



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MONILSON DE SALES COSTA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA DE
VARREDURA DIRETA-INVERSA USANDO SOMA DE POTÊNCIAS E SOMA DE
ADMITÂNCIAS APLICADOS A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

FORTALEZA
JANEIRO DE 2017

MONILSON DE SALES COSTA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA DE
VARREDURA DIRETA-INVERSA USANDO SOMA DE POTÊNCIAS E SOMA DE
ADMITÂNCIAS APLICADOS A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Monografia submetida ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof^a. Ph. D. Ruth Pastôra Saraiva Leão

Coorientador: Eng. Francisco Sousa de Oliveira Neto.

FORTALEZA

JANEIRO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C874a Costa, Monilson de Sales.
Análise comparativa dos métodos de fluxo de potência de varredura direta-inversa usando soma de potências e soma de admitâncias aplicados a redes de distribuição de energia elétrica / Monilson de Sales Costa. – 2017.
64 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão.
Coorientação: Prof. Francisco Sousa de Oliveira Neto.
1. Método de soma de potência. 2. Método de soma de admitância. 3. Fluxo de carga. 4. Rede Pici. 5. Rede IEEE 16 Barras. I. Título.
-

CDD 621.3

MONILSON DE SALES COSTA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA DE
VARREDURA DIRETA-INVERSA USANDO SOMA DE POTÊNCIAS E SOMA DE
ADMITÂNCIAS APLICADOS A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Monografia submetida ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Monografia aprovada pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Ph.D. Ruth Pastôra Saraiva Leão (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Francisco Sousa de Oliveira Neto (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Dedico este trabalho aos meus pais, aos meus
irmãos, aos meus amigos e a todas as pessoas
que contribuíram ou me incentivaram nessa
jornada da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado força e coragem no desenvolvimento desse projeto e em todos os momentos da minha vida.

A todos os meus irmãos que sempre acreditaram em mim, transmitindo a confiança que tudo é possível com determinação, força de vontade e muito esforço pessoal.

Aos meus pais, Antônio Nilson e Francisca Vandilza, que sempre se esforçaram e me deram as condições para que eu conseguisse estudar e realizar meus sonhos.

A minha orientadora, Prof. Ruth Pastora Saraiva Leão, por todo o conhecimento passado nas disciplinas de Circuitos Elétricos II e Geração, Transmissão e Distribuição de Energia. Em cada aula dessas disciplinas eu tinha a certeza que aquele era o lugar em que eu queria estar e sentia que tinha feito a escolha certa na profissão que decidi seguir. Também agradeço por ter aceito me orientar, por toda a paciência e conhecimento repassado.

Ao Prof. Raimundo Furtado, pelas orientações e dicas valiosas para o desenvolvimento desse projeto.

Ao Neto, por ter sido meu coorientador, por toda disponibilidade e ajuda durante o desenvolvimento desse projeto.

Aos participantes do Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) pelo material didático, apoio e pelos conhecimentos repassados em todas as reuniões/apresentações na qual participei, em especial aos alunos Thiago Mota e Mapse Barroso.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) por todo o conhecimento repassado em todas as disciplinas do curso.

Aos amigos de Graduação, em especial, Rodrigo Nagy, Maria Alice, Debora, Rayssa, Thays, Natanael, Judá, Thiago, Rodrigo Oliveira, Caio Ribeiro pelo apoio que mutuamente existiu e pelas parcerias em projetos e grupos de estudos.

A Rodrigo Nagy, por toda a parceria nos estudos, nas aulas, nos projetos e por todo apoio durante todo o curso. Seu apoio foi essencial para vencer cada etapa e para superar cada dificuldade nesse difícil caminho.

A Mapse Barroso por toda paciência, disposição e ajuda no desenvolvimento do programa de fluxo de potência via soma de admitância em *Python*.

A todos que aqui não foram citados, mas que diretamente ou indiretamente contribuíram para que eu conseguisse chegar até aqui.

RESUMO

COSTA, M. S. **Análise Comparativa dos Métodos de Fluxo de Potência de Varredura Direta-Inversa usando Soma de Potências e Soma de Admitâncias Aplicados a Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre dois métodos de fluxo de potência baseados em varredura direta-inversa, sendo um formulado por soma de potências e o outro por soma de admitâncias. A metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho foi a implementação em linguagem de programação *Python* de ambos os métodos. Cada método foi aplicado a duas redes de distribuição distintas, sendo uma a rede elétrica do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) e a outra uma rede IEEE 16 barras. Após a implementação dos métodos e a coleta de resultados, três importantes parâmetros foram analisados: Os valores de tensões nominais em cada barra, o número de iterações e o tempo de processamento de cada método. Após a análise dos resultados, verificou-se que os valores de tensões nominais de cada método foram considerados satisfatórios para ambas as redes modeladas, sendo que para as barras analisadas da rede Pici, o máximo erro percentual relativo a tensão nominal encontrado foi de 3,5594% e a máxima diferença angular foi de 0,2247 rad. Para as barras da rede IEEE 16 barras analisadas, o máximo erro percentual relativo a tensão nominal encontrado foi de 0,7761% e a máxima diferença angular de 4,4726 rad. Analisando o número de interações para a rede Pici, ambos os métodos apresentaram o mesmo desempenho, necessitando de 3 iterações para atingir o critério de convergência. Para a rede IEEE 16 barras, os alimentadores 1 e 3 apresentaram o mesmo número de iterações, enquanto que o alimentador 2 no método de soma de admitância, o mesmo necessitou de uma iteração a mais para atingir o critério de convergência. O tempo de processamento do método de soma de potência em ambas as redes foi inferior ao método de soma de admitância, comprovando assim que para as situações analisadas o método de soma de potência apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: Método de Soma de Potência. Método de Soma de Admitância. Fluxo de Carga. Rede Pici. Rede IEEE 16 Barras. Varredura Direta-Inversa.

ABSTRACT

COSTA, M. S. **Comparative Analysis of the Power Flow Methods by Backward-Forward Sweep using Power Summation Method and Admittance Summation Method Applied to Electric Power Distribution Networks.** 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

This work aims to present a comparative analysis between two methods of power flow through the direct-inverse sweep, one formulated for sum powers's sum and the other for admittances's sum. The methodology used for the development of this work was the implementation in Python programming language of both methods. Each method was applied to two distinct networks, the distribution network of the Pici Campus of the Federal University of Ceará (UFC) and the other an IEEE 16 bus network. After the implementation of the methods and the collection of results, three important parameters were analyzed: The nominal voltage values in each bus, the iterations's number and the processing time of each method. After the analysis of the results, it was verified that the nominal voltage values of each method are considered satisfactory for both modeled networks, for the Pici network the maximum percentage error relative to the rated voltage found was 3,5594% and the maximum angular difference was 0,2247 rad. For the IEEE 16 bus bars analyzed, the maximum percentage error relative to the rated voltage found was 0,7761% and the maximum angular difference was 4,4726 rad. Analyzing the number of interactions for the Pici network, both methods presented the same performance, requiring 3 iterations to reach the convergence criterion. For the IEEE 16 bus network, feeders 1 and 3 presented the same number of iterations, while feeder 2 in the admittance summation method, it required an additional iteration to reach the convergence criterion. The processing time of the power summation method in both networks was inferior to the admittance summation method, thus proving that for the analyzed situations the power summation method showed better performance.

Keywords: Power Summation mode. Admittance Summation mode. Load Flow. Pici's Grid. IEEE 16 bus network. Backward/Forward Sweep.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Matriz energética brasileira.....	1
Figura 1.2 – Sistema elétrico de potência.....	2
Figura 1.3 – Principais configurações de sistemas de distribuição primários.....	3
Figura 1.4 – Sistema radial com disjuntor de transferência de alimentador e chave de seccionamento de barra.....	4
Figura 2.1 – Fluxograma do método de soma de potências.....	16
Figura 2.2 – Circuito equivalente para varredura inversa.....	17
Figura 2.3 – Conversão de fonte de corrente em fonte de tensão.....	17
Figura 2.4 – Soma de impedâncias em série.....	18
Figura 2.5 – Conversão de fonte de tensão em fonte de corrente.....	18
Figura 2.6 – Circuito simplificado para cálculo da varredura inversa.....	19
Figura 2.7 – Circuito equivalente para cálculo da varredura direta.....	19
Figura 2.8 – Método de superposição – desabilita fonte de corrente.....	20
Figura 2.9 – Método de superposição – desabilita fonte de tensão.....	21
Figura 2.10 – Fluxograma do método de soma de admitâncias.....	22
Figura 3.1 – Representação da rede Pici com os nós/barras de carga e de passagem.....	24
Figura 3.2 – Rede IEEE 16 barras.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de tensão para o MSP para as barras analisadas da rede Pici	25
Tabela 3.2 – Valores de tensão para o MSA para as barras analisadas da rede Pici	25
Tabela 3.3 – Valores de tensão para o MSP para as barras analisadas da rede IEEE 16 barras.....	26
Tabela 3.4 – Valores de tensão para o MSA para as barras analisadas da rede IEEE 16 barras.....	27
Tabela 4.1 – Erro percentual relativo à tensão nominal para a rede Pici.....	30
Tabela 4.2 – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para a rede Pici.....	31
Tabela 4.3 – Erro relativo ao MSA para a rede Pici.....	31
Tabela 4.4 – Erro percentual relativo à tensão nominal para a rede IEEE 16 barras.....	32
Tabela 4.5 – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para a rede IEEE 16 barras..	33
Tabela 4.6 – Erro relativo ao MSA para a rede Pici.....	33
Tabela 4.7 – Número de Iterações.....	36
Tabela 1 (APÊNDICE) – Valores das tensões para o fluxo de potência através do MSP para a rede Pici.....	42
Tabela 2 (APÊNDICE) – Valores das tensões para o fluxo de potência através do MSA para a rede Pici.....	44
Tabela 3 (APÊNDICE) – Erro relativo à tensão nominal para a todas as barras da rede Pici.....	45
Tabela 4 (APÊNDICE) – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para todas as barras da rede Pici.....	46
Tabela 5 (APÊNDICE) – Erro relativo ao MSA para todas as barras da rede Pici..	47

Tabela 6 (APÊNDICE) – Valores das tensões encontradas com método de varredura direta-inversa usando soma de potências para a rede IEEE 16 barras.....	48
Tabela 7 (APÊNDICE) – Valores das tensões encontradas com método de varredura direta-inversa usando soma de admitâncias para a rede IEEE 16 barras.	49
Tabela 8 (APÊNDICE) – Erro percentual relativo à tensão nominal para a rede IEEE 16 barras.....	50
Tabela 9 (APÊNDICE) – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para a rede IEEE 16 barras.....	51
Tabela 10 (APÊNDICE) – Erro relativo ao MSA para a rede IEEE 16 barras.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASM	<i>Admittance Summation Mode</i>
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
CSM	<i>Current Summation Mode</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GREI	Grupo de Redes Elétricas Inteligentes
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
MSA	Método de Soma de Admitâncias
MSC	Método de Soma de Correntes
MSP	Método de Soma de Potências
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAR	Plano de Ampliação e Reforços
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PE	Ponto de Entrega
PSM	<i>Power Summation Mode</i>
RNP	Representação Nó-Profundidade

SD	Sistema de Distribuição
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SRA	Sistema de Recomposição Automática
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Características do sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE)...	2
1.2. Análise do sistema elétrico através dos métodos de fluxo de potência...	5
1.3. Justificativa.....	7
1.4. Objetivos do trabalho.....	8
1.5. Metodologia aplicada.....	8
1.6. Revisão bibliográfica.....	9
1.7. Estrutura do trabalho.....	12
CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA VARREDURA DIRETA-INVERSA UTILIZANDO SOMA DE POTÊNCIAS E SOMA DE ADMITÂNCIAS.....	13
2.1. Introdução.....	13
2.2. Modelagem da carga para utilização nos métodos de fluxo de potência	13
2.3. Método de varredura direta-inversa utilizando soma de potências.....	14
2.4. Método de varredura direta-inversa utilizando soma de admitâncias.....	16
2.5. Conclusões do capítulo.....	22
CAPÍTULO 3: MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA VARREDURA DIRETA INVERSA VIA MSP E MSA.....	23
3.1. Introdução.....	23
3.2. Rede de distribuição do campus do Pici.....	23
3.2.1. Resultados obtidos para o método de fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de potências (MSP).....	24
3.2.2. Resultados obtidos para o método de fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de admitâncias (MSA).....	25
3.3. Rede IEEE 16 Barras.....	25
3.3.1. Resultados obtidos para o método de fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de potências (MSP).....	26
3.3.2. Resultados obtidos para o método de fluxo de potência através	

<i>da varredura direta-inversa utilizando soma de admitâncias</i> (MSA).....	27
3.4. Conclusões do capítulo.....	27
CAPÍTULO 4: ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS...	28
4.1. Introdução	28
4.2. Análise dos valores de tensão nas barras.....	28
4.2.1. Rede de distribuição do campus do Pici.....	28
4.2.2. Rede IEEE 16 barras.....	31
4.3. Tempo de iteração.....	34
4.3.1. Rede de distribuição do campus do Pici.....	34
4.3.2. Rede IEEE 16 barras.....	35
4.4. Número de iterações.....	35
4.4.1. Rede de distribuição do campus do Pici.....	35
4.4.2. Rede IEEE 16 barras.....	36
4.5. Conclusões do capítulo.....	36
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO GERAL E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	37
REFERÊNCIAS.....	39
APÊNDICE.....	42

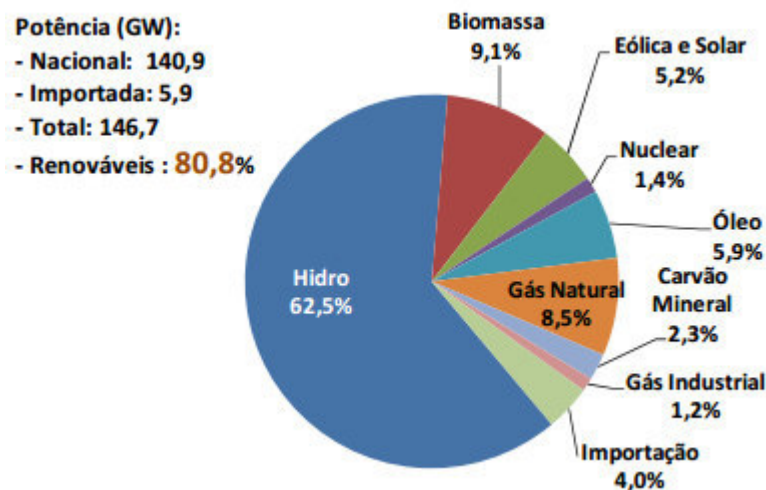
CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro apresenta características distintas em relação aos outros países. Devido ao fato do processo de colonização brasileira ter ocorrido nas regiões litorâneas, houve uma concentração demográfica nessas regiões, tornando-se assim os principais centros de consumo de energia elétrica do país.

