297	840	849	0,551116	0,12991
300	310	0,017731	0,004179	841	850	0,2423	0,159561
302	311	0,015435	0,015246	841	851	0,143979	0,051122
302	312	0,010085	0,003581	842	852	0,877772	0,206909
304	313	0,203466	0,072244	843	853	0,107686	0,038236
305	314	0,070131	0,024901	843	854	0,01362	0,004836
305	315	0,045887	0,016293	845	855	0,115584	0,04104
305	316	0,016374	0,005814	845	856	0,797311	0,187943
307	317	0,033658	0,007934	846	857	0,657805	0,155059
307	318	0,444182	0,104703	847	858	0,062945	0,02235
309	319	0,010095	0,006648	847	859	0,198699	0,070551
309	320	0,234443	0,083243	848	860	0,321734	0,07584
311	321	0,265594	0,26234	848	861	0,466727	0,110018
311	322	0,146551	0,052035	849	862	0,63257	0,14911
313	323	0,2531	0,089867	850	863	0,113077	0,074464
314	324	0,014438	0,005127	850	864	0,074965	0,049366
314	325	0,040801	0,014487	851	865	0,101309	0,023881
314	326	0,011655	0,004138	851	866	0,010961	0,003892
315	327	0,110392	0,039197	851	867	0,121305	0,043071
318	328	0,421392	0,099331	852	868	0,048331	0,011393
319	329	0,079156	0,028106	852	869	0,256268	0,060408
319	330	0,074083	0,048786	853	870	0,073357	0,026047
319	331	0,008226	0,002921	853	871	0,030456	0,010814

320	332	0,333566	0,118438	855	872	0,208109	0,073893
320	333	0,545919	0,128685	855	873	0,034728	0,008186
321	334	0,298023	0,294371	858	874	0,046831	0,016628
321	335	0,158964	0,037471	858	875	0,13034	0,046279
322	336	0,028077	0,009969	858	876	0,442311	0,15705
322	337	0,145212	0,05156	859	877	0,510412	0,120315
323	338	0,762238	0,270645	861	878	0,135425	0,031923
329	339	0,124291	0,044132	863	879	0,076761	0,050549
329	340	0,028318	0,010055	863	880	1,198864	0,282598
330	341	0,194237	0,12791	865	881	0,35368	0,08337
330	342	0,094263	0,02222	867	882	0,060181	0,021368
334	343	0,251974	0,248887	867	883	0,028443	0,010099
334	344	0,246578	0,058124	870	884	0,102388	0,036355
336	345	0,059487	0,021122	870	885	0,256664	0,091133
336	346	0,018599	0,006604	871	886	0,01362	0,004836
338	347	0,372296	0,13219	872	887	0,199301	0,04698
338	348	0,096098	0,034121	872	888	0,115584	0,04104
340	349	0,518421	0,122203	875	889	0,114399	0,040619
340	350	0,437139	0,155213	875	890	0,041312	0,014668
341	351	0,038376	0,025272	875	891	0,021046	0,007473
341	352	0,053528	0,012618	876	892	0,012907	0,004583
343	353	0,028696	0,028344	876	893	0,082556	0,029313
343	354	0,264244	0,093824	876	894	0,019177	0,006809
347	355	0,034666	0,012309	878	895	0,598912	0,141176
347	356	0,125881	0,044696	878	896	0,218056	0,0514
348	357	0,065507	0,023259	879	897	0,153652	0,101184
349	358	0,599417	0,141295	879	898	0,079869	0,028359
349	359	0,061033	0,014387	880	899	0,351845	0,082937
351	360	0,156327	0,055507	881	900	0,051358	0,012106
351	361	0,046592	0,030682	882	901	0,306587	0,108859
351	362	0,038977	0,009188	882	902	0,105769	0,037555
353	363	0,200966	0,198504	882	903	0,010268	0,003646
353	364	0,06569	0,023324	884	904	0,315833	0,112142
354	365	0,049268	0,017493	884	905	0,109824	0,038995
355	366	0,572698	0,134997	885	906	0,172817	0,061362
355	367	0,25835	0,091731	885	907	0,010239	0,003635
356	368	0,040069	0,014227	885	908	0,012955	0,0046
