



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ELTON DA SILVA FREITAS

**MÉTODO UNIFICADO DE ANÁLISE DE FALTAS E FLUXO DE  
CARGA EM MICRORREDES NÃO ISOLADAS**

MOSSORÓ

2023

ELTON DA SILVA FREITAS

**MÉTODO UNIFICADO DE ANÁLISE DE FALTAS E FLUXO DE  
CARGA EM MICRORREDES NÃO ISOLADAS**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas elétricos

Orientador: Ednardo Pereira da Rocha, Prof. Dr.

Co-orientador: Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F862m Freitas, Elton da Silva.  
Método unificado de análise de faltas e fluxo  
de carga em microrredes não isoladas / Elton da  
Silva Freitas. - 2023.  
76 f. : il.

Orientador: Ednardo Pereira da Rocha.  
Coorientador: Adriano Aron Freitas de Moura.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica, 2023.

1. método unificado. 2. fontes iterativas de  
corrente. 3. microrredes. I. da Rocha, Ednardo  
Pereira, orient. II. de Moura, Adriano Aron  
Freitas, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ELTON DA SILVA FREITAS

MÉTODO UNIFICADO DE ANÁLISE DE FALTAS E FLUXO DE CARGA EM  
MICRORREDES NÃO ISOLADAS

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas elétricos.

Defendida em: 28 / 02 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Ednardo Pereira da Rocha, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

---

Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

---

Victor de Paula Brandão Aguiar, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

---

Juliano Costa Leal da Silva, Prof. Dr. (IFRN)  
Membro Examinador

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao criador de todas as coisas, Deus, que me mantém forte e me faz acreditar que é possível chegar ao impossível, me dando sabedoria, coragem, e me sustentando nos momentos mais difíceis da jornada da vida.

Agradeço a minha mãe, Maria José da Silva por me permitir viver momentos nunca antes imaginados, tornando possível chegar a realizações e conquistas, mesmo que para isso tenha inúmeras vezes abdicado das suas oportunidades sem nem mesmo pensar que um dia, para que, nesses mapas do acaso da vida, tenha me permitido chegar aqui. Ao meu pai, mesmo não estando entre nós fisicamente há 25 anos, mas se mantém dos céus, intercedendo e torcendo por mim.

Agradeço a minha família, nas pessoas de Ester Louise de Souza Freitas, minha pequena filha que veio ao mundo para ser um dos mais valiosos propósitos da minha vida e me fazer forte para vê-la crescer e render bons frutos e orgulho. A Letícia Maria de Souza Freitas, minha esposa, que me acompanha nessa caminhada e é forte refúgio durante a rotina diária pesada e cansativa, entre trabalho profissional, família, casa e estudos.

Agradeço ao meu orientador, professor Ednardo Pereira da Rocha, que mais uma vez me acolheu, agora durante este curso, e me apresentou uma oportunidade imensa de poder chegar ao título de mestre, através da calma e serenidade de quem acredita e sempre acreditou no meu potencial, além dos ensinamentos, conselhos, sugestões, toda ajuda e disponibilidade contínua. Ao senhor minha total admiração e respeito, pelo profissional que é e grande ser humano.

Agradeço ao meu co-orientador, professor Adriano Aron Freitas de Moura, pelo acompanhamento e cuidados durante esta jornada, além dos ensinamentos, paciência e compreensão nesses dois anos. Também pela oportunidade de poder desenvolver e colaborar imensamente no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus Amigos, desde os mais próximos, aos mais distantes fisicamente, por direta e indiretamente terem contribuído durante esta caminhada.

## RESUMO

Tradicionalmente, a análise de faltas é realizada usando um método diferente daquele usado para análise de fluxo de carga em sistemas elétricos de potência que envolvam também a utilização de microrredes. No entanto, o desenvolvimento de um método que realiza os dois estudos juntos usando a técnica de varredura *backward/forward* não foi desenvolvido. O projeto abordado neste trabalho demonstra que as análises de faltas e fluxo de carga podem ser unificadas inserindo fontes de corrente na técnica tradicional de varredura *backward/forward*, usada para análise de fluxo de carga. A modelagem é equacionada em componentes de fase. Os resultados do novo método são validados pela comparação dos resultados da microrrede de 30 nós obtidos com o programa de análise de faltas simultâneas (ANAFAS), do centro de pesquisas de energia elétrica (CEPEL), e, também, com os resultados do pacote de análise de distribuição radial (RDAP)/*Milsoft Engineering Analysis* (WindMil®) através dos resultados com alimentadores para testes IEEE 13 e IEEE 123 barras. Este novo método tem potencial para aplicações em estudos de faltas e fluxo de carga em microrredes não isoladas conectadas à rede elétrica por ser simples, preciso e permitir que os engenheiros da indústria de energia elétrica desenvolvam um programa comercial de baixo custo capaz de realizar os dois estudos.

**Palavras-chave:** método unificado; fontes iterativas de corrente; microrredes.

## ABSTRACT

Traditionally, fault analysis is performed using a method different from that used for load flow analysis in electrical power systems that also involve the use of microgrids. However, the development of a method that performs the two studies together using the backward/forward scanning technique has not been developed. The project addressed in this work demonstrates that fault and load flow analyzes can be unified by inserting current sources in the traditional backward/forward sweep technique, used for load flow analysis. The modeling is equated into phase components. The results of the new method are validated by comparing the results of the 30-node micronetwork obtained with the simultaneous fault analysis program (ANAFAS), from the electrical energy research center (CEPEL), and also with the results of the radial distribution analysis (RDAP)/Milsoft Engineering Analysis (WindMil®) through the results with feeders for IEEE 13 and IEEE 123 tests. This new method has potential for applications in studies of faults and load flow in microgrids connected to the electrical grid because it is simple, accurate and allows engineers in the electrical energy industry to develop a low-cost commercial program capable of performing both studies.

**Keywords:** unified method; current iterative sources; microgrids.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de um SEP.....	18
Figura 2 - Estudo de fluxo de carga/potência com indicativos de direção dos fluxos. ....	19
Figura 3 - Modelo de linha de distribuição.....	23
Figura 4 - Modelo geral de linha de rede de distribuição.....	25
Figura 5 - Fluxograma do método <i>backward/forward</i> por soma das correntes .....	26
Figura 6 - Modelo geral de linha de rede de distribuição para Soma de potência.....	27
Figura 7 - Fluxograma para aplicação do algoritmo para o fluxo de cargas para o método por soma de potência .....	28
Figura 8 - Interface do software apresentando sistema exemplo do ANAFAS. ....	34
Figura 9 - PSS@SINCAL - interface gráfica do usuário modelo de rede .....	35
Figura 10 - Interface gráfica do usuário com caso simples simulador PWS.....	36
Figura 11 – Configuração típica de uma microrrede.....	38
Figura 12 – Topologia de aerogeradores do tipo 1.....	41
Figura 13 - Topologia de aerogeradores do tipo 2.....	41
Figura 14 - Topologia de aerogeradores do tipo 3.....	42
Figura 15 - Modelo I.....	42
Figura 16 - Topologia de aerogeradores do tipo 4.....	43
Figura 17 - Modelo II. ....	44
Figura 18 - Modelo de linha de distribuição com fontes iterativas de corrente. ....	46
Figura 19 - Falta para circuito simples monofásico-terra.....	48
Figura 20 - Falta para circuito simples monofásico-terra.....	50
Figura 21 - Circuito para falta trifásica-terra.....	51
Figura 22 – Circuito para falta bifásica. ....	53
Figura 23 –Circuito para falta trifásica.....	54
Figura 24 – Fluxograma para o método proposto.....	56
Figura 25 - Diagrama da microrrede MG-30.....	59
Figura 26 – Diagrama do alimentador de teste IEEE 13 barras. ....	61
Figura 27 - Diagrama do alimentador de teste IEEE 123 barras. ....	61
Figura 28 – Resultados das aplicações do método em comparação com os dados apresentados por IEEE (2011) para o alimentador de teste IEEE 123 barras. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das correntes de falta para os cinco tipos de faltas nas barras 2, 10 e 27. .....	59
Tabela 2 – Resultados das correntes de curto para o tipo de falta monofásica no alimentador de teste IEEE 13 barras .....	62
Tabela 3 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta bifásica no alimentador de teste IEEE 13 barras para o novo método.....	63
Tabela 4 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta bifásica no alimentador de teste IEEE 13 barras para o método WindMil®. ....	63
Tabela 5 - Erro percentual oriundo do comparativo entre valores das tabelas 03 e 04. ....	64
Tabela 6 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta bifásica-terra no alimentador de teste IEEE 13 barras para o novo método.....	64
Tabela 7 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta bifásica-terra no alimentador de teste IEEE 13 barras para o método WindMil®. ....	65
Tabela 8 - Erro percentual oriundo do comparativo entre valores das tabelas 06 e 07.....	65
Tabela 9 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta trifásica no alimentador de teste IEEE 13 barras.....	66
Tabela 10 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta trifásica-terra no alimentador de teste IEEE 13 barras.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS	Análise de faltas simultâneas
Aneel	Agência Nacional de energia elétrica
CEPEL	Centro de pesquisa de energia elétrica
EPE	Empresa de pesquisa energética
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IBDG	Geração distribuída baseada em inversores
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PSS® SINCAL	<i>Software</i> de simulação para análise e planejamento de todos os tipos de redes
PWS	Simulador <i>PowerWorld</i>
RDAP	Pacote de análise de redes de distribuição
SEP	Sistemas elétricos de potência
SIN	Sistema interligado nacional
STATCOM	Sistemas de energia com compensador síncrono estático
TI	Tecnologia da informação
UFLF	Método unificado para fluxo de carga e curto circuito
WMDS	Sistema de diagnóstico e monitoramento

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Objetivos geral e específicos .....	15
1.1.1. Geral .....	15
1.1.2. Específicos .....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO/REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1. Métodos tradicionais de fluxo de carga.....	20
2.1.1. Método de Gauss .....	20
2.1.1.1. Método de Gauss-Seidel.....	20
2.1.2. Método de Newton-Raphson .....	21
2.1.3. Método da técnica de varredura de passos <i>Backward/Forward</i> .....	22
2.1.3.1. Método da técnica de varredura de passos <i>Backward/Forward</i> – Soma das correntes..	24
2.1.3.2. Método da técnica de varredura de passos <i>Backward/Forward</i> – Soma de potência .	26
2.2. Análise de Faltas.....	28
2.2.1. Análise de faltas via componentes simétricas .....	29
2.2.2. Análise de faltas via componentes de fase .....	30
2.2.3. Análise de trabalhos desenvolvidos.....	31
2.3. <i>Softwares</i> desenvolvidos com base nos métodos tradicionais de fluxo de carga e análise de faltas.....	33
2.3.1. Análise de faltas simultâneas (ANAFAS).....	33
2.3.2. <i>Software</i> de simulação para análise e planejamento de redes de energia em todos os níveis de tensão. ....	34
2.3.3. Simulador <i>PowerWorld</i> (PWS) .....	35
2.4. Microrredes.....	37
2.4.1. Impedância equivalente de um parque eólico para análise de curto-circuito.....	39
2.4.1.1. Modelo I .....	40
2.4.1.2. Modelo II.....	43