Conforme está mostrado na Figura 1.1, o maior percentual de energia elétrica produzida no Brasil provém de usinas hidrelétricas, seguida das térmicas e da eólica. Analisando mais a fundo o cenário de produção de energia elétrica e observando a localização destas, vemos que as usinas hidrelétricas estão localizadas principalmente nas regiões mais centrais do Brasil, estando distantes dos grandes centros de consumo. Devido a essa distância, tornou-se necessária a construção de Linhas de Transmissão (LT) de energia elétrica, cujo objetivo é transportar a energia produzida até próximo dos centros de consumo com o mínimo de perdas.

Figura 1.1 – Matriz energética brasileira (2015).



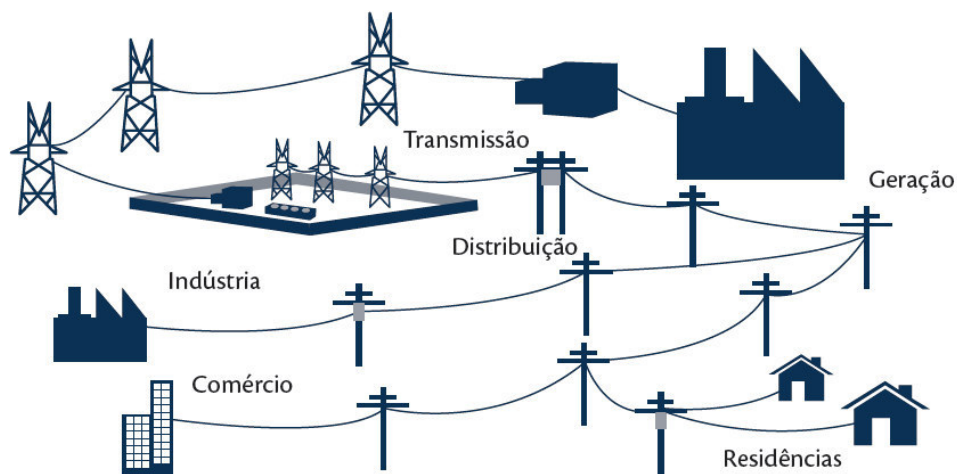
Fonte: Ministério de Minas e Energia (MME).

Sabendo-se que os patamares de tensão de geração são relativamente baixos quando comparados aos de transmissão, torna-se necessária a construção de subestações elevadoras cuja função é elevar o nível de tensão de geração até o nível de transmissão. O objetivo na elevação da tensão é reduzir as perdas no sistema de transmissão, visto que as

perdas são ocasionadas devido à corrente elétrica. Quanto maior a tensão, menor será a corrente, já que ambas seguem uma relação inversamente proporcional e, conseqüentemente, menor serão as perdas.

No final do sistema de transmissão e próximo aos centros de consumo, existem subestações que reduzem os patamares de tensão e fazem a entrega da energia transportada ao sistema de distribuição de energia elétrica. Esse sistema tem a finalidade de transportar a energia nos centros de consumo e fazer a sua entrega até o consumidor final. A Figura 1.2 apresenta os principais subsistemas constituintes do Sistema Elétrico de Potência (SEP), ou seja, geração, transmissão, distribuição e consumo.

Figura 1.2 – Sistema elétrico de potência.



Fonte: Brasil (2012).

1.1. Características do sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE)

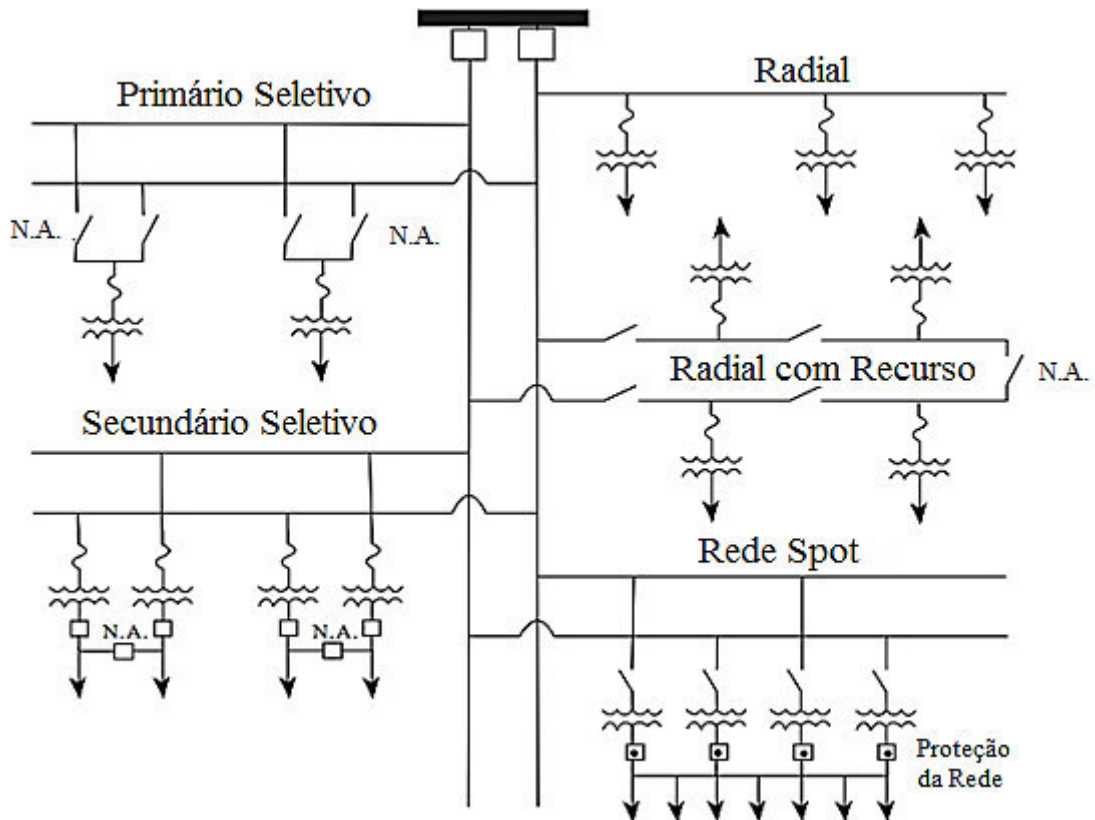
Apesar do sistema de distribuição apresentar finalidade semelhante ao sistema de transmissão, ou seja, transportar a energia até o consumidor, esse sistema apresenta características bem distintas que o faz necessitar de uma análise diferenciada, principalmente nas etapas de planejamento e operação do sistema elétrico. Algumas dessas características são: Configurações de redes predominantemente radiais e uma baixa relação X/R. Além disso, é comum encontrar alimentadores com derivações monofásicas, bifásicas e trifásicas, necessitando assim de uma análise em fluxo de potência diferenciada.

Dentre os tipos de configurações de redes encontradas em sistemas de distribuição, podemos enunciar os seguintes:

- Sistema radial simples;
- Sistema radial com primário em anel;
- Sistema radial com secundários interligados;
- Sistema radial com primário seletivo;
- Sistema radial com secundário seletivo;
- Sistema reticulado com primário seletivo;
- Sistema em malha aberta; e
- Rede spot.

Na fase de planejamento/projeto de um sistema de distribuição, pode-se fazer a opção de combinar dois arranjos de sistemas visando obter melhores resultados e garantir que o mesmo atinja determinados objetivos especificados. A Figura 1.3 apresenta os principais tipos de sistemas de distribuição utilizados.

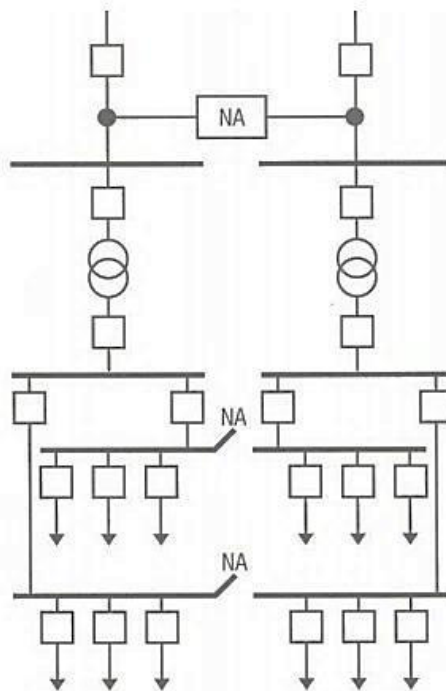
Figura 1.3 – Principais configurações de sistemas de distribuição primários.



O *sistema radial simples* apresenta a característica de ter apenas uma única fonte alimentando as cargas conectadas ao barramento. Esse tipo de sistema é destinado ao suprimento de um pequeno número de cargas e apresenta uma baixa confiabilidade, visto que em uma condição de falta de manutenção em um determinado ponto afetará diretamente o suprimento de energia à carga. Esse sistema radial pode apresentar maior confiabilidade através da colocação de mais uma fonte de alimentação, tornando-se agora o *sistema radial com primário seletivo*. Esse sistema será operado através de chaves, sendo que uma chave estará com os contatos fechados e alimentando a carga e a outra estará com os contatos abertos.

Uma maneira de aumentar mais ainda a confiabilidade do sistema seria a utilização de duas barras (dois circuitos de suprimento). Essa configuração é utilizada em sistemas com maior densidade de cargas, apresentando como vantagens a alta confiabilidade e a flexibilidade operacional. Visando aumentar a flexibilidade do sistema, pode-se distribuir as cargas a serem alimentadas em várias barras e utilizar um disjuntor de transferência, tal qual está mostrado na Figura 1.4.

Figura 1.4 – Sistema radial com disjuntor de transferência de alimentador e chave de seccionamento de barra.



Fonte: Apostila SDEE.

O *sistema radial com secundário seletivo* utiliza duas chaves normalmente fechadas e uma normalmente aberta para transferir as cargas de um transformador para outro caso seja necessário, ou seja, se houver uma falha na alimentação do primeiro ramal, a chave NF a montante do transformador será aberta e a chave NA comum aos dois ramais será fechada, tornando assim as duas cargas alimentadas pelo segundo ramal. Uma desvantagem dessa configuração é a necessidade dos transformadores apresentarem capacidade de alimentar as duas cargas em regime de funcionamento normal. Como o investimento será muito alto para garantir o suprimento de energia, outras opções tornam-se mais vantajosas. Um exemplo é o sistema com primário seletivo.

O *sistema radial em malha aberta* apresenta várias chaves no decorrer de dois alimentadores e uma chave NA no final de ambos, interligando-os. Através dessa configuração aumenta-se a confiabilidade do sistema e, durante uma falta, apresenta a característica de poder isolá-la fazendo o manuseio das chaves, assim, apenas o trecho que ocorreu a falta fica desenergizado.

O *sistema spot* apresenta vários transformadores conectados em paralelos advindos de um ou de mais alimentadores, conectando ambos ao mesmo barramento supridor da carga. Esse sistema apresenta um alto grau de confiabilidade e um alto custo, logo, sua utilização é necessária e aplicada apenas em sistemas que apresente esse requisito de alta confiabilidade.

Os sistemas de distribuição secundários apresentam em sua grande parte sistema radial simples, devido a menores exigências de confiabilidade e a grande parte dos consumidores serem do tipo residencial.

1.2. Análise do sistema elétrico através dos métodos de fluxo de potência

Segundo Monticelli (1983), o cálculo do fluxo de carga (ou fluxo de potência) em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de algumas outras grandezas de interesse. Os métodos de fluxo de potência são de suma importância para conhecimento do comportamento do sistema elétrico de potência, em sistemas de supervisão em tempo real permite o monitoramento das

condições do mesmo e possibilita o planejamento, de forma que o mesmo opere de forma satisfatória e suprindo todas as cargas conectadas a este.

Analisando a importância da utilização do fluxo de carga e a sua utilização, constata-se duas aplicações importantes do mesmo. A primeira aplicação é a utilização do fluxo em sistemas de potência para elaboração do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) do sistema elétrico. O PDE é elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e tem por objetivo apresentar importantes sinalizações para orientar a tomada de ações e decisões, voltadas para o equilíbrio entre as projeções de crescimento econômico do país e a necessária de expansão da oferta, de forma a garantir à sociedade o suprimento energético com adequados custos, em bases técnicas e ambientalmente sustentável.