357	369	0,3078	0,10929	888	909	0,12228	0,028824
358	370	0,465841	0,109809	888	910	0,144576	0,051334
358	371	0,061033	0,014387	889	911	0,025843	0,009176
359	372	0,061201	0,014426	889	912	0,043623	0,015489
359	373	0,063631	0,014999	889	913	0,128269	0,045544
361	374	0,140879	0,092773	893	914	0,016798	0,005964
361	375	0,389217	0,091747	893	915	0,02042	0,00725
363	376	0,132853	0,131225	893	916	0,132652	0,0471

363	377	0,052331	0,018581	894	917	0,148795	0,052832
364	378	0,262505	0,061878	895	918	0,797908	0,188084
364	379	0,300673	0,106759	896	919	0,300809	0,070907
365	380	0,015045	0,005342	897	920	0,022087	0,014545
365	381	0,019861	0,007052	897	921	0,143989	0,051126
365	382	0,10994	0,039036	901	922	0,397196	0,093628
366	383	0,088164	0,020782	901	923	0,108427	0,038499
367	384	0,297735	0,105716	901	924	0,013466	0,003174
367	385	0,06166	0,014535	902	925	0,033211	0,011792
368	386	0,392855	0,092604	904	926	0,018176	0,006454
368	387	0,051936	0,018441	904	927	0,225475	0,080059
374	388	0,831473	0,195996	906	928	0,489135	0,1153
374	389	0,014919	0,009825	906	929	0,1936	0,045636
375	390	0,137427	0,032395	910	930	0,149614	0,053123
375	391	0,096678	0,022789	910	931	0,106058	0,037658
376	392	0,037527	0,037067	913	932	0,174724	0,062039
376	393	0,031625	0,007455	913	933	0,050645	0,017982
378	394	0,053482	0,012607	913	934	0,026902	0,009552
379	395	0,032383	0,011498	916	935	0,243401	0,086423
382	396	0,018503	0,00657	917	936	0,008515	0,003023
382	397	0,109342	0,038824	917	937	0,008235	0,002924
382	398	0,046128	0,016378	917	938	0,188932	0,067083
384	399	0,028077	0,009969	919	939	0,945897	0,222968
387	400	0,11464	0,040705	920	940	0,076828	0,050594
388	401	0,499269	0,117688	921	941	0,379568	0,134772
388	402	0,076838	0,018112	921	942	0,06596	0,02342
389	403	0,113298	0,074609	927	943	0,077682	0,027582
392	404	0,047109	0,046532	927	944	0,109824	0,038995
392	405	0,011761	0,004176	931	945	0,277438	0,065398
397	406	0,015228	0,005407	931	946	0,179252	0,063646
397	407	0,105278	0,037381	931	947	0,336426	0,119454
397	408	0,062945	0,02235	932	948	0,257974	0,091598
398	409	0,032874	0,011672	933	949	0,176131	0,062538
399	410	0,19001	0,067466	939	950	0,588809	0,138795
399	411	0,285724	0,101451	939	951	0,501944	0,118319
400	412	0,079377	0,028184	940	952	0,221234	0,145688
401	413	0,082539	0,019456	940	953	0,042829	0,010096
403	414	0,093956	0,061873	941	954	0,196917	0,069918
403	415	0,011915	0,004231	942	955	0,075187	0,026697
404	416	0,012645	0,01249	944	956	0,049114	0,017439
407	417	0,017704	0,006286	944	957	0,019264	0,00684
407	418	0,221632	0,078694	947	958	0,123274	0,029058
407	419	0,056665	0,02012	947	959	0,214938	0,050665
408	420	0,033394	0,011857	948	960	0,268001	0,095158
410	421	0,094856	0,03368	948	961	0,170843	0,060661

410	422	0,263368	0,093513	949	962	0,107888	0,038307
411	423	0,020083	0,007131	949	963	0,109448	0,038861
411	424	0,180841	0,064211	949	964	0,025371	0,009008
412	425	0,013329	0,003142	951	965	0,363569	0,085701
412	426	0,166133	0,039161	951	966	0,41566	0,09798
412	427	0,078992	0,028047	952	967	0,13834	0,091101