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1. Definição matemática de equações base.....	46
3.1. Falta monofásica-terra.....	48
3.2. Falta bifásica-terra.....	49
3.3. Falta trifásica-terra.....	51
3.4. Falta bifásica.....	52
3.5. Falta trifásica.....	54
4. RESULTADOS.....	58
4.1. Resultados para a microrrede rural MG-30.....	58
4.2. Resultados para os alimentadores de teste 13 e 123 barras IEEE.....	60
4.3. Resultados da análise da falta fase-terra para o alimentador de teste IEEE 13 barras.....	62
4.4. Resultados da análise da falta bifásica para o alimentador de teste IEEE 13 barras.....	63
4.5. Resultados da análise da falta bifásica-terra para o alimentador de teste IEEE 13 barras.....	64
4.6. Resultados da análise da falta trifásica para o alimentador de teste IEEE 13 barras.....	66
4.7. Resultados da análise da falta trifásica-terra para o alimentador de teste IEEE 13 barras.....	66
4.8. Resultados da análise das faltas fase-terra e trifásica-terra para o alimentador de teste IEEE 123 barras.....	67
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	69
5.1. Considerações finais.....	69
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	70
REFERÊNCIAS.....	71

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica, nos dias atuais, é elemento imprescindível para as atividades cotidianas nas mais variadas esferas da vida humana, como recurso fundamental para o desenvolvimento econômico de um país, além de promover a satisfação e bem-estar da sociedade. Assim sendo, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP), constituintes e vitais nas fases de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica precisam garantir a plenitude e confiabilidade na continuidade do seu fornecimento em alto nível de qualidade (SILVA, 2003).

Grandes sistemas interligados, com grande quantidade de componentes como usinas, linhas de transmissão, subestações e tantos outros equipamentos podem ter grandes problemas com falhas em alguns componentes que podem levar a grandes desligamentos com impactos econômicos e sociais de graves consequências dada a dependência da energia elétrica, permanentemente e em todas as atividades. O planejamento, a operação e a manutenção têm, assim, fundamental importância para o funcionamento e desempenho dos sistemas elétricos. Dada a dimensão e a complexidade destes sistemas, a única forma prática de efetuar análises completas e efetivas é com a utilização de programas computacionais de grande porte utilizando modelos matemáticos dos diversos equipamentos utilizados nos sistemas elétricos atuais (BICHELS, 2018).

Contudo, há, de forma quase inevitável, a ocorrência de interrupções no fornecimento da energia elétrica devido a faltas, que podem ocorrer em qualquer das fases de um SEP, causadas por distintos fenômenos eletromagnéticos, como falhas em equipamentos, descargas atmosféricas e outros fatores externos, tais como vegetação em contato com as linhas de transmissão, vento e queimadas (SILVA, 2003; OLIVEIRA, 2016).

Bichels (2018), ainda relata que um SEP bem planejado deve atender três aspectos básicos: primeiramente deve ter uma adequada operação em condição normal, de forma que não ocorram interrupções do fornecimento, curtos-circuitos ou desligamentos. Em segundo lugar está a prevenção de falhas, o que implica em haver uma boa manutenção de equipamentos e instalações e a reposição de equipamentos deteriorados e desgastados. Em terceiro vem a mitigação dos efeitos de falhas de forma que as consequências sejam nulas ou mínimas, evitando que se alastrem por todo o sistema levando a grandes interrupções (*blackouts*) com graves consequências. A garantia de bom funcionamento de um SEP se tem com planejamento, construção, operação e manutenção adequados de forma a se ter a melhor relação custo-benefício de atendimento às cargas, consumidores considerando um critério de atendimento

predeterminado, pois, confiabilidade total (garantia absoluta de que não haverá desligamentos) não há, dentro de um custo razoável para a energia, já que para aumentar a confiabilidade do suprimento há necessidade de mais e maiores instalações e equipamentos com, conseqüentemente, maiores investimentos e custos.

O constante aumento na demanda, sem o correspondente aumento na capacidade de geração e transmissão de energia elétrica, tem levado os sistemas de potência a operarem cada vez mais próximos dos seus limites. Este fato torna indispensável o uso de ferramentas de apoio à operação, capazes de aumentar a confiabilidade do sistema, reduzindo o número e/ou duração de paradas não programadas das instalações.

Com isso, Bichels (2018), relata que nesta primeira década do século XXI, descortina-se uma série de mudanças na geração e no consumo de energia elétrica, com novas formas de geração, como a eólica e a solar, e também em menor escala e distribuída, e com o consumo focado em maior eficiência e controle, com a evolução e implantação das redes inteligentes (*smart grids*). Por conseguinte, a difusão da instalação de microrredes, que são compostas pela associação de uma ou mais fontes de energia alimentando as cargas, vem crescendo gradativamente e, como consequência, trouxe novos desafios para a monitoração, controle e proteção do sistema elétrico e também do funcionamento interno das microrredes (CARDOSO JUNIOR, 2004; PINHEIRO, 2018).

Em microrredes, o cálculo da corrente de falta é um tema específico que recebe muita atenção dada a grande importância para o setor de energia elétrica. Essa importância se justifica pelo fato do cálculo da corrente de falta anteceder os estudos de proteção nas microrredes, sendo fundamental para basear a parametrização dos equipamentos de proteção do sistema. Outro estudo de grande relevância é o fluxo de carga, essencial para o planejamento da operação das microrredes, sendo utilizado para a análise de sistemas existentes (operação de sistemas), verificando-se a possibilidade de suprir as cargas em condições normais e as ações corretivas no caso de falhas que venham a ocorrer em algum equipamento do sistema, ou de sistemas futuros (planejamento de sistemas), determinando-se os novos componentes a adicionar ao sistema para que este possa atender as cargas futuras (BICHELS, 2018).

Comumente, para calcular as correntes de curto-circuito, são usados métodos das componentes simétricas e de componentes de fase. Como exemplos, cita-se o programa de análise de faltas simultâneas (ANAFAS) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), o *software* de simulação para análise e planejamento de todos os tipos de redes (PSS® SINICAL) e Simulador *PowerWorld* (PWS). Estes usam o método de componentes simétricas para o

cálculo de curto-circuito e o pacote de análise de distribuição radial (RDAP)/*Milsoft Engineering Analysis* (WindMil®) usa um método de componentes de fase para o cálculo das correntes de falta.

O PWS utiliza o método base de Newton-Raphson com métodos desacoplados rápidos e PSS® SINCAL usa métodos de iteração atual e Newton-Raphson para cálculos de fluxo de carga, enquanto o RDAP / WindMil® é programado usando a técnica de varredura de passos *backward/forward*.

Assim, diferentes métodos são utilizados para realizar estudos de curto-circuito e fluxo de carga. Portanto, esses programas comerciais requerem a implementação de várias rotinas computacionais para a realização dos estudos mencionados e, conseqüentemente, os custos são mais elevados. Além disso, programas computacionais que usam o método tradicional de componentes simétricas não são devidamente adequados para o cálculo de curto-circuito em uma microrrede inerentemente desequilibrada (KERSTING, 2017).

Neste projeto de pesquisa, pretende-se demonstrar um novo método denominado método unificado de análise de falta e fluxo de carga em microrredes não isoladas, que poderá realizar estudos de cálculo de corrente de curto-circuito e fluxo de carga usando a técnica de varredura de passos *backward/forward* tradicional e fontes de corrente iterativas.

## **1.1. Objetivos geral e específicos**

Os objetivos do trabalho são apresentados em geral e específicos, nos itens 1.1.1 e 1.1.2.

### **1.1.1. Geral**

Desenvolver um novo método capaz de realizar estudos de análise de falta e fluxo de carga, unificadamente, com a utilização de fontes iterativas de corrente auxiliando no emprego da técnica de varredura de passos *backward/forward*.

### **1.1.2. Específicos**

- Realizar estudo e pesquisa do estado da arte, para embasamento do trabalho;
- Desenvolver equações características aplicadas a cada tipo de falta analisada com o método proposto;

- Obter dados padrões para confrontar e validar os resultados oriundos da aplicação do método proposto;
- Modelar e simular circuito de barras afim de projetar situações de estudo;
- Implementar algoritmo com equações matemáticas definidas pelo método proposto;

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO/REVISÃO DA LITERATURA

O papel crucial dos SEP na transmissão e distribuição da energia elétrica e na implementação das políticas energéticas dos países levou à formação dos grandes sistemas elétricos atuais, em que os elementos básicos foram grandes usinas, hidrelétricas, termelétricas e nucleares, e grandes centros de carga distantes das gerações. Nesta fase foi necessário identificar e solucionar as principais barreiras ao aumento da capacidade de transmissão a grandes distâncias e ao desenvolvimento e aplicação de novos métodos e ferramentas de análise e solução dos problemas inerentes ao planejamento, operação e manutenção destes sistemas.