Uma segunda aplicação dos métodos de fluxo de carga é a elaboração do Plano de Ampliações e Reforços (PAR) do sistema elétrico. Este é um relatório que leva em consideração a expansão do sistema elétrico para um horizonte temporal de 3 anos, e a partir de simulações feitas em *softwares* (como exemplo o Anarede pelo método de Newton-Raphson), decide-se quais medidas devem ser tomadas para garantir que o sistema elétrico suporte o acréscimo de carga e geração.

O PAR é elaborado anualmente pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e conta com a participação dos agentes de transmissão, geração, distribuição e consumidores livres. O estudo leva em conta uma série de informações, tais como: os estudos elaborados pela EPE, as propostas de novos reforços, as solicitações de acesso, as variações nas previsões de carga, os atrasos na implantação de instalações de geração e transmissão, assim como as informações oriundas da programação da operação elétrica, energética e da operação em tempo real do ONS. (PAR 2015-2017)

Existem vários métodos de Fluxos de Carga, dentre os quais estão:

- Método de Gauss – Seidel;
- Método de Newton – Raphson;
- Método desacoplado rápido;
- Método de varredura direta – inversa através da soma de potências;
- Método de varredura direta – inversa através da soma de correntes;
- Método de varredura direta – inversa através da soma de admitâncias.

De acordo com Alves (2008):

No sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), a determinação precisa e rápida do fluxo de potência é de fundamental importância para a operação, controle, projeto e planejamento desse sistema. O propósito de qualquer método de cálculo de fluxo de potência é computar com precisão os fasores de tensão nas barras e as potências ativas e reativas que fluem entre as barras do sistema do SDEE, conhecidas as cargas ao longo do alimentador e os valores de geração provindos da subestação.

1.3. Justificativa

O objetivo de um sistema elétrico de potência é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo padrões de confiabilidade, disponibilidade, segurança, qualidade e custos. Para que seja garantido o fornecimento contínuo de energia elétrica aos consumidores, faz-se necessário a atuação e monitoramento nas etapas tanto de planejamento quanto de operação. Em ambas as etapas faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros de tensões nas barras, o fluxo de potência de uma barra para outra, o montante de potência ativa e reativa em cada trecho, etc.

Nos sistemas de distribuição de energia, a utilização de métodos que aproveitam a própria configuração destes e a utilizam para o cálculo do fluxo de potência permitem uma operação mais confiável através da utilização de resultados que apresentam maior precisão e maior exatidão. Os métodos de varredura direta-inversa são exemplos destes.

Dentre os métodos de varredura direta-inversa, destaca-se a utilização do método que utiliza soma de potências devido à simplicidade do método e aos dados obtidos no próprio sistema se encontrarem na forma de potência ativa e reativa. Nesse método a carga é representada por potência ativa e reativa. Outro método que vem sendo estudado e está sendo analisado nesse trabalho é o método que utiliza soma de admitâncias. Esse método representa a carga por uma injeção de correntes em paralelo com uma admitância.

Pretende-se com o desenvolvimento desse trabalho fazer uma análise comparativa desses dois métodos de fluxo de potência em duas redes de distribuição e observar qual dos métodos apresenta melhor desempenho. Através desse conhecimento, pode-se utilizar do método proposto para garantir uma análise que melhor representa os resultados reais encontrados no sistema de distribuição e assim conhecer o estado operativo da rede e tomar decisões mais assertivas para corrigir ou prevenir situações inadequadas de operação.

1.4. Objetivos do trabalho

1.4.1. Objetivos gerais

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre dois métodos de fluxos de potência para aplicação em sistemas de distribuição de energia elétrica. Serão aplicados os métodos de fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de potência e soma de admitância. Para garantir maior confiabilidade dos resultados obtidos, ambos os métodos serão aplicados a duas redes distintas. A primeira rede será a rede de distribuição do campus do Pici e a segunda será uma rede IEEE de 16 barras. Serão analisados para cada rede simulada os seguintes parâmetros: Valores das tensões nas barras, tempo de convergência e número de iterações até atingir o critério de convergência estabelecido.

1.4.2. Objetivos específicos

- Mapear em RNP as redes elétricas do campus do Pici e IEEE 16 barras;
- Desenvolver em linguagem de programação *Python* o método de fluxo de carga de varredura direta-inversa baseado em soma de admitâncias;
- Executar por simulação computacional o fluxo de potência nas redes elétricas do campus do Pici e IEEE 16 barras usando os métodos de varredura direta-inversa por soma de potências e soma de admitâncias desenvolvidos em *Python*;
- Comparar os resultados obtidos com os dois métodos de fluxo de carga aplicados aos dois sistemas-teste quanto a erro, número de iteração e tempo de convergência.
- Analisar os resultados da comparação entre os métodos de fluxo de carga.

1.5. Metodologia

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho envolve:

- Revisão bibliográfica;
- Estudo da linguagem de programação *Python*;

- Estudo da representação de redes elétricas pelo método RNP;
- Estudo do modelo de fluxo de carga de varredura direta-inversa baseado em soma de potências e soma de admitâncias;
- Desenvolvimento e aplicação de programa computacional de fluxo de carga baseado em soma de potências e soma de admitâncias;
- Testes para avaliação de desempenho dos métodos de fluxo de carga;
- Análise comparativa com os resultados da implementação em *Python* dos métodos de fluxo de carga baseados em soma de potências e soma de admitâncias.

1.6. Revisão bibliográfica

As redes de distribuição de energia em áreas urbanas são, em grande parte, radiais com recurso, com características distintas das redes de transmissão. As principais características de uma rede de distribuição são: baixa relação entre reatância e resistência (X/R), podem apresentar trechos com derivações monofásicas, bifásicas, trifásicas e mudança de impedância (trechos com impedância relativamente baixa, como é o caso de chaves, reguladores de tensão, etc. associados com trechos de impedância relativamente alta). Logo, os métodos convencionais de fluxo de potência apresentam limitações quando aplicados a essas redes. Sendo assim, os métodos que utilizam a varredura direta-inversa são os mais adequados, pois os mesmos se utilizam das próprias características da rede para seu cálculo.

Para que sejam obtidas informações sobre os métodos de fluxo de potência utilizados em redes de distribuição de energia elétrica e para a análise comparativa entre os métodos de fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potências e via soma de admitâncias, foram analisados alguns dos principais trabalhos, descritos nos parágrafos abaixo.

Segundo arquivos disponibilizados pela COPPE – UFRJ, os métodos de varredura direta-inversa foram apresentados por Shirmhamadi (1988), no qual este método foi formulado em termos da soma de corrente, ou ainda, como atualmente é conhecido, *Current Summation Method* (CSM), ou Método de Soma de Correntes (MSC). Outra formulação para o método de varredura direta-inversa foi proposto por Broadwater (1988) e Medeiros (1975), onde o método foi formulado baseado na soma de potência, ou ainda, *Power Summation Method* (PSM) ou Método de Soma de Potência (MSP). Existe ainda uma terceira forma de

formulação do método de varredura direta-inversa, apresentada por Chen (1991) baseado na soma de admitância, conhecido por *Admittance Summation Method* (ASM) ou Método de Soma de Admitância (MSA).

Em Mashhour (2009), os métodos de varredura direta-inversa baseados em soma de potências e soma de admitâncias são utilizados para cálculo do fluxo de potência em um sistema desequilibrado que apresenta vários níveis de tensão e é aplicado para várias formas de conexões dos enrolamentos dos transformadores. Nesse trabalho foi explicado que dentre os métodos de varredura direta-inversa, o método de soma de correntes é o mais utilizado em solução de fluxo de carga trifásico, mas, nesse tipo de aplicação, o método de soma de potências tem uma vantagem, pois usa as potências ativa e reativa como as variáveis de fluxo, tornando-o assim mais conveniente e aplicável do que método de soma de correntes, especialmente quando o sistema de distribuição contém alguns barramentos especificados por tensão. Também é apresentada uma análise comparativa entre os dois métodos. Os resultados encontrados mostraram que o método de soma de potências apresentou valores nominais próximos aos valores esperados, menor tempo de iteração e menor número de iterações até atingir o critério de convergência, comprovando assim o seu melhor desempenho em comparação ao método de soma de correntes.

Em Oliveira Neto (2015) foi desenvolvido um programa para cálculo do fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potências com cálculo do curto-circuito via coordenadas simétricas. Vários cenários de falta foram analisados e os resultados obtidos foram utilizados para estudo de um sistema de recomposição automática e para o estudo das proteções da rede elétrica de distribuição do Campus do Pici. Verificou-se que foram possíveis duas alternativas de recomposição, nas quais os níveis de tensão se mantiveram dentro dos limites regulamentados como adequados, além de não apresentar sobrecarga dos condutores.

O método de soma de admitâncias (MSA) foi utilizado por Baptista (2015) para cálculo do fluxo de potência em uma rede de distribuição de baixa tensão com Geração Distribuída (GD) fotovoltaica. A partir do desenvolvimento do fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de admitâncias foi desenvolvido o cálculo do curto-circuito utilizando coordenadas de fase. A partir do desenvolvimento destes e da utilização de método de estimação probabilística das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), tais como a simulação de Monte Carlo e o método de enumeração de estados, foi possível fazer a análise

probabilística para a avaliação do impacto da GD e seu efeito nas VTCD do sistema de distribuição utilizado.

Fontenele (2016) faz uso do fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potências para implementação de um algoritmo computacional implementado em *python* para reconfiguração e restauração das redes de distribuição radial de energia elétrica após a ocorrência de uma falta de caráter permanente. O Sistema-Teste utilizado foi o IEEE 16 Barras e um Sistema-Teste com 41 Barras para análise da atuação do aplicativo desenvolvido. Após análise, foi observado que o aplicativo apresentou um bom desempenho, o que garante sua utilização com segurança em redes radiais de distribuição de energia elétrica.

No trabalho publicado por Borin (2013), o método de varredura direta-inversa via MSC foi utilizado para desenvolvimento de uma ferramenta computacional com capacidade de determinação dos módulos e ângulos das tensões em cada barra da rede analisada, o fluxo de potência em cada ramo e as perdas elétricas. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos utilizando o método de Newton-Raphson, também implementado na mesma plataforma de simulação e observou-se concordância nos resultados encontrados em ambos os métodos. Foram analisados o número de iteração até atingir a convergência e o tempo de processamento do programa. No método de Newton-Raphson foi atingida a convergência em 3 iterações e no tempo de 0,341 s, enquanto que no método de varredura direta-inversa foram necessárias 6 iterações, mas, com tempo de processamento menor, 0,038s. Tal fato foi explicado devido ao fato do Método de Newton-Raphson precisar resolver duas equações não lineares para assim conseguir encontrar os resultados do fluxo.

Em Carvalho (2005), foi realizado um estudo comparativo de dois métodos de fluxo de potência aplicados a sistemas de distribuição, o método de Newton-Raphson e o método de varredura direta-inversa baseado em soma de correntes. Para validação e comparação dos resultados, foram aplicados os métodos a quatro redes distintas e com um número de barras diferentes: 4 barras, 10 barras, 34 barras e 70 barras. Nesse trabalho foi concluído que o método de Newton-Raphson apresentou melhor desempenho do que o método de varredura direta-inversa via soma de correntes no quesito número de iterações.

O fluxo de potência via varredura direta-inversa também foi utilizado por Pereira (2014) para estudos de reconfiguração de redes em sistemas de distribuição. A metodologia desenvolvida foi aplicada a um Sistema de Distribuição (SD) de grande porte na cidade de Marília-SP. Os resultados obtidos foram bastante próximos daqueles fornecidos pela

concessionária de distribuição de energia elétrica. Além dos valores nominais, o número de iterações e o tempo de execução foi considerado satisfatório. Os testes realizados revelaram que a aplicação do método proposto em sistemas de recomposição de redes é perfeitamente possível.

Logo, observam-se várias referências que tratam de análise comparativa entre os métodos de fluxo de potência aplicados a redes de distribuição entre os métodos de varredura direta-inversa e o método de Newton-Raphson, ou ainda, entre os métodos de varredura direta-inversa via soma de potências e via soma de correntes, mas, o método de varredura direta-inversa via soma de admitâncias tem sido pouco estudado e analisado. Esta é mais uma motivação para o entendimento desse método e sua eficácia e aplicação quando comparados aos outros métodos de varredura direta-inversa.

1.7. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e estruturado conforme está mostrado a seguir:

O Capítulo 2 apresenta a descrição e a lógica implementada para o método de fluxo de potência através da varredura direta – inversa utilizando o método de soma de potências e soma de admitâncias.

O Capítulo 3 descreve os resultados obtidos através das aplicações dos dois métodos de fluxo de potência para a rede elétrica de distribuição do campus do Pici e a rede IEEE 16 barras.

O Capítulo 4 apresenta uma análise comparativa dos resultados encontrados com a implementação dos métodos de fluxo de potência para a rede elétrica de distribuição do campus do Pici e a rede IEEE 16 barras.

O Capítulo 5 descreve as conclusões obtidas e as perspectivas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA VARREDURA DIRETA-INVERSA UTILIZANDO SOMA DE POTÊNCIAS E SOMA DE ADMITÂNCIAS

2.1. Introdução

Neste Capítulo será mostrado o método de fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de potências e soma de admitâncias. Para tanto, a representação do modelo de carga no modelo de soma de potências será através de suas potências ativa e reativa. No modelo de soma de admitâncias, a carga será modelada como uma admitância em paralelo com uma fonte de corrente e serão adotadas simplificações para efetuação do método. Será mostrado o passo a passo de cada método, bem como o fluxograma de funcionamento de cada um.