413	428	0,302735	0,071361	952	968	0,088094	0,031279
413	429	0,567196	0,1337	954	969	0,33817	0,120073
414	430	0,129865	0,085519	954	970	0,046503	0,016512
414	431	0,687168	0,16198	956	971	0,186312	0,066153
414	432	0,135802	0,048219	956	972	0,039713	0,014101
415	433	0,039848	0,014149	959	973	0,031518	0,007429
415	434	0,051945	0,018444	959	974	1,06188	0,250308
416	435	0,107566	0,106248	960	975	0,048247	0,017131
416	436	0,141096	0,033259	961	976	0,214871	0,076293
418	437	0,168502	0,059829	962	977	0,046128	0,016378
418	438	0,280571	0,099621	963	978	0,089443	0,031758
419	439	0,034531	0,012261	963	979	0,284828	0,101133
421	440	0,107686	0,038236	963	980	0,245587	0,0872
421	441	0,122654	0,04355	965	981	0,377631	0,089016
424	442	0,041456	0,01472	966	982	0,338792	0,07986
424	443	0,168589	0,05986	966	983	0,125337	0,029545
426	444	0,068874	0,016235	967	984	0,178417	0,117492
426	445	0,210826	0,049696	968	985	0,809406	0,287393
427	446	0,060344	0,021426	971	986	0,430974	0,153024
428	447	0,337661	0,079594	971	987	0,271478	0,096393
429	448	0,123885	0,029202	972	988	0,08246	0,029279
429	449	0,102776	0,024227	972	989	0,085831	0,030476
430	450	0,170622	0,112359	974	990	0,713657	0,168224
433	451	0,021643	0,007685	974	991	0,850457	0,200471
433	452	0,006945	0,002466	975	992	0,439653	0,156106
433	453	0,274647	0,097518	975	993	0,015132	0,005373
435	454	0,008978	0,008868	975	994	0,009247	0,003283
437	455	0,031362	0,011136	979	995	0,018542	0,006584
438	456	0,032075	0,011389	979	996	0,016365	0,005811
440	457	0,337939	0,119991	979	997	0,059458	0,021112
441	458	0,417547	0,148257	980	998	0,327026	0,116116
443	459	0,104353	0,037052	981	999	0,051098	0,012045
444	460	0,38344	0,090385	982	1000	1,229617	0,289847
446	461	0,487042	0,172932	982	1001	1,06726	0,251576
447	462	0,184062	0,043387	983	1002	0,545675	0,128627
447	463	0,106995	0,025221	984	1003	0,063184	0,041608
450	464	0,080877	0,05326	984	1004	0,028328	0,010058
453	465	0,055789	0,019809	985	1005	0,088942	0,03158
454	466	0,044174	0,043632	985	1006	0,193102	0,068564

454	467	0,128866	0,127288	986	1007	0,276053	0,098017
457	468	0,262424	0,093178	987	1008	0,118069	0,041922
457	469	0,083095	0,029504	987	1009	0,068108	0,024183
458	470	0,119215	0,042329	990	1010	0,687366	0,162027
458	471	0,117183	0,041608	990	1011	0,263529	0,062119
459	472	0,125486	0,044556	990	1012	0,201991	0,047614
459	473	0,133469	0,031461	997	1013	0,26803	0,095168
460	474	0,042278	0,009966	998	1014	0,017174	0,006098
460	475	0,61354	0,144624	998	1015	0,170506	0,060541
461	476	0,183741	0,043312	998	1016	0,013022	0,004624
461	477	0,062791	0,022295	999	1017	0,216099	0,050939
462	478	0,309124	0,072867	999	1018	0,760918	0,179365
462	479	0,757418	0,178539	1000	1019	0,744762	0,175556
462	480	0,259845	0,061251	1000	1020	0,428423	0,100988
464	481	0,158664	0,104484	1001	1021	0,340275	0,08021
464	482	0,467186	0,110126	1001	1022	0,500614	0,118005
465	483	0,005779	0,002052	1002	1023	0,24456	0,057648
465	484	0,248775	0,088332	1002	1024	0,98894	0,233114
465	485	0,228673	0,081194	1006	1025	0,274503	0,064706