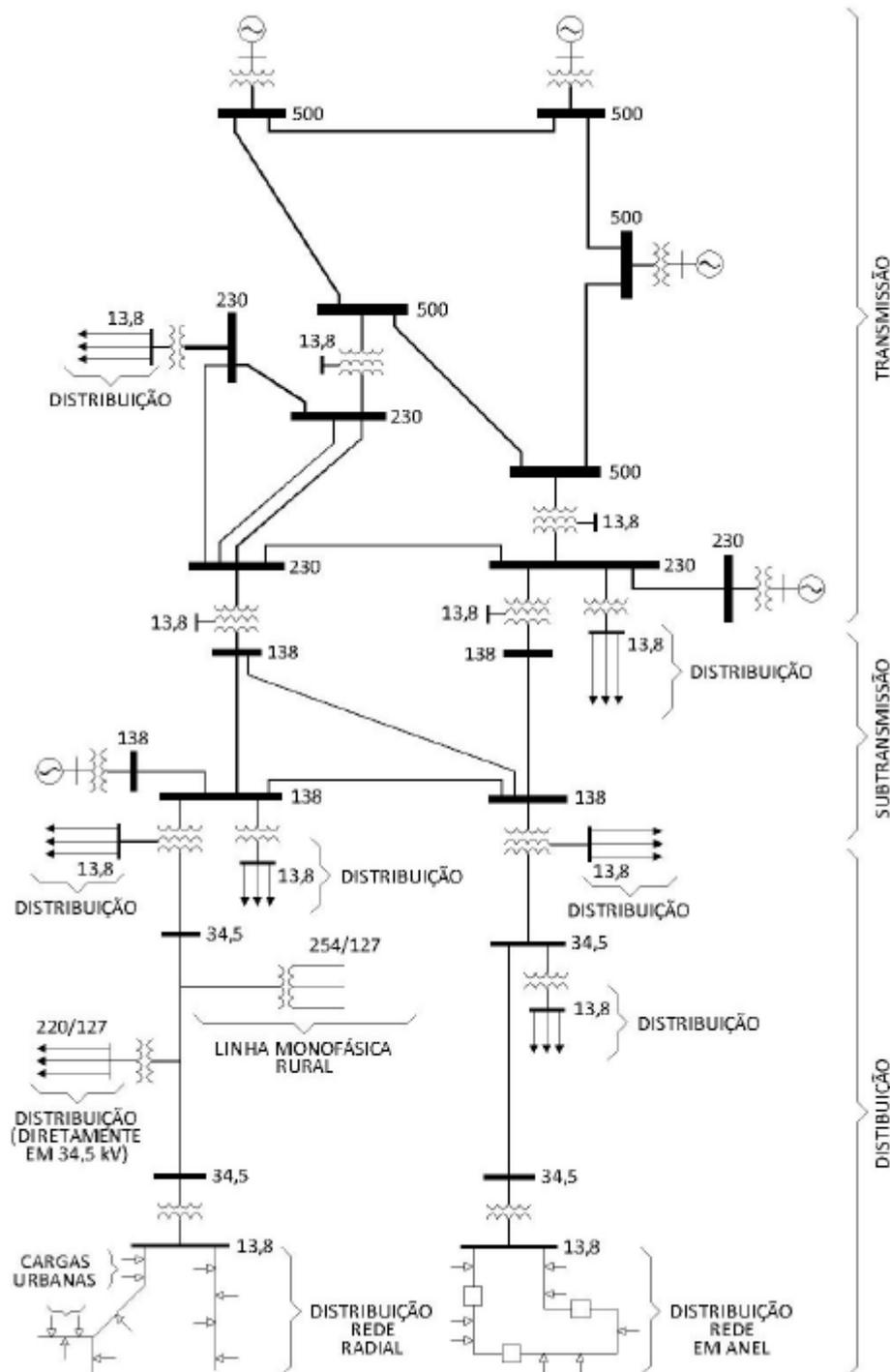
De acordo com Bichels (2018), há alguns elementos cruciais para a operação e controle dos SEPs:

A operação do sistema, normalmente feita por uma entidade independente e em nível nacional – como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no Brasil – deve estar adequada e preparada para atender a esta evolução de tecnologias e ao crescimento constante dos sistemas de forma a: a) garantir a segurança da operação; b) garantir a eficiência da operação, com a adequada seleção das fontes de geração e a consideração e a otimização do carregamento do sistema de transmissão; c) garantir a confiabilidade do sistema de transmissão no atendimento às cargas; d) coordenar as ações de manutenção.

Para apresentar a topologia dos sistemas elétricos de potência e as conexões entre os vários equipamentos são utilizados diagramas unifilares – pois os SEP são simétricos e equilibrados – utilizando-se símbolos gráficos originando os diagramas esquemáticos que podem ser vistos na ilustração apresentada na figura 1 (BICHELS, 2018).

Um sistema elétrico de potência abrange ainda as etapas de geração, subtransmissão e consumo. Em todas essas etapas, existem diversos pontos que buscam continuamente soluções para melhorias e aperfeiçoamento, através de variados artifícios até mesmo nas fases de planejamento, para quesitos como otimização de operação, estabilidade, controle e supervisão, segundo Barbosa (1995), através de estudos de fluxo de carga. Entres esses artifícios estão os métodos de fluxo de carga que predominam nos estudos.

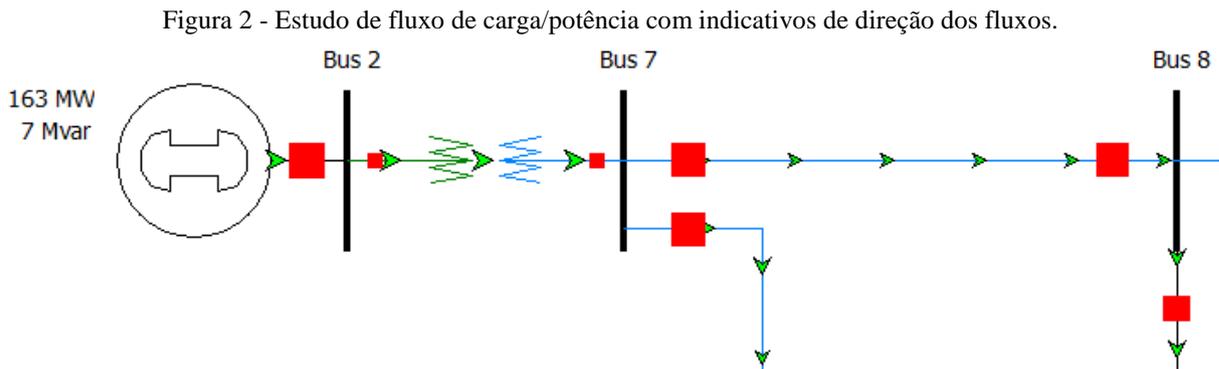
Figura 1 - Diagrama esquemático de um SEP



Fonte: Bichels, 2018.

O cálculo de fluxo de potência pode oferecer informações importantes sobre o impacto dos geradores na rede elétrica, como por exemplo, na qualidade de tensão, perdas e eficiência global do sistema, sentido dos fluxos de potência, como ilustra a figura 2, e intercâmbio com a rede externa (MASSIGNAN et al., 2016). Guimarães (2021), diz que o objetivo do estudo do cálculo de fluxo de potência é resolver a rede elétrica trifásica equilibrada sob determinadas

condições de operação. A solução desse problema é obtida tomando como conhecidos os parâmetros da rede, as potências ativas geradas nas usinas (despacho de potência ativa) e as cargas (consumo). Com isso, os fasores de tensão (módulo e ângulo) podem ser determinados. Sabendo-se os fasores de tensão, todas as outras variáveis de interesse da rede elétrica podem ser encontradas.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Além disso, o fluxo de potência em redes elétricas de alta tensão serve principalmente para os engenheiros de planejamento estudar as diversas alternativas de expansão do sistema elétrico no futuro, pois, com o aumento da demanda de energia elétrica associada ao seu crescimento, ampliações e reforços serão necessários. Dentre as alternativas de expansão podemos citar a construção de novas linhas de transmissão, usinas, subestações, etc., que devem ter suas obras iniciadas com antecedência suficiente para que as mesmas sejam concluídas em tempo hábil para o atendimento da demanda futura de energia elétrica. O estudo também pode ser utilizado como base para os engenheiros de planejamento da operação encontrar condições de despacho de potência nas usinas geradoras de energia elétrica para atendimento da demanda em situação de emergência, sem que sejam violadas as condições operativas do sistema, para garantir tanto a sua segurança como a qualidade do serviço prestado (GUIMARÃES, 2021).

A análise de faltas, também conhecida como análise de curto-circuito, é imprescindível tanto no âmbito de planejamento quanto na operação de um sistema elétrico de potência. O resultado proveniente dessa análise é necessário para projetar, por exemplo, o sistema de relés de proteção adequado e determinar os requisitos de interrupção de disjuntores em cada local do sistema (RUBACK, 2016).

## 2.1. Métodos tradicionais de fluxo de carga

Neste tópico serão apresentadas breves descrições dos métodos tradicionais existentes na literatura que abordam a análise de fluxo de carga em sistemas trifásicos que, basicamente e comumente, resumem-se aos métodos de Gauss e de Newton-Raphson com suas respectivas variações, em que aborda o método da técnica de varredura de passos *backward/forward*. Geralmente os critérios de escolha do usuário em relação a adoção de um dos métodos obedece, ou deve obedecer, sistematicamente, ao seu desempenho no que diz respeito ao tempo de convergência e processamento, aliados principalmente a precisão dos resultados apresentados, e não menos importante, a sua flexibilidade mediante a possibilidade de desenvolver e incrementar novos métodos de análise.

### 2.1.1. Método de Gauss

Barbosa (1995) destaca que o método de Gauss ganhou destaque por volta da década de 60 entre os métodos de estudo de fluxo de potência praticados à época. Todos esses métodos baseados em iterações e varreduras sucessivas, juntamente com sua variação Gauss-Seidel que passou a predominar em sua denominação. Ambos os métodos abordam soluções para sistemas predominantemente formados por equações de fluxo de carga não-lineares.

Entre os trabalhos atuais que fazem uso do método de Gauss, Verma e Sarkar (2019) utilizaram o método de Gauss com um algoritmo computacionalmente eficiente e generalizado para o cálculo do fluxo utilizando o conceito de iterações de barramento Gauss-Z, onde os barramentos de geração distribuída são modelados por meio da técnica de compensação potência/corrente.

#### 2.1.1.1. Método de Gauss-Seidel

O método de Gauss-Seidel é essencial para solucionar sistemas com conjunto de equações não lineares para duas variáveis desconhecidas em cada nó, e está dividido em dois tipos: o indireto e o direto.

Pizzali (2003) diz que o método de Gauss-Seidel direto é mais confiável, pois dificilmente diverge. Além disso, embora as tensões apresentem convergência de oscilações maiores do que no método indireto, o processo global converge muito mais rápido. Também, é

menos dependente do tamanho do sistema. Isto acontece por que a matriz de impedância de nós (matriz  $Z$ ) é cheia e fornece um bom acoplamento matemático entre as tensões de barras, isto é, uma melhoria no valor de uma tensão (na média e baixa tensão) afeta imediatamente o cálculo das próximas tensões. No entanto, a principal desvantagem é a grande necessidade de memória computacional requerida para armazenar explicitamente a matriz  $Z$  e o grande tempo de processamento para sua obtenção. Este problema pode ser solucionado armazenando a matriz  $Y$  e invertendo-a em cada iteração para obter a matriz  $Z$ . Isto reduz significativamente a quantidade de memória, mas ao mesmo tempo, produz um grande aumento na carga computacional.