2.2. Modelagem da carga para utilização nos métodos de fluxo de potência

De acordo com Souza (2010):

A composição da carga é difícil de ser estimada, pois esta varia continuamente de acordo com os consumidores quando os mesmos decidem utilizar seus equipamentos e máquinas. A composição da carga pode variar ainda de acordo com a hora do dia, o dia da semana, estação do ano, condições climáticas, estado da economia, etc. Cada dispositivo conectado a um barramento apresenta um comportamento específico. Alguns dispositivos exibem uma resposta dinâmica a distúrbios, outros não. Alguns variam suas características com a variação do ponto de operação do sistema. Sabe-se que o comportamento dinâmico das cargas do sistema é afetado de acordo com variações da tensão e da frequência do barramento ao qual estão conectadas. As características estáticas das cargas são válidas somente sobre uma estreita faixa de variação de tensão e frequência. Quando a tensão e a frequência sofrem uma variação de grande amplitude, as características dinâmicas devem ser incluídas para uma representação mais precisa das cargas. Desta forma, um modelo de carga busca representar a relação entre a tensão e a frequência com as potências ativa e reativa em um determinado barramento de carga.

Logo, observando as conclusões obtidas por Souza (2010), a representação da carga sofre influência de diversos fatores, tornando-se de fundamental importância para a

implementação dos métodos de fluxo de potência. Nos dois métodos utilizados nesse trabalho, a carga será modelada de maneira distinta, cada uma com suas particularidades.

Na execução do método de varredura direta-inversa utilizando soma de potências, a carga é modelada como sendo de potência constante, ou seja, a mesma é representada através de suas potências ativas e reativas. Durante a varredura inversa serão adotadas simplificações no qual são calculadas as potências em cada barra do sistema, enquanto que na varredura direta serão calculadas as tensões.

No método de varredura direta-inversa através de soma de admitâncias, a carga é modelada como sendo uma injeção de corrente em paralelo com uma admitância, logo, na varredura inversa serão calculadas as admitâncias e correntes equivalentes em todas as barras do sistema e na varredura direta serão calculadas as tensões.

2.3. Método de varredura direta-inversa utilizando soma de potência

De acordo com Mansour (2009), o método de soma de potências é o método de varredura direta-inversa mais difundido na literatura e apresenta boa eficiência para cálculo de fluxo de potência em sistemas com topologia radial. Para o entendimento desse tipo de metodologia, será mostrado o passo a passo de cada varredura desse método.

- **Varredura Inversa**

Durante a varredura inversa serão calculadas as potências ativa e reativa equivalentes em cada nó do sistema, partindo do último nó (nó com maior profundidade) até o nó fonte (barramento da subestação). O cálculo das potências ativas e reativas está mostrado nas Equações (2.1) a (2.4).

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} + P_{Li} \quad (2.1)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} + Q_{Li} \quad (2.2)$$

$$P'_i = P_i + P_{Li} \quad (2.3)$$

$$Q'_i = Q_i + Q_{Li} \quad (2.4)$$

Em que,

P_i é o fluxo de potência ativa através do ramo i ;

r_i é a resistência do ramo i ;

Q_i é o fluxo de potência reativa através do ramo i ;

x_i é a reatância do ramo i ;

P_{Li} é a potência ativa da carga na barra i ;

Q_{Li} é a potência reativa na barra i ;

- **Varredura Inversa**

Na varredura inversa serão calculadas as tensões em todos os nós da rede, tal qual está mostrado das Equações (2.5) a (2.8).

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.5)$$

$$\delta_{i+1} = \delta_i - \tan^{-1}(k_1/k_2) \quad (2.6)$$

$$k_1 = \frac{(P_i x_i - Q_i r_i)}{V_i} \quad (2.7)$$

$$k_2 = \frac{(P_i r_i - Q_i x_i)}{V_i} \quad (2.8)$$

Em que,

P_i é o fluxo de potência ativa através do ramo i ;

r_i é a resistência do ramo i ;

Q_i é o fluxo de potência reativa através do ramo i ;

x_i é a reatância do ramo i ;

P_{Li} é a potência ativa da carga na barra i ;

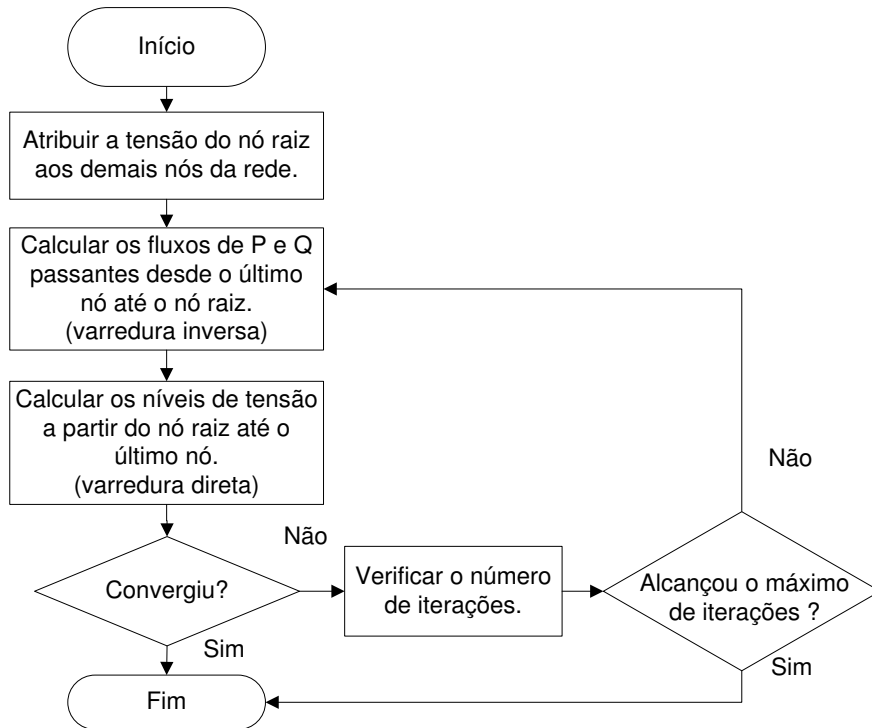
Q_{Li} é a potência reativa na barra i ;

V_i é o módulo da tensão na barra i ; e

δ_i é o ângulo da tensão na barra i .

A Figura 2.1 mostra o fluxograma para cálculo do fluxo de potência através do método de soma de potências.

Figura 2.1 – Fluxograma do método de soma de potências.



Fonte: Oliveira Neto (2015).

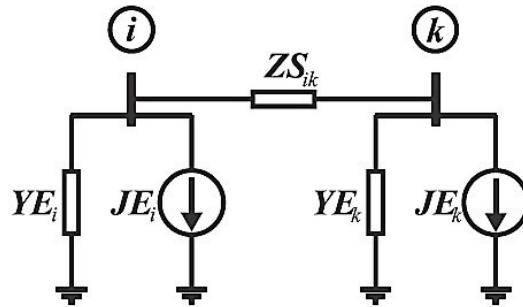
2.4. Método de varredura direta-inversa utilizando soma de admitância

O método de soma de admitâncias é um método que não tem sua aplicação difundida devido à falta de informações na literatura que garantam sua eficácia. Para o entendimento dessa metodologia, observe o passo a passo tanto na varredura inversa quanto na varredura direta que está mostrado a seguir.

- **Varredura inversa**

Para o cálculo da varredura inversa, considere o circuito equivalente mostrado na Figura 2.2, onde em cada nó, a carga é modelada como uma admitância em paralelo com uma fonte de corrente.

Figura 2.2 – Circuito equivalente para varredura inversa.



Fonte: Adaptado de (BAPTISTA, 2015).

Em que:

JE_k é a fonte de corrente equivalente no nó k.

YE_k é a admitância equivalente no nó k.

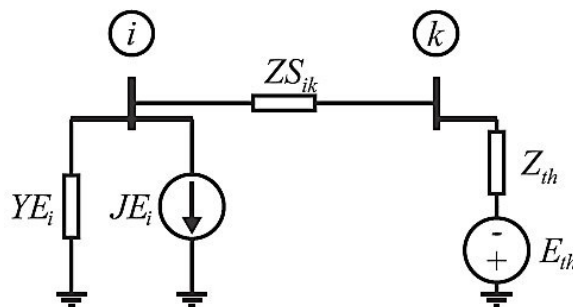
JE_i é a fonte de corrente equivalente no nó i.

YE_i é a admitância equivalente no nó i.

ZS_{ik} é a impedância do trecho que liga o nó i ao nó k.

Para resolução desse circuito, a admitância que está em paralelo com a fonte de corrente é transformada em uma fonte de tensão em série com uma impedância utilizando a transformação de fontes, conforme o circuito mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Conversão de fonte de corrente em fonte de tensão.



Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

Em que Z_{th} representa a impedância equivalente calculada por:

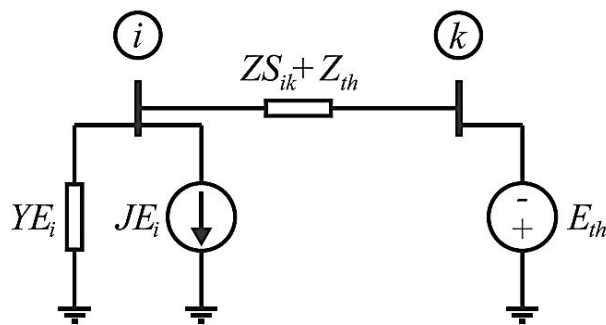
$$Z_{th} = \frac{1}{YE_k} \quad (2.9)$$

E_{th} representa a tensão equivalente encontrada após a transformação de fontes e calculada por:

$$E_{th} = Z_{th} * JE_k \quad (2.10)$$

Logo, analisando o circuito na Figura 2.3, percebe-se que as impedâncias em série podem ser substituídas por uma impedância equivalente tal qual está mostrado na Figura 2.4.

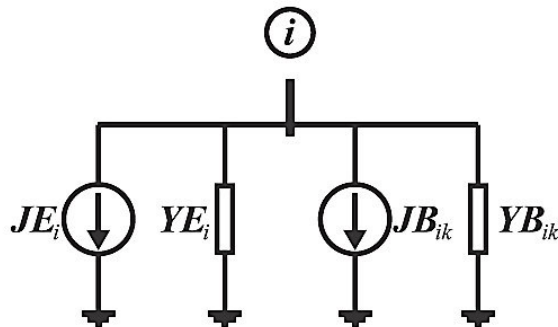
Figura 2.4 – Soma de impedâncias em série.



Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

Assim, pode-se fazer a transformação da fonte de tensão em série com uma impedância em uma fonte de corrente em paralelo com uma admitância, e simplificar os nós i e k em apenas um nó, resultando assim no circuito da Figura 2.5.

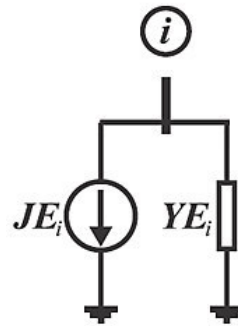
Figura 2.5 – Conversão de fonte de tensão em fonte de corrente.



Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

Logo, pode-se fazer a soma das fontes de corrente e das admitâncias, resultando no circuito equivalente mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Circuito simplificado para cálculo da varredura inversa.



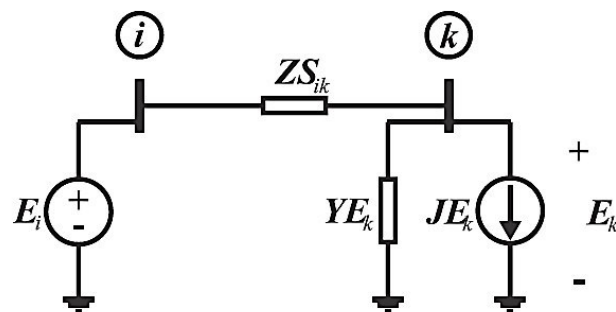
Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

Assim, percebe-se que houve uma simplificação de nós. Através das transformações de fontes e das leis básicas de circuitos elétricos transformamos os nós j , k e o ramo que liga os mesmos em um único nó equivalente. Esse procedimento deve ser realizado até que a rede modelada tenha sido simplificada ao nó fonte em série com o último nó equivalente resultado do processo de simplificação acima.

- **Varredura Direta**

Finalizada a varredura inversa, em que em todos os nós foram calculadas a admitância equivalente em paralelo com a fonte de corrente equivalente, pode-se iniciar o cálculo da varredura direta. Essa consiste na determinação dos valores das tensões em cada nó, iniciando do primeiro nó a jusante da subestação e finalizando no nó com maior profundidade. O circuito equivalente para o cálculo da varredura direta está mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Circuito equivalente para cálculo da varredura direta.



Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

Em que:

E_i é a tensão na barra da subestação.

ZS_{ik} é a impedância do trecho que liga o nó i ao nó k .

YE_k é a admitância equivalente no nó k .

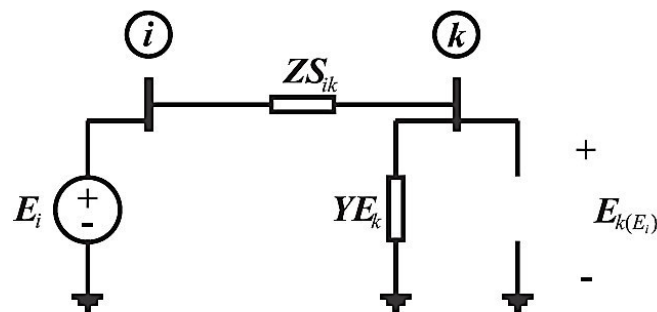
JE_k é a fonte de corrente equivalente no nó i .