467	486	0,059733	0,059001	1006	1026	0,40785	0,096139
468	487	0,178789	0,063482	1007	1027	0,200981	0,071362
470	488	0,054912	0,019497	1007	1028	0,135561	0,048133
470	489	0,167202	0,059368	1007	1029	0,304718	0,108195
473	490	0,041163	0,009703	1009	1030	0,044471	0,01579
473	491	0,046604	0,010986	1009	1031	0,060922	0,021632
477	492	0,030456	0,010814	1010	1032	0,098359	0,023185
478	493	0,21454	0,050572	1010	1033	0,535128	0,126141
478	494	0,116793	0,027531	1013	1034	0,234491	0,08326
481	495	0,059543	0,03921	1019	1035	0,160493	0,037832
481	496	0,051388	0,012113	1022	1036	0,129067	0,030424
482	497	0,012228	0,002882	1022	1037	0,172659	0,040699
482	498	0,260976	0,061518	1026	1038	0,054491	0,012845
484	499	0,034887	0,012387	1026	1039	0,63957	0,15076
485	500	0,057667	0,020476	1027	1040	0,045675	0,016218
485	501	0,003968	0,001409	1027	1041	0,272075	0,096605
485	502	0,007706	0,002736	1032	1042	0,292417	0,068929
486	503	0,707114	0,251072	1034	1043	0,024205	0,008594
487	504	0,078279	0,027794	1034	1044	0,014361	0,005099
487	505	0,235194	0,08351	1034	1045	0,058129	0,02064
489	506	0,395557	0,140449	1039	1046	0,064854	0,015288
489	507	0,341165	0,121136	1039	1047	0,87606	0,206506
492	508	0,341146	0,12113	1040	1048	0,342764	0,121704
492	509	0,179174	0,063619	1041	1049	0,217903	0,051364
493	510	0,01232	0,002904	1042	1050	0,594541	0,140146
493	511	0,063601	0,014992	1042	1051	0,39686	0,093548

495	512	0,125927	0,082926	1045	1052	0,04529	0,016081
495	513	0,875418	0,206355	1047	1053	0,035217	0,008301
498	514	0,121638	0,028673	1047	1054	0,522823	0,123241
498	515	0,227395	0,053602	1048	1055	0,313184	0,111201
500	516	0,03351	0,011898	1048	1056	0,248573	0,08826
503	517	0,242457	0,086088	1049	1057	0,527776	0,124408
504	518	0,529972	0,188175	1050	1058	0,453934	0,107002
504	519	0,074958	0,017669	1052	1059	0,384673	0,136585
505	520	0,031554	0,011204	1052	1060	0,011549	0,004101
505	521	0,202763	0,071994	1052	1061	0,198679	0,070544
507	522	0,084367	0,029956	1054	1062	0,045855	0,010809
507	523	0,18244	0,064778	1054	1063	0,17428	0,041081
508	524	0,0343	0,012179	1055	1064	0,489903	0,173948
508	525	0,415706	0,097991	1058	1065	0,298287	0,070313
509	526	0,300518	0,106704	1058	1066	0,076394	0,018008
510	527	0,546164	0,128742	1059	1067	0,222027	0,078834
510	528	0,418457	0,098639	1059	1068	0,012435	0,004415
512	529	0,086214	0,056774	1059	1069	0,081429	0,028913
512	530	0,051034	0,033607	1061	1070	0,17721	0,062921
514	531	0,154226	0,036354	1061	1071	0,2866	0,101762
514	532	0,186951	0,044068	1063	1072	0,877787	0,206913
517	533	0,108312	0,038458	1063	1073	0,650209	0,153268
517	534	0,096725	0,034344	1065	1074	0,309506	0,072957
517	535	0,017761	0,006306	1065	1075	0,119376	0,028139
518	536	0,354766	0,125965	1067	1076	0,340453	0,120883
518	537	0,039068	0,009209	1069	1077	0,520311	0,184745
520	538	0,137738	0,048906	1071	1078	0,400749	0,142293
521	539	0,428913	0,152293	1073	1079	0,475195	0,112014
522	540	0,133519	0,047408	1077	1080	0,526466	0,18693
522	541	0,043633	0,015493				

Fonte: <http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193>. [37]