No tipo indireto nota-se uma relativa insensibilidade às tensões iniciais estimadas, além do baixo requerimento de memória computacional (a Matriz de Admitâncias nodal  $Y$  é muito esparsa devido à configuração radial do sistema em estudo) e sua simples programação. No entanto, sua lenta convergência, quando aplicado em sistemas radiais, o faz pouco atrativo. Esta lentidão deve-se principalmente ao não aproveitamento da natureza esparsa da matriz  $Y$ . A característica radial dos sistemas faz com que os valores da diagonal da matriz  $Y$  sejam pequenos. Logo, como o perfil de tensões da próxima iteração é inversamente proporcional a tais valores, dessa forma, serão produzidas grandes oscilações da tensão tornando lenta a convergência (PIZZALI, 2003). Moura, Moura e Rocha (2018) relatam ainda que no método de Gauss-Seidel, assim que um valor é calculado, ele substitui o da iteração anterior. A esta técnica denomina-se substituição sucessiva. Assim, além de apresentar maior rapidez de convergência, ele ainda economiza memória (não necessita do vetor com as tensões anteriores).

### **2.1.2. Método de Newton-Raphson**

O método de Newton-Raphson teve sua primeira versão denominada de Método de Eliminação para solução de fluxo de potência, devido ao seu desenvolvimento ter surgido como uma evolução que foi capaz de solucionar alguns problemas identificados no método de Gauss-Seidel (BARBOSA, 1995). Neste método a convergência ganhou velocidade e passou a preferir o método de Gauss-Seidel, com versões que se distinguiram entre o método de Newton-Raphson completo e o desacoplado, e tornou-se superior para sistemas de pequeno porte, porém a medida que os requisitos de memória e o tempo de computação cresciam rapidamente com o tamanho do sistema, foi tornando-se insuficiente para sistemas de grande porte.

No método de Newton-Raphson completo é abordado um algoritmo capaz de ser aplicado tanto para equações na forma de coordenadas retangulares, como também na forma de coordenadas polares (ZAGO, 1992). Barbosa (1995) aborda que o método é uma aplicação formal de um algoritmo geral para a solução de equações não lineares e constitui-se de soluções sucessivas do sistema de equações. Ainda de acordo com Zago (1992), este método possui boas características de convergência e confiabilidade, assim como grande flexibilidade para a representação das várias condições dos sistemas.

No método desacoplado rápido, Stott e Alsac (1974), basearam-se no desacoplamento existente entre os fluxos de potências ativa (MW) e reativa (MVar) em um sistema de potência, e formularam, através de extensivo estudo numérico, um método mais simples, rápido e confiável que o de Newton-Raphson completo. Neste método, as iterações entre os barramentos P- $\theta$  e Q-V, desacopladas como mencionado anteriormente, utilizam matrizes constantes, desconsiderando as resistências das linhas de transmissão na formação de uma das submatrizes, conseqüentemente gerando menor esforço computacional (ZAGO, 1992). A velocidade de iteração neste método variável é igual a dois terços da mesma unidade de medida do método de Gauss-Seidel ou cinco vezes a velocidade de iteração do método de Newton-Raphson. O número de iterações requerido para a solução é ligeiramente maior do que o requerido pelo método de Newton-Raphson completo, porque este é um método quase-exato de convergência quadrática, enquanto que o método Desacoplado Rápido é um método aproximado de convergência geométrica (STOTT; ALSAC, 1974).

### **2.1.3. Método da técnica de varredura de passos *Backward/Forward***

Dresch (2014) afirma que atualmente, dentre os métodos utilizados para análise de redes radiais de distribuição, encontram-se os métodos de varredura *Backward-Forward Sweep* por soma das correntes (SHIRMOHAMMADI, 1988) e por soma das potências (BROADWATER, 1988; CESPEDES, 1990).

Na modelagem de redes de distribuição em que há o uso de técnicas para solução do problema de fluxo de carga trifásico baseadas em varredura, o barramento de referência é a seção principal e os ramos subsequentes são níveis derivados do barramento de referência.

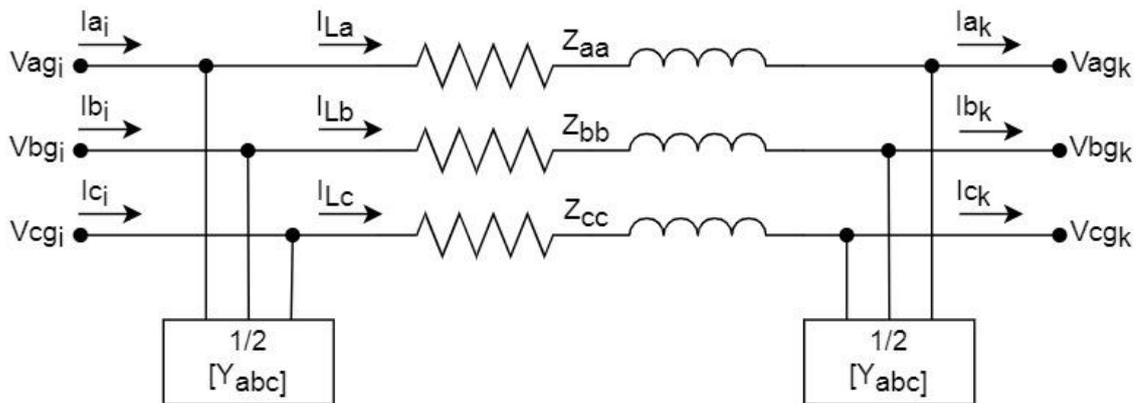
Os métodos de varredura *Backward-Forward Sweep* consistem basicamente em duas etapas. Na primeira etapa (*backward*), os cálculos são processados percorrendo o sistema de distribuição radial com origem nas suas extremidades e com destino a barra de referência

(subestação), somando as correntes ou fluxos de potência das extremidades ao barramento de referência. Na segunda etapa (*forward*), os cálculos são processados com origem na barra de referência e com destino as extremidades do sistema, calculando as quedas de tensão, do barramento principal aos terminais, proporcionando atualizações nas tensões de cada barramento baseadas nas correntes ou fluxos de potência estimados anteriormente (DRESCH, 2014; MARCHESAN *et al.*, 2020).

Carvalho (2006) afirma que esse processo se repete até que a convergência seja atingida ou algum critério de parada seja satisfeito, como por exemplo, um determinado número de iterações. A ordem com que as barras (ou nós) são percorridas depende da metodologia adotada.

Dresch (2014) relata que, dado um valor para a magnitude e o ângulo da tensão no barramento de referência (subestação), o algoritmo inicia considerando a rede sem carga, ou seja, a tensão em todos os barramentos da rede é igual à tensão especificada. Então, de acordo com a Figura 3, partindo dos nós terminais da rede, utilizando a soma das correntes que chegam ou o somatório das potências da barra à jusante, o algoritmo calcula as tensões dos nós a montante através da equação (1).

Figura 3 - Modelo de linha de distribuição



Fonte: Autoria própria, 2022.

$$[V_{abc}]_i = [a][V_{abc}]_k + [b][I_{abc}]_k \quad (1)$$

$[V_{abc}]$  e  $[I_{abc}]$  são os vetores  $3 \times 1$  das tensões de fase e das correntes de linha, em cada fase da rede.  $[a]$  e  $[b]$  são matrizes gerais  $3 \times 3$  relacionadas com os tipos de elementos da linha. Kersting (2017), apresenta a construção dessas matrizes. Esta etapa tem o nome de passo *backward*.

Após a execução do passo *backward*, realiza-se o teste de convergência com base na tensão da subestação. O teste calcula o erro entre o valor nominal ( $V_{i-sub}^{nom}$ ) e o valor obtido por meio do passo *backward* ( $V_{i-sub}^{comp}$ ) para todas as fases, utilizando a equação (2). Se o erro em todas as fases for menor que uma determinada tolerância, o algoritmo convergiu, caso contrário, inicia a etapa seguinte (DRESCH, 2014).

$$Erro = \frac{|V_{abc-sub}^{nom} - V_{abc-sub}^{comp}|}{V_{abc-sub}^{nom}} \quad (2)$$

Posteriormente, partindo do barramento de referência, subestação, utilizando a tensão especificada e as correntes dos ramais, ou os somatórios das potências, calculadas anteriormente, as tensões das barras a jusante são recalculadas através da equação (3).

$$[V_{abc}]_k = [A][V_{abc}]_i + [B][I_{abc}]_k \quad (3)$$

$[A]$  e  $[B]$  são matrizes gerais 3x3 relacionadas com os tipos de elementos da linha. Kersting (2017), apresenta a construção dessas matrizes. Após varrer a rede recalculando as tensões das barras, da subestação até os nós finais, o algoritmo recomeça. Esta etapa tem o nome de passo *forward*. O algoritmo para quando um critério de convergência previamente definido for alcançado.

Assim em resumo, Carvalho (2006) afirma que o algoritmo geral do método de varredura de passos *backward/forward*, consiste em duas etapas básicas, o passo *backward* onde são calculadas as correntes ou fluxos de potência com as possíveis atualizações das tensões, e o passo *forward* que realiza os cálculos das quedas de tensão com as atualizações das correntes ou fluxos de potência e repetidos até que se obtenha a convergência do algoritmo.