E_k é a tensão no nó k .

Analisando o circuito acima, percebe-se que o mesmo está susceptível à contribuição de duas fontes. Assim sendo, deve-se utilizar o princípio da superposição e calcular a tensão E_k através da contribuição individual de cada fonte (fonte de tensão e fonte de corrente), para em seguida realizar a soma de ambas.

Resolvendo o circuito para contribuição da fonte de tensão, a fonte de corrente será substituída por um circuito aberto, resultando assim no circuito equivalente mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Método de superposição – desabilita fonte de corrente.



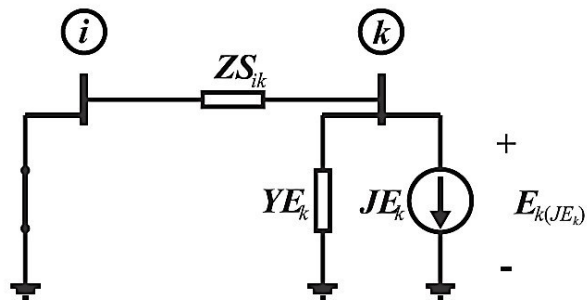
Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

Analisando o circuito para cálculo de E_k , observa-se que a impedância ZS_{ik} e a admitância YE_k estão em série, logo, pode-se aplicar o cálculo do divisor de tensão e encontrar a tensão E_k , tal qual está mostrado na equação 2.11.

$$E_k = \frac{\frac{1}{YE_k} * E_i}{ZS_{IK} + \frac{1}{YE_k}} \quad (2.11)$$

Resolvendo o circuito para contribuição da fonte de corrente, a fonte de tensão será substituída por um curto-circuito, resultando assim no circuito equivalente mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Método de superposição – desabilita fonte de tensão.



Fonte: Adaptado de Baptista (2015).

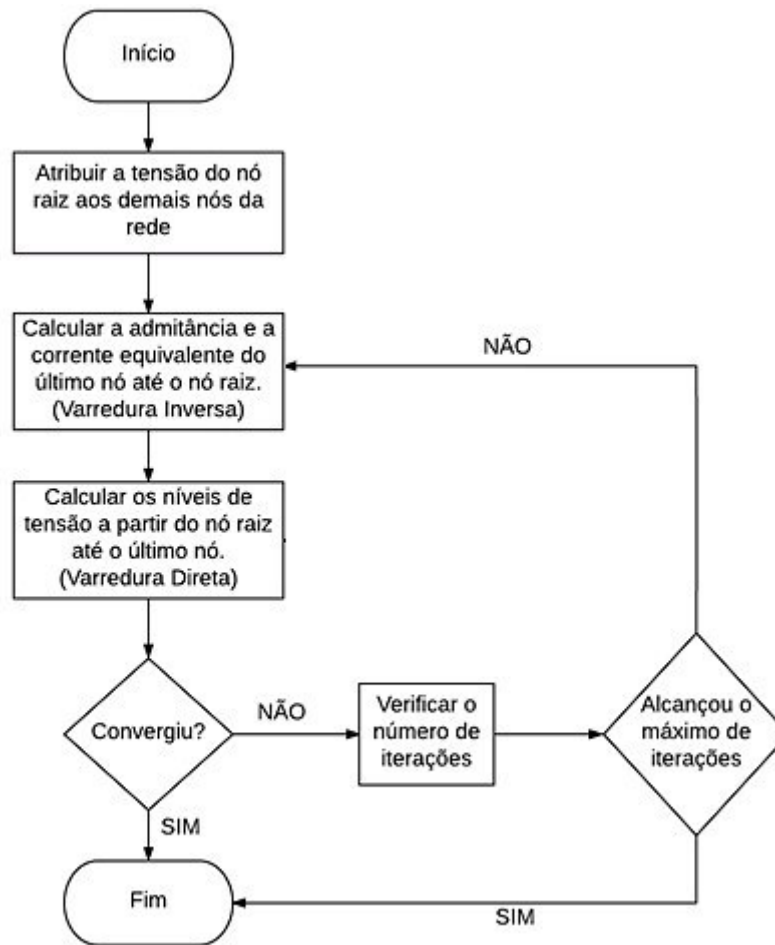
Analisando o circuito para cálculo de E_k , observa-se que a impedância ZS_{ik} e a admitância YE_k estão em paralelo, logo, pode-se calcular o paralelo entre elas e simplificar o circuito para cálculo de E_k , tal qual está mostrado nas Equações (2.12) e (2.13).

$$Z_{eq} = \frac{\frac{1}{YE_k} * ZS_{ik}}{ZS_{ik} + \frac{1}{YE_k}} \quad (2.12)$$

$$E_k = Z_{eq} * JE_k \quad (2.13)$$

O fluxograma para cálculo do fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de admitâncias está mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Fluxograma do método de soma de admitâncias.



Fonte: O próprio autor.

2.5. Conclusões do Capítulo

Neste Capítulo foi mostrada a modelagem da carga para utilização no fluxo de potência via MSA. Observou-se que a composição da mesma sofre influência de vários fatores e necessita de informações detalhadas para especificar sua representação. Foram apresentados os métodos de fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potência e via soma de admitância. Foi mostrado o passo a passo para cálculo das admitâncias e correntes equivalentes na varredura inversa e para o cálculo das tensões na varredura direta. No Capítulo seguinte será feita a descrição dos resultados obtidos com a implementação em *python* de ambos os métodos para a Rede Pici e para Rede IEEE 16 Barras.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA VARREDURA DIRETA INVERSA VIA MSP E MSA

3.1. Introdução

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da implementação em *python* dos métodos de fluxo de potência utilizando soma de potências e soma de admitâncias, aplicados à rede de distribuição do campus do Pici da Universidade Federal do Ceará e a rede IEEE 16 barras. Para que os resultados obtidos estejam em equivalência e possam ser comparados posteriormente, ambos os programas foram implementados no notebook da marca ACER, com processador Intel Core I5.

3.2. Rede de distribuição do campus do Pici

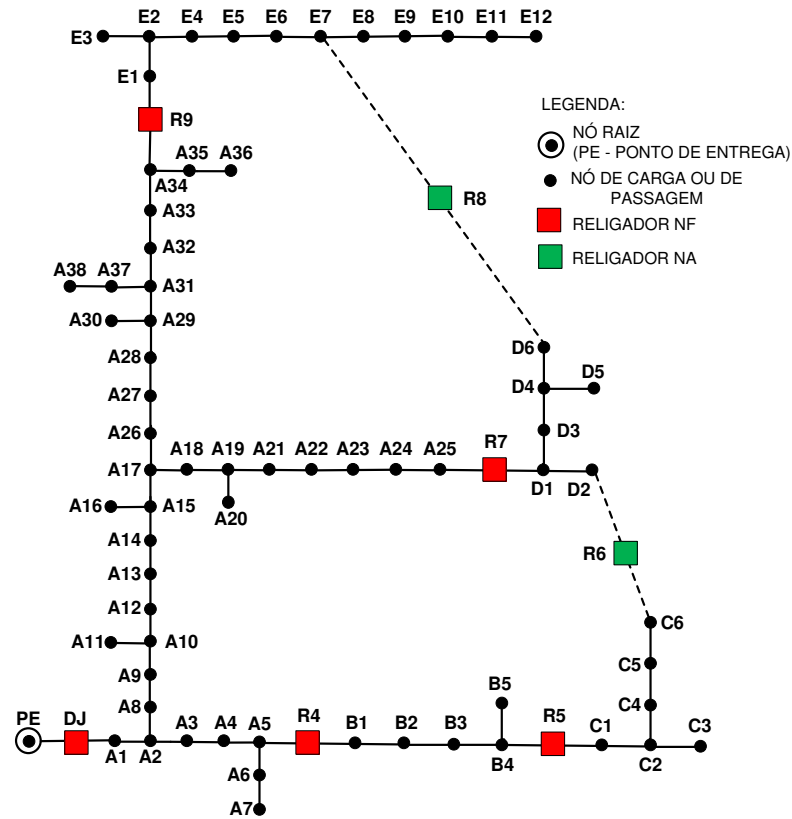
A rede de distribuição do campus do Pici da Universidade Federal do Ceará, modelada neste trabalho, apresenta uma configuração distinta da rede atual instalada no campus. Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos visando à modernização da rede atual para conferir maior confiabilidade, disponibilidade, segurança e economia.

Segundo Lopes (2011), a rede elétrica de distribuição do campus do Pici é do tipo aérea, apresenta topologia radial com recurso manual e apresenta cerca de 6,3 km de extensão. Em Oliveira Nero (2015), a rede elétrica de distribuição do campus do Pici foi modelada de uma maneira distinta da configuração atual, através da Representação Nó-Profundidade (RNP). Essa nova modelagem apresenta um novo arranjo topológico, composto de religadores, chaves de encontro de alimentadores e dispositivos indicadores de falta. A motivação para esse novo arranjo de rede foi servir como base para o desenvolvimento e implantação de um Sistema de Recomposição Automática (SRA) e de um sistema inteligente de mudança de grupo de ajustes das proteções.

Na proposta de rede apresentada por Oliveira Neto (2015) foram implementados os programas de fluxo de potência através de soma de potências e soma de admitâncias e os resultados obtidos utilizados para a análise comparativa dos dois métodos. A Figura 3.4

apresenta a configuração da rede de distribuição do campus do Pici modelada nesse trabalho, sendo denotado os setores, nós de passagem, nós de carga e religadores.

Figura 3.1 – Representação da rede Pici com os nós/barras de carga e de passagem.



Fonte: Oliveira Neto (2015).

3.2.1. Resultados obtidos para o método de varredura direta-inversa utilizando soma de potências (MSP)

Com a implementação do fluxo de potência via soma de potências em *python*, pode-se encontrar quais os valores em módulo e ângulo das tensões em cada uma das barras da rede modelada. Foram utilizados dois critérios de parada do programa: atingir a convergência com a diferença entre os valores de tensão nas barras para duas iterações inferior a 10^{-4} ou o número máximo de iterações igual a 50. Para essa rede, o programa atingiu o critério de convergência em 3 iterações e o tempo de processamento foi igual a 13 ms. Os valores encontrados para as barras analisadas estão mostrados na Tabela 3.1 e os valores de tensão em todas as barras encontra-se na Tabela 1 do apêndice.

Tabela 3.1: Valores de tensão para o MSP para as barras analisadas da rede Pici.

Nó ou Barra	Tensão (kV)	Ângulo (rad)
A1	13,6984	- 0,1787
A25	13,4526	- 0,4456
E12	13,3088	- 0,5587

Fonte: Próprio Autor.

3.2.2. Resultados obtidos para o método de varredura direta-inversa utilizando soma de admitâncias (MSA)

Com a implementação do Fluxo de potência via soma de admitâncias em *python*, pode-se encontrar quais os valores em módulo e ângulo das tensões em cada um dos nós da rede modelada. Para essa rede, o programa atingiu o critério de convergência em 3 iterações e o tempo de processamento foi igual a 30 ms. Os valores encontrados para as barras analisadas estão mostrados na Tabela 3.2, enquanto que os valores de tensão em todas as barras da rede Pici encontram-se na Tabela 2 do apêndice.

Tabela 3.2: Valores de tensão para o MSA para as barras analisadas da rede Pici.

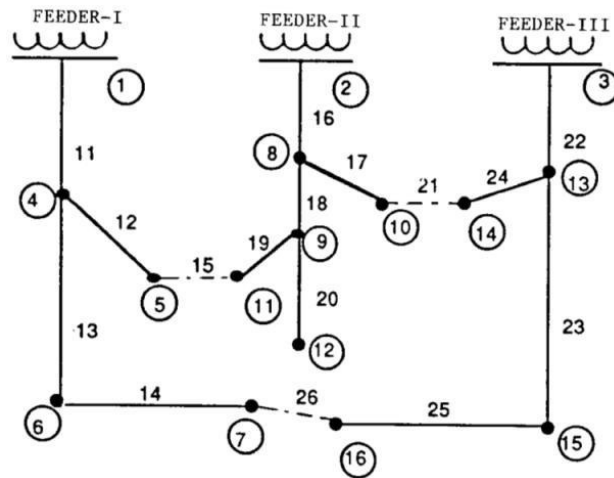
Nó ou Barra	Tensão (kV)	Ângulo (rad)
A1	13,7881	- 0,3838
A25	13,7755	- 0,6703
E12	13,7573	- 0,5385

Fonte: Próprio Autor.

3.3. Rede IEE 16 Barras

Segundo Cinvalar *et al* (1988), a rede IEEE 16 barras é um sistema de distribuição radial bastante conhecido e utilizado como referência em muitos trabalhos. Fontenele (2016) especificou que essa rede é composta por 13 nós de carga, 3 subestações com um alimentador de 23 kV cada, 13 chaves normalmente fechadas e 3 chaves normalmente abertas, tal qual está mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Rede IEEE 16 barras.



Fonte: Cinvalar *et al.* (1988).

3.3.1. Resultados obtidos para o método de varredura direta-inversa utilizando soma de potências (MSP)

Para o MSP aplicado à rede IEEE 16 barras, o critério de convergência foi atingido em 3 iterações para cada um dos três alimentadores e o tempo de processamento foi igual a 12 ms. Os valores de magnitude de tensão e ângulo encontrados nas barras analisadas pelo MSP estão mostrados na Tabela 3.3 e os valores de magnitude de tensão e ângulo em todas as barras dessa rede pelo MSP estão mostrados na Tabela 6 do Apêndice.