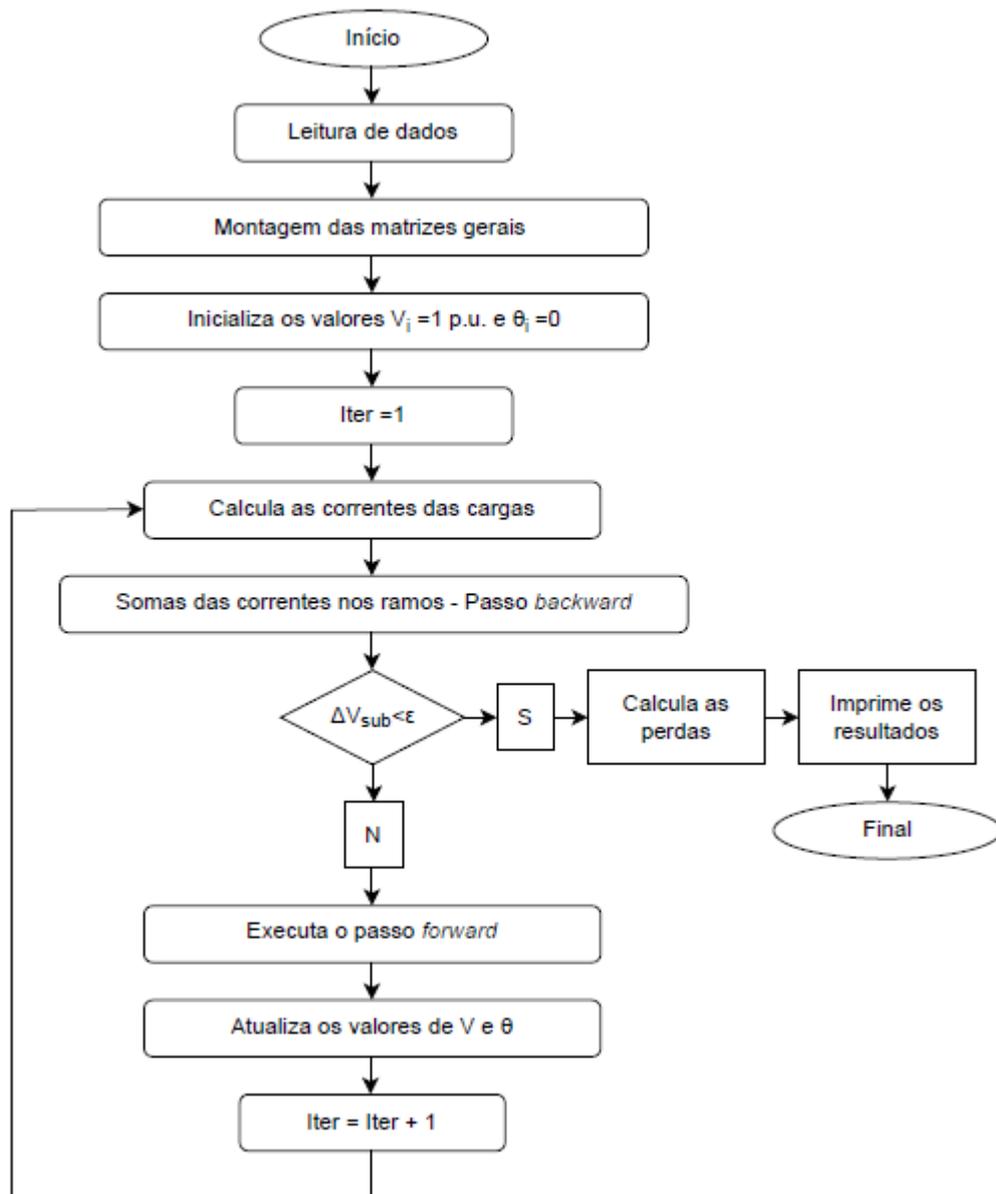
### 2.1.3.1. Método da técnica de varredura de passos *Backward/Forward* – Soma das correntes

Formalizado pela primeira vez por (SHIRMOHAMMADI, 1988), o método BFS por soma de corrente foi muito bem detalhado por (KERSTING, 2002) e (ZIMMERMAN, 1995). O algoritmo iterativo por soma de corrente, para solução de sistemas radiais, funciona em três



Novamente, após escanear a rede para recalcular a tensão do barramento da subestação até o nó final, o algoritmo inicia novamente. O algoritmo finaliza quando os critérios de convergência definidos anteriormente são alcançados. A Figura 5 mostra o fluxograma para o algoritmo de fluxo de carga para o método de varredura de passos *backward/forward* de soma das correntes.

Figura 5 - Fluxograma do método *backward/forward* por soma das correntes

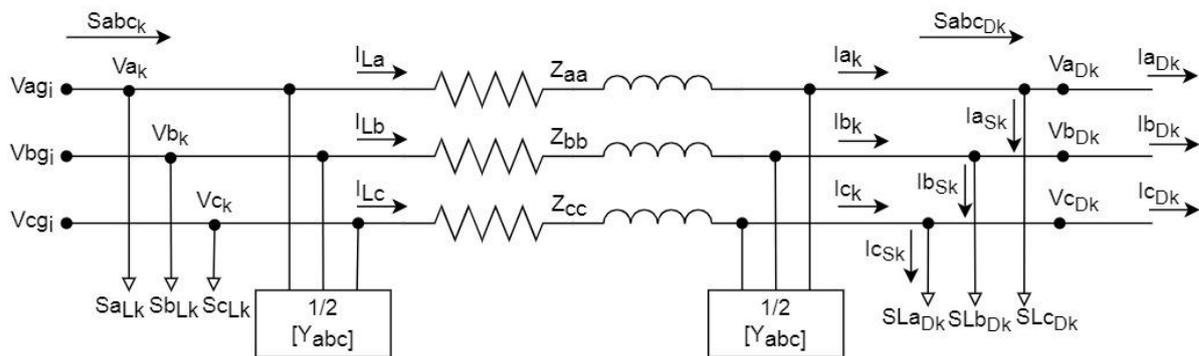


Fonte: Adaptado de Dresch, 2022.

### 2.1.3.2. Método da técnica de varredura de passos *Backward/Forward* – Soma de potência

Na aplicação do método da técnica de varredura de passos *backward/forward* pelo artifício da soma de potência, Dresch (2016) diz que o algoritmo iterativo busca somar as potências requeridas pela rede, para calcular a queda de tensão na rede. Durante a execução do passo *backward* observando a Figura 6, para calcular a tensões dos nós a montante da barra  $k$ , o algoritmo calcula a potência requerida pela barra ( $S_k$ ), somando as potências requeridas pela rede à jusante da barra ( $S_d$ ) e a potência da carga conectada a barra ( $S_L$ ), conforme equação (6).

Figura 6 - Modelo geral de linha de rede de distribuição para Soma de potência



Fonte: Adaptado de Dresch, 2022.

$$S_k = S_{L_k} + \sum_{d \in D_k} S_d = S_{L_k} + \sum_{d \in D_k} S_{L_d} + \sum_{d \in D_k} z_d \left( \frac{S_d}{V_d} \right)^2 \quad (6)$$

Onde  $D_k$  é o conjunto de todos os nós a jusante da barras  $k$ . As potências requeridas pela rede à jusante reúnem às cargas conectadas nas barras a jusante,  $S_d$ , e a perdas ocorridas nas linhas à jusante. Desta forma os cálculos para aplicação do passo *backward* ficam de acordo com a equação (7).

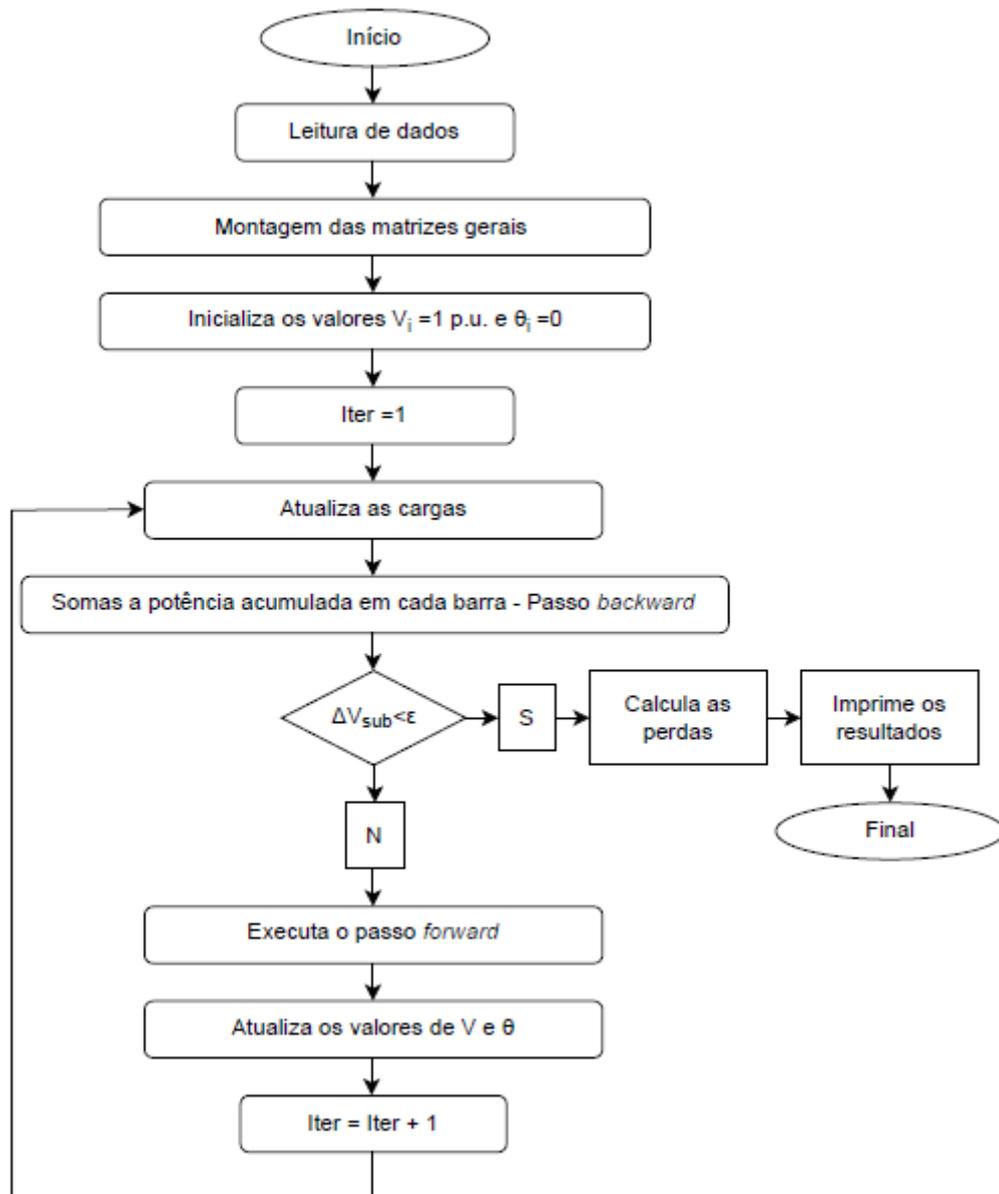
$$[V_{abc}]_i = [a][V_{abc}]_k + [b] \left( \frac{S_{abc_k}}{V_{abc_k}} \right)^* \quad (7)$$

Para o passo *forward*, utilizando o somatório de potência em cada nó, calculados na etapa anterior, calcula-se a queda de tensões da rede, partindo da subestação em direção aos nós finais, pela equação (8).

$$[V_{abc}]_k = [A][V_{abc}]_i - [B] \left( \frac{S_{abc_k}}{V_{abc_k}} \right)^* \quad (8)$$

O algoritmo para quando um critério de convergência previamente definido for alcançado. Analogamente a Figura 7 mostra o fluxograma para aplicação do algoritmo para o fluxo de cargas para o método por soma de potência.

Figura 7 - Fluxograma para aplicação do algoritmo para o fluxo de cargas para o método por soma de potência



Fonte: Adaptado de Dresch, 2022.

## 2.2. Análise de Falhas

As faltas ocorrem nos sistemas de energia geralmente nas partes mais expostas deles, ou seja, majoritariamente nas linhas de transmissão. Também ocorrem faltas nos geradores e transformadores e demais equipamentos tais como nos sistemas de compensação estática. Do

ponto de vista físico, um curto-circuito se caracteriza pela diminuição do valor da resistência do local em que ocorreu a falta (SIQUEIRA, 2017).

Um curto-circuito pode ser classificado devido a sua duração. É denominado “permanente” quando provocado por situações irreversíveis espontaneamente, necessitando de reparos para ser sanado. Por outro lado, é denominado “temporário” ou “transitório” quando provocado por situações reversíveis espontaneamente (DECOURT, 2007).

O cálculo de curto-circuito consiste na análise do comportamento de um sistema elétrico perante uma condição de falta, particularmente refere-se aos efeitos provocados nos valores da tensão e corrente do sistema elétrico de potência perante uma falta, podendo ser classificados em equilibrados ou simétricos (curto-circuito trifásico e trifásico terra) e desequilibrados ou assimétricos (curto-circuito monofásico terra, bifásico e bifásico terra) (WEEDY, 2012).

Ruback (2016) afirma que os métodos para análise de faltas necessitam de cálculos complexos e trabalhosos, o que fez necessária a utilização de métodos experimentais no início do século passado, os quais, graças aos avanços tecnológicos das últimas décadas, tornaram-se métodos computacionais capazes de solucionar problemas complexos em questões de minutos ou até segundos.

Rosa e Assis (2020) destacam que a determinação das correntes de curto-circuito é fundamental para o dimensionamento de disjuntores e ajuste do sistema de proteção. Seu cálculo pode ser feito a partir da modelagem do sistema em componentes simétricas ou componentes de fase, de acordo com breves explicações a seguir.

### **2.2.1. Análise de faltas via componentes simétricas**

Os curtos-circuitos que ocorrem com maior frequência são os desequilibrados ou faltas shunt monofásicas e bifásicas, com predominância de curto-circuito fase-terra (monofásico). Mesmo sua frequência de ocorrência relativa sendo pequena, o curto-circuito trifásico é de longe o mais analisado por ser considerado o mais severo. Entretanto, é possível que em algumas situações a corrente de curto-circuito monofásico seja maior do que a corrente de curto-circuito trifásico (SATO; FREITAS, 2015). Moraes Filho (2022), complementa dizendo que como os sistemas estão em desequilíbrio, é imprescindível a utilização da teoria de componentes simétricas para transformar o sistema em três sistemas de sequência. Sendo assim, para tal modelagem deve-se conhecer, portanto, as impedâncias de sequência dos elementos.

Assim, os sistemas trifásicos simétricos e equilibrados podem ser representados e calculados, utilizando-se uma de suas fases e o neutro. Porém, esse procedimento não é válido na ocorrência de faltas assimétricas, tais como fase-terra e fase-fase-terra, uma vez que tais faltas introduzem desequilíbrios no sistema elétrico de potência (RUBACK, 2016).

De acordo com Stevenson (1974, p. 295, apud ROSA; ASSIS, 2020, p. 2), o método mais largamente utilizado para o cálculo de curto-circuito advém da teoria de componentes simétricas e considera o sistema pré-falta perfeitamente equilibrado, logo entende-se que a matriz de impedâncias de uma linha ou carga seja diagonal, além de apresentar uma série de vantagens desde que a rede, na sua condição pré-falta, possa ser considerada perfeitamente equilibrada. Nesse caso, o método dos componentes simétricos é muito útil para a análise de defeitos simétricos e assimétricos e permite, de forma relativamente simples, a determinação das correntes e das tensões em todas as partes do sistema durante a ocorrência da falta.

Resumidamente, Rosa e Assis (2020) relatam que o algoritmo oriundo da aplicação do método para cálculo de corrente de curto-circuito via componentes simétricas segue os seguintes passos:

- Calcular as condições pré-falta do sistema;
- A partir da topologia do sistema, obter as matrizes de admitância nodal ( $Y_{\text{barra}}$ ) de sequência positiva, negativa e zero e, a partir delas, encontrar as respectivas matrizes de impedância de barra ( $Z_{\text{barra}}$ );
- A partir das impedâncias equivalentes de Thévenin obtidas das matrizes  $Z_{\text{barra}}$ , calcular as correntes de curto-circuito;
- Aplicar o teorema da superposição para calcular as condições de defeito nas redes de sequência positiva, negativa e zero;
- Obter matricialmente os valores de tensão e corrente em componentes de fase.

### **2.2.2. Análise de faltas via componentes de fase**

Nas redes de distribuição, o desequilíbrio no sistema elétrico é, na maioria das vezes, expressivo, apresentando-se como linhas não transpostas e cargas desequilibradas, por exemplo. Por este motivo, o método de análise de faltas via componentes simétricas torna-se preterido, tendo vista a garantia de um método com maior precisão. Nestes casos, o cálculo do curto-circuito via componentes de fase é geralmente utilizado.

Com isso, objetivando a facilidade na aplicação da análise de faltas via componentes de fase, geralmente os sistemas trifásicos passam por uma simplificação que incorporam a representação de cada máquina geradora por fontes de tensão constante em série com suas reatâncias; desprezo das cargas e admitâncias em paralelo das linhas; consideração de transformadores operando com *tap* nominal; e desconsideração das resistências das linhas e dos transformadores, nos sistema que operam em alta tensão (RUBACK, 2016).

Ainda de acordo com Ruback (2016), neste método, a utilização da matriz de impedância de barras conduz a um modo adequado para o cálculo das tensões e correntes de falta, quando a terra é escolhida como referência, uma vez que os elementos dessa matriz são usados diretamente no cálculo.

Na literatura, percebe-se que não há um método único para a realização do cálculo de curto-circuito através de componentes de fase, haja visto a característica peculiar deste método que permite a evolução e desenvolvimento de novas técnicas partindo de premissas básicas inerentes a ele.

Ruback (2016) relata que esses métodos, apesar de estarem presentes na literatura por algumas décadas, eram anteriormente inviáveis em virtude da falta de recursos computacionais realmente eficientes. Hoje, porém, com o desenvolvimento destes recursos, tanto no aspecto velocidade quanto na disponibilidade de memória dos computadores atuais, a análise de faltas em sistemas elétricos de grande porte pode ser realizada de maneira rápida e precisa.

### **2.2.3. Análise de trabalhos desenvolvidos**

Esses métodos foram inicialmente desenvolvidos para aplicações nas fases de transmissão, onde apresentam o melhor desempenho, e posteriormente iniciado testes para resolução de problemas a curto-prazo na fase de distribuição, e algumas destas pesquisas realizadas por Reitan (1980), Hooshyar e Vanfretti (2015), Rupa e Ganesh (2014), Chang *et al.* (2007), Chang *et al.* (2006), Bompard *et al.* (2000), Balamurugan e Srinivasan (2011) e Augugliaro (2010), foram feitas para desenvolver o cálculo do fluxo de carga usando algoritmo *backward/forward*.

Entre os trabalhos recentes embasados nas técnicas de fluxo de carga tradicionais, Hameed *et al.* (2021) desenvolveram um novo método de fluxo de carga voltado para microrredes em corrente alternada com malhas ilhadas, onde o método de varredura de passos *backward/forward* é proposto em conjunto com uma abordagem de quebra de *loop* para determinar os fluxos de potência para microrredes malhadas. Tien *et al.* (2019) apresentam uma

nova abordagem de análise de fluxo de carga por Newton-Raphson em redes de sistemas de energia com compensador síncrono estático (STATCOM), onde um software baseado em MATLAB *Compiler Runtime* (MCR) baseado no método proposto é desenvolvido para analisar o fluxo de carga do sistema elétrico com e sem STATCOM. Mathur *et al.* (2021) criaram um novo método de análise de fluxo de carga e curto-circuito para sistema de distribuição, incorporando modelos matemáticos de transformadores trifásicos de qualquer grupo vetorial e diferentes modos de operação para geração distribuída baseada em inversores (IBDG), onde o modo de operação do IBDG durante a análise de curto-circuito depende da magnitude de sua capacidade de curto-circuito. O trabalho desenvolvido por Ahmadi *et al.* (2021) traz um novo método para análise de fluxo de carga para sistemas de distribuição radial e de malha fraca (WMDSs) usando um método direto (DM) com inclusão de barramentos fotovoltaicos (PV), construído com base em regras simples de circuitos elétricos, de modo que apenas uma matriz Z expressando impedâncias comuns entre cargas é necessária para simulação. Para WMDSs, a única modificação é usar a regra do divisor de corrente para resolver malhas. Os barramentos fotovoltaicos (PV) são simulados usando o algoritmo de solução Newton-Raphson (NR). Ouali e Cherkaoui (2020) apresentam um algoritmo aprimorado de fluxo de carga usando a técnica de varredura de passos *backward/forward* com o uso apenas de equações lineares baseadas na formulação de Kirchhoff, flexível com mudanças na topologia da rede, objetivando a melhoria em garantir um número mínimo de buscas de conexões entre nós na sequência de cálculo na varredura de passos *backward/forward*, organizando as informações do sistema de distribuição radial em uma linha principal e suas derivações. Kawambwa *et al.* (2021) propõem uma técnica de fluxo de carga derivada do conceito da técnica convencional de varredura de passos *backward/forward* usando equações lineares baseada nas leis de Kirchhoff sem envolver a multiplicação de matrizes. O método pode acomodar mudanças na reconfiguração da estrutura da rede com base na profundidade da árvore da rede entre os nós podendo funcionar bem sob reconfiguração de rede evitando a renumeração complexa de ramificações e nós.