Tabela 3.3: Valores de tensão para o MSP para as barras analisadas da rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Tensão	
	Módulo (kV)	Ângulo (rad)
Alimentador 1:		
Barra N4	22.8900	- 0.2241
Barra N7	22.8215	- 0.3482
Alimentador 2:		
Barra N8	22.8267	- 0.4364
Barra N12	22.7311	- 0.9764
Alimentador 3:		
Barra N13	22.9473	- 0.1550
Barra N16	22.8918	- 0.3082

Fonte: Próprio Autor.

3.3.2. Resultados obtidos para o método de varredura direta-inversa utilizando soma de admitâncias (MSA)

Com a implementação em *python* do Fluxo de potência via soma de admitâncias para a rede IEEE 16 barras, pode-se encontrar quais os valores em módulo e ângulo das tensões em cada uma das barras da rede modelada. Para essa rede, o critério de convergência foi atingido em 3 iterações para os alimentadores 1 e 3, enquanto que para o alimentador 2 a convergência foi atingida com 4 iterações. O tempo de processamento para atingir a convergência foi de 16 ms para esse método.

Os valores de magnitude de tensão e ângulo encontrados nas barras analisadas com os MSA estão mostrados na Tabela 3.4, enquanto que os valores de magnitude de tensão e ângulo em todas as barras dessa rede pelo MSA estão mostrados na Tabela 7 do Apêndice.

Tabela 3.4: Valores de tensão para o MSA para as barras analisadas da rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Tensão	
	Módulo (kV)	Ângulo (rad)
Alimentador 1:		
Barra N4	22.9838	- 0.7964
Barra N7	22.9520	- 2.3686
Alimentador 2:		
Barra N8	22.8267	- 1.8500
Barra N12	22.7311	- 5.4430
Alimentador 3:		
Barra N13	22.9473	- 0.0340
Barra N16	22.8918	- 1.0313

Fonte: Próprio Autor.

3.4. Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a implementação em *python* do fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potência e via soma de admitâncias aplicados a duas redes de distribuição: a rede de distribuição do Campus do Pici e uma rede IEEE 16 barras. No próximo Capítulo serão analisados os dados apresentados nesse capítulo e será feita uma análise comparativa entre os dois métodos utilizados.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Introdução

Neste Capítulo será apresentada a análise comparativa entre os métodos de fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potências e via soma de admitâncias. Serão comparados os valores de tensão encontrados nas barras/nós, o número de iterações até atingir a convergência e o tempo de processamento de cada método.

4.2. Análise dos valores de tensões nas barras

Para análise comparativa dos dois métodos, serão tomadas três barras da rede com características distintas, ou seja, a barra mais próxima à subestação, uma barra intermediária e a barra mais distante da subestação. Os valores das tensões e ângulos em cada uma serão utilizados como valores de comparação entre o método que utiliza soma de potências e o método que utiliza soma de admitâncias.

4.2.1. Rede de distribuição do campus do Pici

Para a rede Pici, a tensão nominal de 13800 V foi considerada *default* para a primeira iteração, ou seja, a condição inicial para o fluxo de potência via varredura direta-inversa, e a cada iteração, recalcula-se novamente o valor de tensão nas barras até atingir o critério de convergência ou o número máximo de iterações. O critério de convergência é a diferença entre os valores de tensões nas barras para duas iterações inferior a 10^{-4} e o critério de parada é o número máximo de iterações igual a 50. Em nenhum dos métodos utilizados atingiu-se o número máximo de iterações, ou seja, o critério de convergência foi atingido antes.

Para o fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potências, os valores das tensões encontradas resultaram do cálculo das potências equivalentes em cada barra na varredura direta, enquanto que na varredura inversa, todas as tensões foram recalculadas e atualizadas. Após atingido o critério de convergência, observou-se que as barras apresentaram um valor de tensão nominal que apresentava uma redução à medida que se afastava do nó subestação. Tal fato é explicado devido às perdas nas linhas que

ligam duas barras. Como as mesmas apresentam uma impedância característica dos próprios condutores e como essa impedância é relativamente baixa e totalmente dependente do material condutor utilizado, existe uma pequena queda de tensão na mesma, de tal forma que a tensão a jusante da barra atual é a própria tensão atual subtraída da perda que liga a barra atual e a barra a jusante.

Analisando a tensão na barra mais próxima a subestação, ou seja, a barra A1, tem-se o valor de tensão de 13,6984 kV e ângulo de - 0,1787 rad. Como a tensão nominal é de 13,8 kV e a tensão na barra encontrada é de 13,6984 kV, atribui-se a diferença de tensões a própria impedância da linha que liga a subestação a essa primeira barra.

A barra intermediária escolhida para análise foi a A25. Os valores encontrados foram a magnitude de tensão igual 13,4556 kV e ângulo de - 0,4456 rad. Percebe-se que a medida que se afasta da subestação, menor a tensão nominal da barra, pois maior será o número de trechos e maior o número de quedas de tensões nos mesmos.

Analisando a tensão na barra/nó mais distante da subestação, ou seja, a barra E12, observa-se que este apresentou o menor valor de magnitude de tensão, ou seja, 13,3088 kV com ângulo de - 0,5587 rad. Esse foi o menor valor de tensão encontrado e isso era o esperado, visto que este é o nó mais distante e, conseqüentemente, haverá mais quedas de tensões nas linhas até chegar a esse ponto.

Para o segundo método, ou seja, para o fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de admitâncias, o cálculo das tensões em cada barra foi obtido de maneira distinta em relação ao primeiro. Durante a varredura inversa foram calculadas as correntes e admitâncias equivalentes em cada barra, para que na varredura inversa fosse calculada a tensão. Assim como para a soma de potência, nesse método o critério de convergência foi atingido antes de atingir o número máximo de iterações, ou seja, a diferença de tensões nas barras entre uma iteração e outra foi inferior a um valor estabelecido antes de atingir o número máximo de iterações.

Para esse método, as mesmas barras serão analisadas, ou seja, as barras nomeadas por A1, A25 e E12. Analisando a tensão na barra mais próxima a subestação, ou seja, a barra A1, encontramos o valor de tensão de 13,7881 kV e ângulo de - 0,3838 rad. Novamente atribui-se a diferença entre a tensão nominal e a tensão na primeira barra a queda de tensão no trecho que liga as duas barras.

Analisando agora a barra intermediária, ou seja, a barra A25, encontra-se o valor da tensão igual a 13,7755 kV e ângulo de - 0,6703 rad. Percebe-se novamente que houve um decréscimo de tensão entre a barra mais próxima a subestação e essa barra intermediária.

A barra mais distante da subestação, barra E12, apresentou para esse método o valor de tensão de 13,7573 kV com ângulo de - 0,5385 rad. Novamente, esse foi o menor valor de tensão encontrado para as três barras analisadas e mais uma vez, é um resultado esperado.

Tomando os valores das barras A1, A25 e E12, observa-se que em ambos os casos os valores de tensões encontradas estão de acordo com os dados encontrados, pois a barra mais próxima a subestação apresenta o maior valor de tensão, enquanto que a medida que são analisadas as barras mais distantes, há uma diminuição do valor da tensão, ou seja, em ambos os métodos os valores nominais seguem um padrão. Assim, os dois métodos apresentaram valores de tensão dentro dos valores esperados.

Outro importante parâmetro que deve ser utilizado como critério de comparação dos valores de tensão obtidos em cada método é o cálculo do erro relativo à tensão nominal. Conforme está mostrado na Tabela 4.1, para as barras analisadas, o MSP apresentou maior erro do que o MSA, com valores de 3,5594% e 0,3094% para as barras analisadas, respectivamente.

Tabela 4.1 – Erro percentual relativo à tensão nominal para a rede Pici.

Barras	Erro (%)	
	MSP	MSA
A1	0,7362	0,0862
A25	2,4975	0,1775
E12	3,5594	0,3094

Fonte: Próprio Autor.

Como o MSA apresentou menor erro relativo à tensão nominal do que o MSP, calculou-se o erro absoluto do MSP relativo ao MSA, cujos valores estão apresentados na Tabela 4.2. O maior erro encontrado para a magnitude de tensão nas barras analisadas foi de 3,2600% e a máxima diferença angular de 0,2247 rad.

Tabela 4.2 – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para a rede Pici.

Barras	Erro (%) Tensão	Diferença Angular (rad)
A1	0,6506	0,2051
A25	2,3222	0,2247
E12	3,2600	0,0202

Fonte: Próprio Autor.

Para as três barras analisadas acima, o valor máximo do erro percentual relativo ao MSA para a rede Pici encontrado foi de 3,2500% e o menor valor encontrado foi 0,6500%, conforme está mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Erro relativo ao MSA para a rede Pici.

Nó ou Barra	Erro (%) Tensão	Diferença Angular (rad)
A1	0,6500	0,2051
A25	2,3181	0,2247
E12	3,2500	0,0202

Fonte: Próprio Autor.

Analisando todos os cálculos dos erros apresentados, observa-se que o valor percentual do erro cresce à medida que as barras se afastam da subestação, mas, pode-se afirmar que os valores encontrados apresentaram resultados satisfatórios, com valores de erro percentual relativamente baixo. Para as barras analisadas, o MSA apresentou menor erro percentual, apresentando valores de tensão mais próximos da tensão nominal da rede.

4.2.2. Rede IEEE 16 barras

A Rede IEEE 16 Barras apresenta tensão nominal de 23000 V ou 23 kV e a mesma têm características distintas quando comparada à rede Pici. Nessa rede, tem-se a presença de 3 subestações, logo, as barras analisadas serão as barras mais próximas e mais distante de cada subestação. Serão ao todo analisados 6 barras dessa rede e os valores

encontrados serão usados para comparação entre os métodos de fluxo de potência via soma de potências e via soma de admitâncias. Assim como para a rede Pici, o critério de convergência foi atingido antes de atingir o número máximo de iterações.

Novamente, os valores das tensões em cada barra diminuiram a medida que a mesma se afastava da subestação. Tal fato pode ser explicado devido à queda de tensão nas linhas que ligam as barras. Quanto maior a distância à subestação, maior será a queda de tensão na linha, e menores serão os valores de tensão nas barras.

Analisando os resultados obtidos nos dois métodos, percebe-se que não houve muita distinção entre os módulos das tensões dos alimentadores. O alimentador 1 foi o único a apresentar valores distintos em cada um dos métodos, mas, a diferença entre os valores nominais não é tão grande. Nos alimentadores 2 e 3, os valores dos módulos das tensões encontradas em ambos os métodos foram iguais, distinguindo-se apenas do ângulo. Com base no exposto, pode-se afirmar que ambos apresentaram resultados dentro do esperado.

Calculando o erro percentual relativo à tensão nominal para cada método, encontram-se os valores mostrados na Tabela 4.4. Conforme está mostrado na Tabela 4.4, para as barras analisadas, o alimentador 1 foi o único a apresentar valores de erros diferentes para cada método, com o valor do erro do MSP superior ao valor do erro do MSA.

Tabela 4.4 – Erro percentual relativo à tensão nominal para a rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Erro (%)	
	MSP	MSA
Alimentador 1:		
Barra N4	0,4783	0,0704
Barra N7	0,7761	0,2087
Alimentador 2:		
Barra N8	0,7535	0,7535
Barra N12	1,1691	1,1691
Alimentador 3:		
Barra N13	0,2291	0,2291
Barra N16	0,4704	0,4704

Fonte: Próprio Autor.

Para o alimentador 1, o MSA apresentou menor erro relativo à tensão nominal do que o MSP, enquanto que para os demais alimentadores o erro foi igual. Assim, calculou-se o erro absoluto do MSP relativo ao MSA, cujos valores estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para a rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Erro (%) Tensão	Diferença Angular (rad)
Alimentador 1:		
Barra N4	0,4081	0,5723
Barra N7	0,5686	2,0204
Alimentador 2:		
Barra N8	0,0000	1,4136
Barra N12	0,0000	4,4726
Alimentador 3:		
Barra N13	0,0000	0,1210
Barra N16	0,0000	0,7231

Fonte: Próprio Autor.

O erro máximo relativo ao MSA encontrado foi de 0,5674%, em uma das barras do alimentador 1, conforme está mostrado na Tabela 4.6. Novamente, como os valores de tensão nas barras dos alimentadores 2 e 3 apresentam a mesma magnitude de tensão, o erro relativo de tensão apresentou valor nulo.

Tabela 4.6 – Erro relativo ao MSA para a rede Pici.

Alimentadores	Erro (%) Tensão	Diferença Angular (rad)
Alimentador 1:		
Barra N4	0,4078	0,5723
Barra N7	0,5674	2,0204
Alimentador 2:		
Barra N8	0,0000	1,4136
Barra N12	0,0000	4,4726
Alimentador 3:		
Barra N13	0,0000	0,1200
Barra N16	0,0000	0,7231

Fonte: Próprio Autor.

Assim, percebeu-se que assim como ocorrido para a rede Pici, o erro cresce à medida que as barras se afastam da subestação. Os valores de erro percentual encontrados são relativamente baixos e analisando os 3 alimentadores da rede IEEE 16 barras, o MSA apresentou menor erro percentual, apresentando valores de tensão mais próximos da tensão nominal da rede.

4.3. Tempo de iteração

O tempo de iteração é um importante indicador a ser analisado, visto que o tempo de processamento computacional é essencial para os sistemas elétricos de potência, como por exemplo, em Sistemas de Recomposição Automática (SRA), conforme foi apresentado por Oliveira Neto (2015).

O entendimento do modelo de carga é essencial para análise do tempo de processamento dos programas desenvolvidos, à medida que a modelagem da carga pode ser um fator que pode ser aplicado diretamente no programa de fluxo de potência. Como nesse trabalho os dados de carga da rede Pici foram obtidos através dos valores nominais dos terminais secundários dos transformadores, estes são representados por potência ativa e reativa. Na rede IEEE 16 barras também foram definidas as potências ativas e reativas em cada barra.

A modelagem de carga através de potência ativa e reativa é a ideal para o método de soma de potências, onde as potências de cada nó já são usadas, não sendo necessário o tratamento da mesma para o desenvolvimento do programa de cálculo de fluxo de potência. Contrariamente a isso, no método de soma de admitâncias, a carga que estava especificada por potência ativa e reativa deverá ser convertida em admitância em paralelo com uma fonte de corrente, para assim ser aplicada no fluxo de carga.

4.3.1. Rede de distribuição do campus do Pici

Analisando o tempo de processamento computacional para a Rede Pici, encontrou-se que para o método de soma de potência o tempo foi de 13 ms, enquanto que o tempo de processamento do método de soma de admitância foi igual a 30 ms. A diferença entre o tempo de processamento dos dois métodos é explicada através da modelagem da carga. Como a carga não precisa de um pré-tratamento para o método de soma de potências, o

mesmo tem um tempo de processamento menor. O oposto é a explicação para o método de soma de admitâncias. Como a carga passa por um pré-tratamento para assim ser utilizada no fluxo de potência, esse método necessita de um processamento maior.

4.3.2. Rede IEEE 16 barras

Assim como para a Rede Pici, o tempo de processamento encontrado para a rede IEEE 16 barras foi superior para o método de soma de admitâncias e inferior para o método de soma de potências. Os valores encontrados para essa rede foram 12 ms para o método de soma de potências e 16 ms para o método de soma de admitâncias. Novamente, a representação da carga e sua aplicação para o método foi o fator definidor do tempo de processamento.

4.4. Número de iterações

O número de iterações, assim como os valores nominais e o tempo de iteração, é um importante fator que deve ser levado em consideração em uma análise comparativa entre métodos e quando se deseja definir aplicações do mesmo. Quando um programa computacional apresenta um número de iterações muito alto, significa que o mesmo não está conseguindo chegar a uma solução suficientemente precisa. Para tal, no desenvolvimento deste programa, estabeleceu-se o número máximo de iterações igual a 50, ou seja, se em 50 iterações os resultados obtidos não atingissem o critério de convergência, o loop seria interrompido e os resultados obtidos no último loop seriam mostrados na tela. Em ambos os métodos o programa atingiu o critério de convergência e não foi preciso atingir ao número máximo de iterações. O critério de convergência estabelecido foi uma diferença nos valores das tensões calculados entre duas iterações inferior a 10^{-4} .

4.4.1. Rede elétrica de distribuição do campus do Pici

Para a Rede Pici, tanto o programa computacional que utiliza o método de soma de potências quanto o programa que utiliza o método de soma de admitâncias convergiram em 3 iterações, logo, pode-se afirmar que o desempenho de ambos os programas foi satisfatório e equivalente para esse parâmetro.

4.4.2. Rede IEEE 16 barras

Para análise dessa rede, deve-se analisar separadamente o número de iterações feitas pelo programa para cada alimentador. A Tabela 4.7 representa os valores encontrados para cada método.

Tabela 4.7: Número de iterações.

Alimentador	Número de Iterações	
	MSP	MSA
1	3	3
2	3	4
3	3	3

Fonte: Próprio Autor.

Analisando os valores encontrados na Tabela 4.7, observa-se que para o alimentador 1, ambos os métodos apresentaram o mesmo número de iterações, para o alimentador 2, o método de soma de admitância necessitou de uma iteração a mais para atingir o critério de convergência, e para o alimentador 3, ambos atingiram a convergência utilizando o mesmo número de iteração.

Comparando o número de iterações de ambos os métodos com o número máximo de iterações (50), percebe-se que ambos os métodos apresentaram desempenhos satisfatórios, visto que os mesmos conseguiram atingir o critério de convergência com um número de iterações relativamente baixo, mas, comparando os dois métodos, pode-se afirmar que o método de soma de potência apresentou desempenho melhor do que o método de soma de admitância, visto que para o alimentador 2 o mesmo apresentou um número de iteração menor.

4.5. Conclusões do capítulo

Neste Capítulo foi feita a análise comparativa entre os métodos de fluxo de potência através da varredura direta-inversa via soma de potências e via soma de admitâncias. Foram analisados os valores de tensões encontrados através do programa desenvolvido em *python*, o número de iterações e o tempo de processamento até atingir a convergência e mostrados os resultados. Percebeu-se que de uma maneira geral, o método de soma de potências apresentou um desempenho superior ao método de soma de admitâncias. No capítulo seguinte será apresentada a conclusão geral desse trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO GERAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho foi apresentada uma análise comparativa entre os métodos de fluxo de potência através da varredura direta-inversa utilizando soma de potências e soma de admitâncias. Foi apresentada toda a modelagem de cada método, bem como o passo a passo para execução da varredura inversa e direta. Ambos os métodos foram implementados em linguagem de programação *python* e aplicados a duas redes de distribuição com características distintas: A rede elétrica de distribuição do campus do Pici e a rede IEEE 16 barras. Com os resultados obtidos, fez-se a análise comparativa de ambos os métodos, levando em consideração os seguintes critérios: Valores de tensões encontrados, número de iterações e tempo de processamento de cada método.

Para a rede Pici, observou-se que ambos os métodos apresentaram valores de tensão considerados satisfatórios, com erros relativos à tensão nominal considerado baixo. O número de iterações necessário até atingir o critério de convergência (diferença entre os valores de tensão para duas iterações inferior a 10^{-4}) foi o mesmo tanto para o MSP quanto para o MSA, ou seja, ambos os métodos necessitaram de 3 iterações até atingir o critério de convergência. O tempo de processamento para o MSP foi inferior ao MSA, com valores de 13 ms e 30 ms, respectivamente.

Assim como a rede Pici, a rede IEEE 16 barras apresentou valores de tensão nas barras considerados satisfatórios, com erros relativos à tensão nominal considerado baixo. Percebeu-se uma igualdade nos resultados tanto para o alimentador 2 quanto para o alimentador 3, ou seja, em ambos os métodos, para esses alimentadores, os valores das tensões nas barras foram iguais, diferindo-se apenas nos ângulos. Como a Rede IEEE apresenta 3 alimentadores, o número de iterações será analisado para cada um dos alimentadores. Para o alimentador 1, ambos os métodos necessitaram de 3 iterações para atingir a convergência. Para o alimentador 2, o MSA necessitou de 4 iterações, enquanto que o MSP necessitou apenas de 3 iterações. Para o alimentador 3, novamente ambos os métodos necessitaram de 3 iterações até atingir a convergência. Logo, de uma maneira global, o MSP apresentou um desempenho superior nesse critério. Em relação ao tempo de processamento, o MSP necessitou de um tempo menor do que o MSA, com valores de 12 ms e 16 ms, respectivamente.

Analisando-se os resultados encontrados em ambas as redes, o MSP apresentou desempenho superior ao MSA, mas, tal fato não é um limitador para o uso do método de soma de admitâncias. Como os valores nominais de ambos os métodos foram considerados satisfatórios e apresentaram um número de iterações até atingir o critério de convergência muito próximos, o critério definidor para especificar qual apresentou melhor desempenho foi o tempo de processamento, mas, conforme já explicado, o mesmo foi definido pela representação da carga. Se a carga for modelada de forma diferente da apresentada nesse método, talvez os papéis possam ser invertidos e o método de soma de admitâncias possa apresentar melhor desempenho do que o método de soma de potências. A confirmação ou não de tal fato pode ser entendida como uma perspectiva futura ao desenvolvimento desse projeto, assim como a implementação do fluxo de carga para sistemas de distribuição a quatro fios, em situação de equilíbrio e desequilíbrio da rede.

Nas redes modeladas não foram considerados a presença dos componentes comumente utilizados em redes de distribuição, tais como transformadores, banco de capacitores, reguladores de tensão, etc. Como desenvolvimento futuro, pode-se considerar a utilização dos componentes normalmente encontrados em redes de distribuição, bem como a condição de desequilíbrio da rede.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. A. D. **Apostila Proteção de Sistemas Elétricos**. 2000. Natal, 2000.
- ALVES, H. N., MACHADO, R. C., **Uma Ferramenta Computacional Para Cálculo de Curto-circuito Em Redes De Distribuição Radiais Desbalanceadas**. 2010. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA). Artigo publicado no CONNEPI, 2010.
- BAPTISTA, J. E. R. **Análise probabilística das variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de baixa tensão considerando a inserção de geração distribuída fotovoltaica**. São Luís, MA, 2015.
- BORIN, V. **Algoritmo Para Cálculo De Fluxo De Potência CA Em Sistemas De Distribuição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanco Energético Nacional**. Brasília, DF, 2015.
- BROADWATER, R.P., CHANDRASEKARAM, A., HUDDLESTON, C. T., KHAN, A. H., **Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems**. Electric Power System Research, vol. 14, 1988.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE. **Redes elétricas inteligentes: contexto nacional**. Brasília, DF, 2012.
- CARVALHO, M. R. **Estudo de Técnicas Eficientes Para Resolução do Problema de Fluxo de Potência Para Sistemas de Distribuição Radial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- CHEN, T. H., CHEN, M.S., **Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 3, pp. 1146-1152, July 1991.
- CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J., YIN, H., LEE, S. S. H., **Distribution feeder reconfiguration for loss reduction**. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 3 No. 3 , 1988, Pp. 1217 – 1223.
- FONTENELE, N. R. M. **Aplicação de Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Restauração de Sistemas de Distribuição Radial de Energia Elétrica**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GUIA, M., RODRIGUES, A. B., COELHO, A., ALMEIDA, T., FRANCO, F., ALENCAR, T., BORDALO, U. A., **Uma Nova Metodologia para Cálculo Probabilístico de Curto-Circuito com Aplicações em Análise de Qualidade de Energia**. Universidade Federal do Maranhão – UFMA.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2 ed. rev. São Paulo: Blucher, 2010.

LEÃO, R. P. S. **Apostila Distribuição de Energia Elétrica**. 2014. Fortaleza, 2014.

LOPES, R. F. M. **Estudos elétricos para expansão e melhoria da rede elétrica do Campus do Pici da UFC**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MANSOUR, M. R. **Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MASHHOUR, E., MOGHADDAS-TAFRESHI, S. M., **Three-Phase Backward/Forward Power Flow Solution Considering Three-Phase Distribution Transformers**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, p. 1-7, 2009. Gippsland. Anais... Gippsland, 2009.

MONTICELLI, A. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. Ed. Edgar Blücher Ltda., 1983.

NEVES, M.S. **Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2008.

OLIVEIRA NETO, F. S. **Representação Nó-Profundidade Aplicada aos Estudos Elétricos para Recomposição da Rede de Distribuição do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

PEREIRA, D. H. **Restabelecimento De Energia em Sistemas de Distribuição de Grande Porte Considerando Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ROCHA, W. L. L. **Modelagem e Análise do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica da Ilha do Fundão Considerando Implementações de Geração Distribuída**. 2010.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – UFRJ – Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2010.

SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., SEMLYEN, A., LUO, G. X., **A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks.**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, May 1988.

SOUZA, M. M. P. **Modelagem de Cargas Para Estudos Dinâmicos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, MG, 2010.

_____, **Apostila Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.** Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade do Estado de São Paulo. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila_sdee_01. Acesso em 16/10/2016.

_____, **Apostila Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais.** Departamento de Engenharia – COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Disponível no site: [http://www.nacad.ufrj.br/~falcao/coe751/FluxoDistrib\[1\].pdf](http://www.nacad.ufrj.br/~falcao/coe751/FluxoDistrib[1].pdf). Acesso em 25/10/2016.

_____, **Plano de Ampliação e Reforços – PAR 2017-2017.** Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Disponível no site: http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao_old2.aspx. Acesso em 02/11/2016.

APÊNDICE

Tabela 1 – Valores das tensões para o fluxo de potência através do MSP para a rede Pici.

NÓ OU BARRA	TENSÃO		NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)		MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
A1	13,6984	- 0,1787	A32	13,4524	- 0,4486
A2	13,6733	- 0,2233	A33	13,4427	- 0,4587
A3	13,6596	- 0,2373	A34	13,4107	- 0,4917
A4	13,6517	- 0,2454	A35	13,4083	- 0,4925
A5	13,6466	- 0,2506	A36	13,4071	- 0,4929
A6	13,6214	- 0,2586	A37	13,4424	- 0,4589
A7	13,6174	- 0,2599	A38	13,4401	- 0,4595
A8	13,6389	- 0,2580	B1	13,6301	- 0,2674
A9	13,6116	- 0,2856	B2	13,6221	- 0,2756
A10	13,6025	- 0,2948	B3	13,6093	- 0,2887
A11	13,5989	- 0,2985	B4	13,5990	- 0,2993
A12	13,5892	- 0,3084	B5	13,5981	- 0,2996
A13	13,5576	- 0,3406	C1	13,5930	- 0,3055
A14	13,5442	- 0,3542	C2	13,5884	- 0,3102
A15	13,5212	- 0,3778	C3	13,5796	- 0,3192
A16	13,5210	- 0,3780	C4	-	-
A17	13,5100	- 0,3893	C5	-	-
A18	13,4994	- 0,4002	C6	-	-
A19	13,4807	- 0,4195	D1	13,4517	- 0,4496
A20	13,4804	- 0,4198	D2	13,4509	- 0,4504
A21	13,4749	- 0,4255	D3	13,4478	- 0,4537
A22	13,4684	- 0,4322	D4	13,4453	- 0,4563
A23	13,4622	- 0,4388	D5	13,4447	- 0,4565
A24	13,4595	- 0,4415	D6	13,4433	- 0,4584
A25	13,4556	- 0,4456	E1	13,4001	- 0,5028
A26	13,4970	- 0,4026	E2	13,3904	- 0,5130
A27	13,4879	- 0,4120	E3	13,3901	- 0,5133
A28	13,4784	- 0,4218	E4	13,3789	- 0,5249
A29	13,4701	- 0,4304	E5	13,3764	- 0,5276
A30	13,4698	- 0,4307	E6	13,3731	- 0,5310
A31	13,4647	- 0,4436	E7	13,3636	- 0,5409

NÓ OU BARRA	TENSÃO		NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)		MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
E8	13,3513	- 0,5449	-	-	-
E9	13,3273	- 0,5527	-	-	-
E10	13,3114	- 0,5579	-	-	-
E11	13,3105	- 0,5581	-	-	-
E12	13,3088	- 0,5587	-	-	-

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 2 – Valores das tensões para o fluxo de potência através do MSA para a rede Pici.