Por outro lado, a literatura apresenta os seguintes trabalhos desenvolvidos para o cálculo de curto-circuito: o algoritmo apresentado por Kersting (2017) e Kersting e Phillips (1990) monta uma matriz de impedância trifásica representando a impedância equivalente entre a barra submetida a falta e o equivalente do sistema gerador. As condições de falta são então especificadas. O método alcança bons resultados e é implementado nos programas RDAP / WindMil®. Zhang *et al.* (1995) utiliza um método de compensação híbrido em coordenadas de fase, para o cálculo do curto-circuito em sistemas radiais. Teng (2010), propõe duas matrizes

para analisar as variações nas tensões da barra, correntes injetadas na barra e correntes nos ramos em condições de falta. Ou (2012) também propõe duas matrizes que são construídas a partir da topologia do sistema combinada com o método de compensação híbrida para a análise de curto-circuito. Sun *et al.* (2013) propõem um método que utiliza a matriz de admitância nodal combinada com as condições de falta. Li *et al.* (2014) desenvolve o cálculo das correntes de curto-circuito baseado em um algoritmo de fluxo de potência modificado. Youssef (2015) aplicou a técnica de varredura de passos *backward/forward* no desenvolvimento de uma plataforma de controle de tensão baseada em sensibilidade para análise de curto-circuito em sistemas de distribuição desbalanceados. Tristiu *et al.* (2015) propõem um novo algoritmo para o cálculo de correntes de curto-circuito que consiste em duas etapas, onde as impedâncias são adicionadas.

Os métodos apresentados mostram que, apesar de ideias revolucionárias nos estudos de análise de faltas e fluxo de carga, não houve a percepção de unificação dos estudos, que por natureza se completam, e ainda mantiveram as análises em trabalhos individualizados, acarretando maior carga de trabalho ao realizar os estudos. Portanto, a revisão da literatura mostrou que não houve a proposição de um método unificado capaz de resolver tanto o problema de fluxo de carga quanto o problema de curto-circuito pela técnica de varredura de passos *backward/forward* utilizando fontes iterativas de corrente, que torna o método apresentado neste trabalho como algo inédito na literatura.

### **2.3. Softwares desenvolvidos com base nos métodos tradicionais de fluxo de carga e análise de faltas**

#### **2.3.1. Análise de faltas simultâneas (ANAFAS)**

O *software* de simulação de curto-circuito ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) é considerado uma ferramenta de suma importância nas análises de falta na rede elétrica. É um dos *softwares* utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), e tido como referência nos Procedimentos de Rede (SOUZA JUNIOR, 2018).

Ainda complementando a definição e aplicação do ANAFAS pode-se afirmar que:

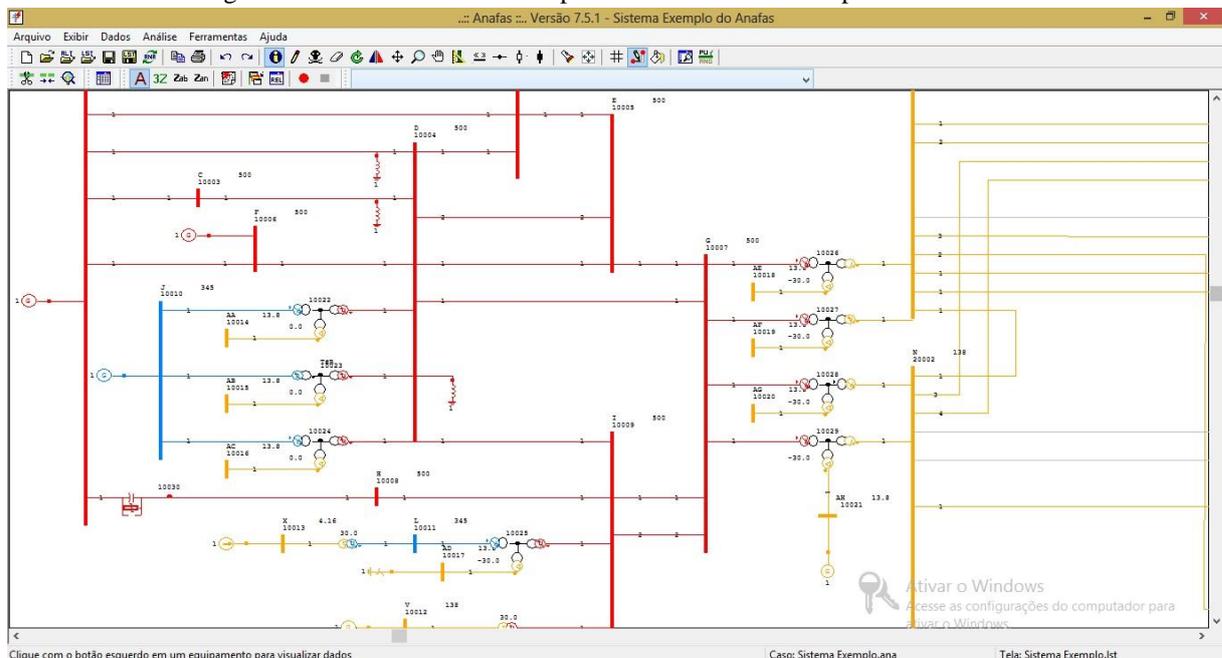
O ANAFAS é um programa para cálculo de curtos-circuitos que permite a execução individual ou sequencial de grande variedade de situações de faltas em sistemas de potência. Possui facilidades, como estudo automático de superação de disjuntores, obtenção de equivalentes de rede otimizados e cálculo automático da evolução dos

níveis de curto. O programa utiliza um modelo próprio para representar os novos geradores eólicos e fotovoltaicos conectados ao sistema via inversores e possui, também, uma interface gráfica com editor de diagramas unifilares incorporado.

É amplamente utilizado pelas empresas Eletrobras, ONS, EPE, MME, Aneel, concessionárias de energia elétrica, consultorias e universidades. Arquivos de dados para o ANAFAS referentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) estão disponíveis para download nos sites do ONS e da EPE.

O programa ANAFAS vem sendo desenvolvido para atender às necessidades do setor elétrico brasileiro em estudos envolvendo a simulação de curtos-circuitos. Alguns dos seus diferenciais são o cálculo de equivalentes de rede com erro máximo predefinido e minimização do número de ligações equivalentes criadas, a modelagem de geradores conectados ao sistema por inversores usando fontes de corrente controladas, e a geração automática de arquivos de alteração a partir da comparação entre duas configurações (CEPEL, 2023).

Figura 8 - Interface do software apresentando sistema exemplo do ANAFAS.



Fonte: Autoria própria, 2023.

### 2.3.2. Software de simulação para análise e planejamento de redes de energia em todos os níveis de tensão.

O Software de simulação para análise e planejamento de redes de energia em todos os níveis de tensão, PSS® SINCAL do fabricante SIEMENS, é uma plataforma que contém módulos básicos para planejamento e gerenciamento de operações em redes elétricas.

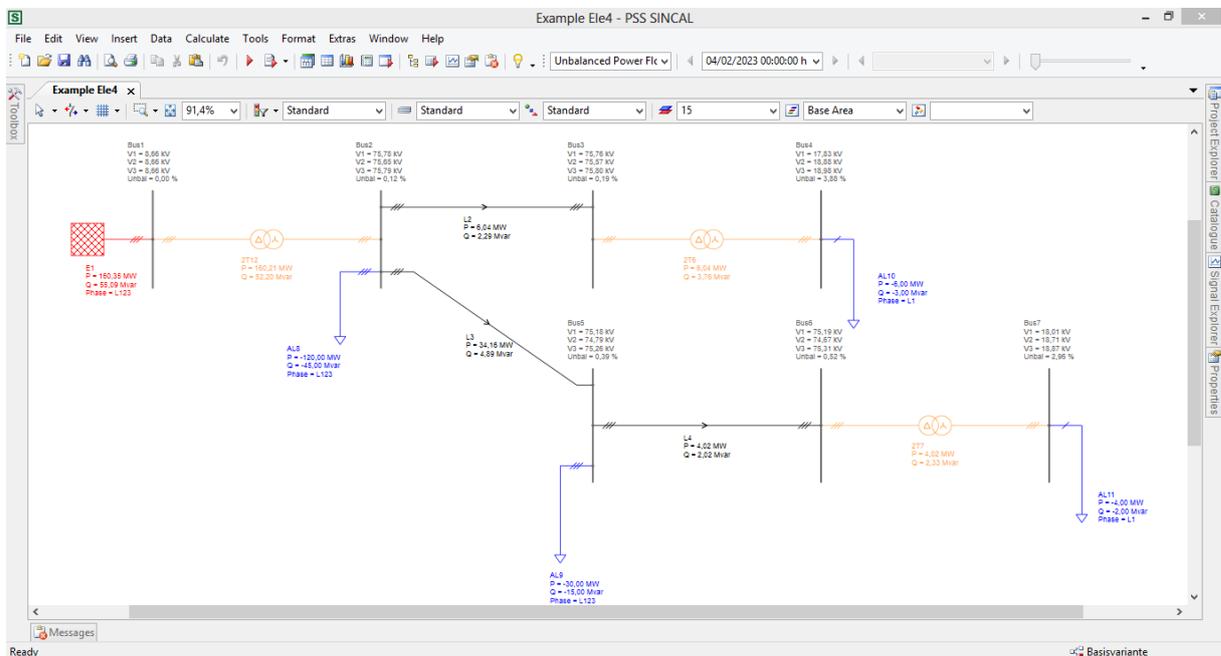
O fabricante SIEMENS ainda destaca a justificativa que embasa a criação do *software*:

Há mais de 30 anos, a Plataforma PSS@SINCAL possibilita engenheiros para enfrentar diferentes desafios da mudança redes de distribuição, incluindo a manutenção de alta confiabilidade de fornecer e integrar eficientemente a Energia Distribuída Recursos. PSS@SINCAL fornece engenheiros de distribuição com as poderosas ferramentas de simulação necessárias para o planejamento, projeto e operação de distribuição de energia redes. Pode ser usado em balanceado, desbalanceado, radial, e redes em malha – de baixa a alta tensão.

O PSS@SINCAL é usado em mais de 100 países por engenheiros de planejamento de transmissão e distribuição, engenheiros de proteção, consultores, operadores de usinas de energia e redes industriais, engenheiros de planejamento de operações, profissionais de TI, pesquisadores e muito mais. Com a plataforma modular do PSS@SINCAL, os engenheiros de planejamento e operação do sistema de energia são apoiados em todo o seu fluxo de trabalho, desde a importação inicial de dados e modelagem da rede (considerando condições passadas, atuais e futuras), até cálculos básicos e estendidos, até extensas simulações e análises de proteção, bem como outros métodos nos domínios do tempo e da frequência.

Através de seu design modular, o PSS@SINCAL é altamente flexível e personalizável. Ele oferece uma ampla variedade de funções de análise para o planejamento, projeto e operação de sistemas de energia, permitindo simular e estudar: qualidade de energia, estabilidade de frequência, interconexão de geração distribuída, coordenação de proteção, restauração de fornecimento, decisões econômicas de projeto e muito mais (SIEMENS, 2023).