NÓ OU BARRA	TENSÃO		NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)		MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
A1	13,7881	- 0,3838	A35	13,7793	- 0,3724
A2	13,7877	-0,4314	A36	13,7778	- 0,4010
A3	13,7873	- 0,1256	A37	13,7856	- 0,0229
A4	13,7869	- 0,1546	A38	13,7699	- 0,3093
A5	13,7863	-0,4356	B1	13,7841	- 0,1718
A6	13,7857	- 0,5099	B2	13,7826	- 0,2578
A7	13,7508	- 0,6531	B3	13,7799	- 0,4182
A8	13,7352	- 0,1088	B4	13,7775	- 0,5557
A9	13,7337	- 0,1948	B5	13,7674	- 0,6423
A10	13,7232	- 0,2282	C1	13,7576	- 0,5856
A11	13,7161	- 0,6359	C2	13,7656	- 0,4568
A12	13,7124	- 0,2692	C3	13,7615	- 0,6589
A13	13,7094	- 0,3896	C4	-	-
A14	13,7016	- 0,4354	C5	-	-
A15	13,7356	- 0,5346	C6	-	-
A16	13,7854	- 0,0974	D1	13,7756	- 0,1458
A17	13,7245	- 0,1568	D2	13,7721	- 0,1896
A18	13,7852	- 0,1110	D3	13,7646	- 0,1432
A19	13,7817	- 0,3093	D4	13,7542	- 0,4896
A20	13,7799	- 0,4182	D5	13,7860	- 0,0194
A21	13,7806	- 0,3781	D6	13,7836	- 0,2005
A22	13,7791	- 0,4618	E1	13,7883	- 0,1031
A23	13,7777	- 0,5443	E2	13,7868	- 0,3546
A24	13,7768	- 0,5958	E3	13,7857	- 0,0772
A25	13,7755	- 0,6703	E4	13,7835	- 02005
A26	13,7857	- 0,5729	E5	13,7827	- 0,2521
A27	13,7848	- 0,1317	E6	13,7814	- 0,3265
A28	13,7838	- 0,1890	E7	13,7811	- 0,5125
A29	13,7828	- 0,2463	E8	13,7819	- 0,0916
A30	13,7823	- 0,2750	E9	13,7710	- 0,2864
A31	13,7821	- 0,2864	E10	13,7616	- 0,4583
A32	13,7805	- 0,3827	E11	13,7606	- 0,4755
A33	13,7812	- 0,5456	E12	13,7573	- 0,5385
A34	13,7801	- 0,3380	-	-	-

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3 – Erro relativo à tensão nominal para a todas as barras da rede Pici.

NÓ OU BARRA	ERRO (%)		NÓ OU BARRA	ERRO (%)	
	MSP	MSA		MSP	MSA
A1	0,7362	0,0862	A35	2,8384	0,1500
A2	0,9181	0,0891	A36	2,8471	0,1609
A3	1,0173	0,0920	A37	2,5913	0,1043
A4	1,0746	0,0949	A38	2,6080	0,2181
A5	1,1115	0,0993	B1	1,2312	0,1152
A6	1,2942	0,1036	B2	1,2891	0,1261
A7	1,3232	0,3565	B3	1,3819	0,1457
A8	1,1674	0,4696	B4	1,4565	0,1630
A9	1,3652	0,4804	B5	1,4630	0,2362
A10	1,4312	0,5565	C1	1,5000	0,3072
A11	1,4572	0,6080	C2	1,5333	0,2493
A12	1,5275	0,6348	C3	1,5971	0,2790
A13	1,7565	0,6565	C4	-	-
A14	1,8536	0,7130	C5	-	-
A15	2,0203	0,4667	C6	-	-
A16	2,0217	0,1058	D1	2,5239	0,1768
A17	2,1014	0,5471	D2	2,5297	0,2022
A18	2,1783	0,1072	D3	2,5522	0,2565
A19	2,3138	0,1326	D4	2,5703	0,3319
A20	2,3159	0,1457	D5	2,5746	0,1014
A21	2,3558	0,1406	D6	2,5848	0,1188
A22	2,4029	0,1514	E1	2,8978	0,0848
A23	2,4478	0,1616	E2	2,9681	0,0957
A24	2,4674	0,1681	E3	2,9703	0,1036
A25	2,4957	0,1775	E4	3,0514	0,1196
A26	2,1957	0,1036	E5	3,0696	0,1254
A27	2,2616	0,1101	E6	3,0935	0,1348
A28	2,3304	0,1174	E7	3,1623	0,1370
A29	2,3906	0,1246	E8	3,2514	0,1312
A30	2,3928	0,1283	E9	3,4253	0,2101
A31	2,4297	0,1297	E10	3,5405	0,2783
A32	2,5188	0,1413	E11	3,5471	0,2855
A33	2,5891	0,1362	E12	3,5594	0,3094
A34	2,8210	0,1442	-	-	-

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4 – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para todas as barras da rede Pici.

NÓ OU BARRA	ERRO (%) TENSÃO	DIFERENÇA ANGULAR (RAD)	NÓ OU BARRA	ERRO (%) TENSÃO	DIFERENÇA ANGULAR (RAD)
A1	0,6506	0,2051	A35	2,6924	-0,1201
A2	0,8297	0,2081	A36	2,6906	-0,0919
A3	0,9262	-0,1117	A37	2,4896	-0,4360
A4	0,9806	-0,0908	A38	2,3951	-0,1502
A5	1,0133	0,1850	B1	1,1172	-0,0956
A6	1,1918	0,2513	B2	1,1645	-0,0178
A7	0,9701	0,3932	B3	1,2380	0,1295
A8	0,7011	-0,1492	B4	1,2956	0,2564
A9	0,8891	-0,0908	B5	1,2297	0,3427
A10	0,8795	-0,0666	C1	1,1964	0,2801
A11	0,8545	0,3374	C2	1,2873	0,1466
A12	0,8985	-0,0392	C3	1,3218	0,3397
A13	1,1073	0,0490	C4	-	-
A14	1,1488	0,0812	C5	-	-
A15	1,5609	0,1568	C6	-	-
A16	1,9180	-0,2806	D1	2,3513	-0,3038
A17	1,5629	-0,2325	D2	2,3323	-0,2608
A18	2,0732	-0,2892	D3	2,3016	-0,3105
A19	2,1841	-0,1102	D4	2,2459	0,0333
A20	2,1735	-0,0016	D5	2,4757	-0,4371
A21	2,2183	-0,0474	D6	2,4689	-0,2579
A22	2,2549	0,0296	E1	2,8154	-0,3997
A23	2,2899	0,1055	E2	2,8752	-0,1584
A24	2,3031	0,1543	E3	2,8696	-0,4361
A25	2,3222	0,2247	E4	2,9354	-0,3244
A26	2,0942	0,1703	E5	2,9479	-0,2755
A27	2,1538	-0,2803	E6	2,9627	-0,2045
A28	2,2156	-0,2328	E7	3,0295	-0,0284
A29	2,2688	-0,1841	E8	3,1244	-0,4533
A30	2,2674	-0,1557	E9	3,2220	-0,2663
A31	2,3030	-0,1572	E10	3,2714	-0,0996
A32	2,3809	-0,0659	E11	3,2709	-0,0826
A33	2,4562	0,0869	E12	3,2600	-0,0202
A34	2,6807	-0,1537	-	-	-

Tabela 5 – Erro relativo ao MSA para todas as barras da rede Pici.

NÓ OU BARRA	ERRO (%) TENSÃO	NÓ OU BARRA	ERRO (%) TENSÃO
A1	0,6500	A35	2,6884
A2	0,8290	A36	2,6862
A3	0,9254	A37	2,4870
A4	0,9797	A38	2,3899
A5	1,0123	B1	1,1159
A6	1,1906	B2	1,1630
A7	0,9667	B3	1,2362
A8	0,6978	B4	1,2935
A9	0,8848	B5	1,2268
A10	0,8746	C1	1,1928
A11	0,8493	C2	1,2841
A12	0,8928	C3	1,3181
A13	1,1000	C4	-
A14	1,1406	C5	-
A15	1,5536	C6	-
A16	1,9159	D1	2,3471
A17	1,5543	D2	2,3275
A18	2,0710	D3	2,2957
A19	2,1812	D4	2,2384
A20	2,1703	D5	2,4732
A21	2,2152	D6	2,4659
A22	2,2514	E1	2,8130
A23	2,2862	E2	2,8725
A24	2,2993	E3	2,8667
A25	2,3181	E4	2,9319
A26	2,0920	E5	2,9442
A27	2,1514	E6	2,9587
A28	2,2130	E7	3,0254
A29	2,2659	E8	3,1203
A30	2,2645	E9	3,2152
A31	2,3000	E10	3,2623
A32	2,3775	E11	3,2616
A33	2,4529	E12	3,2500
A34	2,6768	-	-

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6 – Valores das tensões encontradas com método de varredura direta-inversa usando soma de potências para a rede IEEE 16 barras.

ALIMENTADOR 1		
NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
N4	22,8900	- 0,2241
N5	22,8596	- 0,3153
N6	22,8500	- 0,3235
N7	22,8215	- 0,3482
ALIMENTADOR 2		
NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
N8	22,8267	- 0,4364
N9	22,7464	- 0,7828
N10	22,8064	- 0,4508
N11	22,7481	- 0,8136
N12	22,7311	- 0,9704
ALIMENTADOR 3		
NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
N13	22,9473	- 0,1550
N14	22,9535	- 0,2110
N15	22,9094	- 0,2386
N16	22,8918	- 0,3082

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 7 – Valores das tensões encontradas com método de varredura direta-inversa usando soma de admitâncias para a rede IEEE 16 barras.

ALIMENTADOR 1		
NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
N4	22,9838	- 0,7964
N5	22,9679	- 1,5469
N6	22,9679	- 1,5469
N7	22,9520	- 2,3686
ALIMENTADOR 2		
NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
N8	22,8267	- 1,8500
N9	22,7464	- 3,6669
N10	22,8064	- 3,6669
N11	22,7481	- 5,4430
N12	22,7311	- 5,4430
ALIMENTADOR 3		
NÓ OU BARRA	TENSÃO	
	MÓDULO (kV)	ÂNGULO (rad)
N13	22,9473	- 0,0340
N14	22,9535	- 0,6875
N15	22,9094	- 0,6875
N16	22,8918	- 1,0313

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 8 – Erro percentual relativo à tensão nominal para a rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Erro (%)	
	MSP	MSA
Alimentador 1:		
Barra N4	0,4783	0,0704
Barra N5	0,6104	0,1396
Barra N6	0,6522	0,1396
Barra N7	0,7761	0,2087
Alimentador 2:		
Barra N8	0,7535	0,7535
Barra N9	1,1026	1,1026
Barra N10	0,8417	0,8417
Barra N11	1,0952	1,0952
Barra N12	1,1691	1,1691
Alimentador 3:		
Barra N13	0,2291	0,2291
Barra N14	0,2022	0,2022
Barra N15	0,3939	0,3939
Barra N16	0,4704	0,4704

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 9 – Erro absoluto do MSP relativo ao MSA para a rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Erro (%)	Diferença Angular (rad)
Alimentador 1:		
Barra N4	0,4081	0,5723
Barra N5	0,4715	1,2316
Barra N6	0,5133	1,2234
Barra N7	0,5686	2,0204
Alimentador 2:		
Barra N8	0,0000	1,4136
Barra N9	0,0000	2,8841
Barra N10	0,0000	3,2161
Barra N11	0,0000	4,6294
Barra N12	0,0000	4,4726
Alimentador 3:		
Barra N13	0,0000	0,1210
Barra N14	0,0000	0,4765
Barra N15	0,0000	0,4489
Barra N16	0,0000	0,7231

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 10 – Erro relativo ao MSA para a rede IEEE 16 barras.

Alimentadores	Erro (%) Tensão
Alimentador 1:	
Barra N4	0,4078
Barra N5	0,4709
Barra N6	0,5126
Barra N7	0,5674
Alimentador 2:	
Barra N8	0,0000
Barra N9	0,0000
Barra N10	0,0000
Barra N11	0,0000
Barra N12	0,0000
Alimentador 3:	
Barra N13	0,0000
Barra N14	0,0000
Barra N15	0,0000
Barra N16	0,0000

Fonte: Próprio Autor.