Figura 9 - PSS@SINCAL - interface gráfica do usuário modelo de rede



Fonte: Autoria própria, 2023.

### 2.3.3. Simulador PowerWorld (PWS)

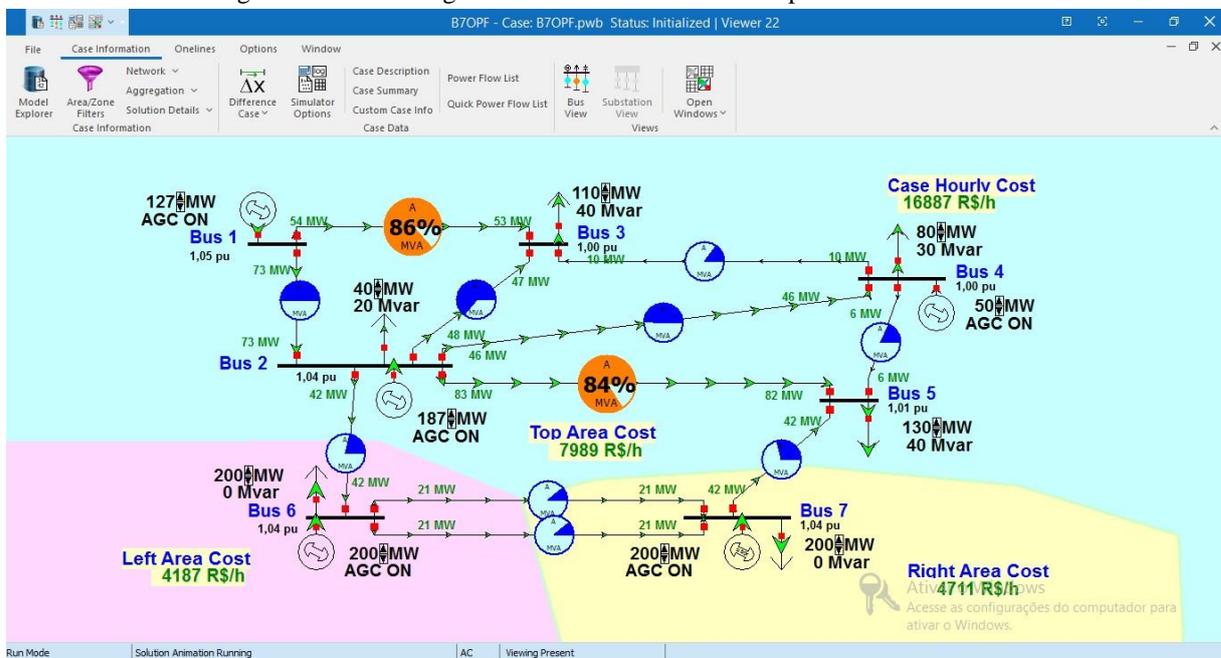
O Simulador *PowerWorld* é um pacote interativo de simulação de sistema de energia projetado para simular a operação do sistema de energia de alta tensão em um intervalo de tempo que varia de alguns minutos a vários dias. O *software* contém um pacote de análise de fluxo de potência altamente eficaz, capaz de resolver com eficiência sistemas de até 250.000 barramentos (PWS, 2023).

A corporação PWS afirma ainda que:

O *PowerWorld Simulator* é ideal para ensinar operações e análises de sistemas de energia e para realizar pesquisas. Na verdade, a versão original do *software* do Simulador foi construída como uma ferramenta para ensinar sistemas de potência e apresentar os resultados da análise de sistemas de potência para públicos técnicos e não técnicos. Desde aquela época, o Simulador evoluiu para a plataforma de análise e visualização de sistemas de energia altamente poderosa que é hoje.

O simulador foi, e continua a ser, usado efetivamente em aulas de graduação e pós-graduação em operação, controle e análise de sistemas de energia. Os conceitos são apresentados de forma simples, mas o software tem detalhes suficientes para desafiar estudantes de engenharia avançada (PWS, 2023).

Figura 10 - Interface gráfica do usuário com caso simples simulador PWS.



Fonte: Autoria própria, 2023.

## 2.4. Microrredes

O termo “microrrede” tem sido muito utilizado no planejamento e na análise da operação de sistemas elétricos modernos, onde a presença de geração distribuída, a partir da utilização de fontes renováveis de energia ou mesmo de fontes convencionais de porte menor do que as grandes centrais elétricas, torna-se uma realidade (MARINHO, 2011).

Os novos consumidores estão assumindo o controle do seu fornecimento de energia e a microrrede é uma aliada cada dia mais viável. Trata-se de um sistema integrado que consiste em recursos de energia distribuída e várias cargas elétricas operando como uma rede única e autônoma, atuando em paralelo ou isolada da rede de distribuição convencional. Essa tecnologia permite o uso de energia “verde”, permite o controle total sobre demanda e consumo e reduz os efeitos de interrupções de energia (O SETOR ELÉTRICO, 2021).

De acordo com Massignan *et al.* (2016), o crescente interesse no conceito de microrredes tem aumentado a necessidade de interação entre as áreas de sistemas elétricos de potência e de sistemas dinâmicos. Quanto a área de sistemas dinâmicos, estas microrredes tendem a incorporar diversas fontes alternativas de energia conectadas por conversores de eletrônica de potência que demandam cada vez mais por controladores específicos e complexos. Quanto aos sistemas elétricos de potência, as microrredes podem ser vistas como uma versão em menor escala dos grandes sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia, porém necessitando de similar gerenciamento e garantias de segurança operacional.

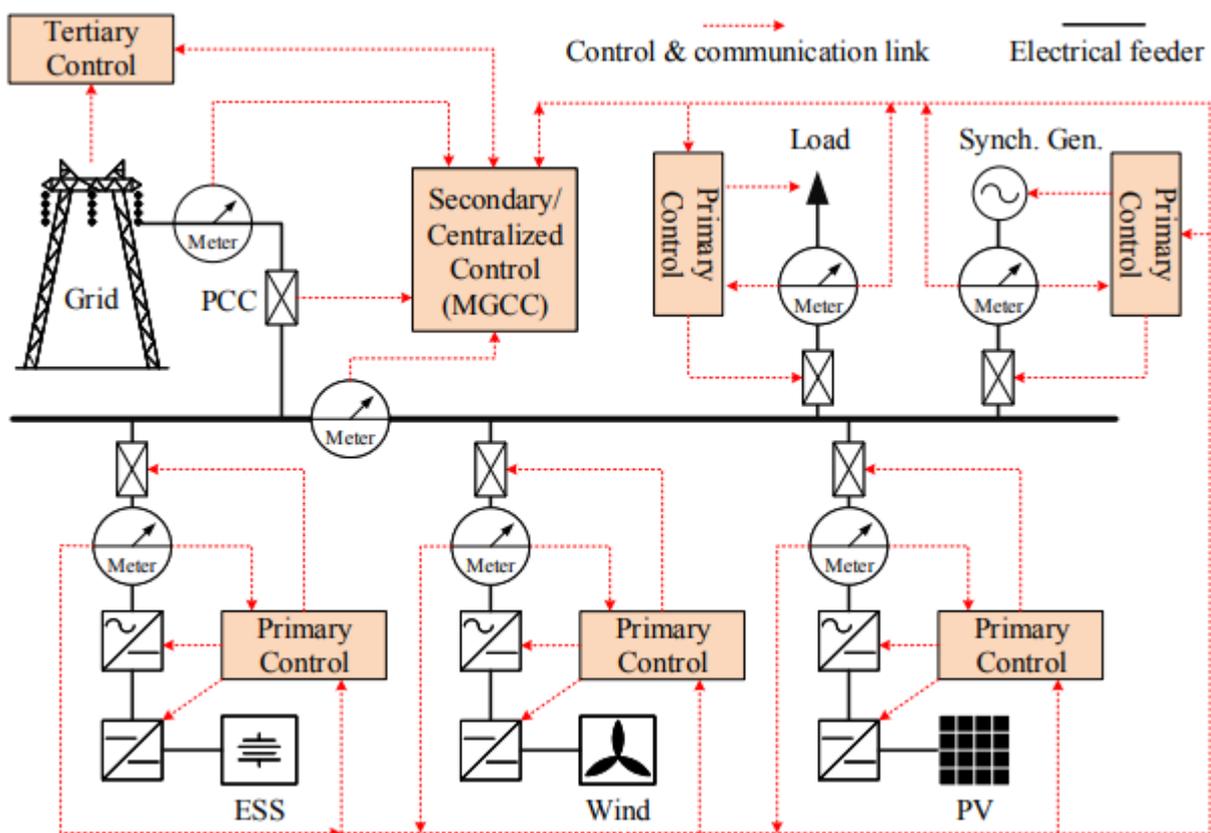
A micro e a minigeração de energia oferecem grandes oportunidades da expansão de energia da matriz energética brasileira (EPE, 2021). Este avanço na geração de eletricidade pelos chamados Recursos Energéticos Renováveis (RER – *Renewable Energy Resources*), como a energia solar e a eólica, trazem novos desafios de pesquisa e estudos em temas como estabilidade, controle, confiabilidade, operação, qualidade de energia, tanto para geração de energia renovável quanto para o sistema de distribuição ou transmissão ao qual está conectado (FARROKHABADI *et al.*, 2019).

Costa (2019) relata que, apesar das vantagens da formação de microrredes em decorrência da inclusão de geração distribuída em redes de distribuição, ainda existem inúmeros desafios relacionados à sua implantação. Dentre os quais, pode-se evidenciar a aplicação de sistemas de proteção que, além da confiabilidade, garantam a coordenação e seletividade perante as condições de operação e perturbações mais adversas. Portanto, torna-se necessária a exploração dos efeitos causados nos sistemas de proteção convencionais. Uma vez que as

características da rede são alteradas, os sistemas de proteção instalados devem ser redimensionados impreterivelmente, evitando assim, interrupções indevidas de fornecimento de energia elétrica em pontos não afetados por defeitos na rede.

Farrokhbadi *et al.* (2019), apresenta uma configuração genérica de microrrede que pode ser vista na figura 11, onde o sistema é conectado à rede principal através de um disjuntor PCC (Ponto de acoplamento comum), e consiste em componentes comuns como carga, vários pontos e recursos de geração de energia elétrica distribuídas (DERs) e sistemas de armazenamento de energia (ESS).

Figura 11 – Configuração típica de uma microrrede.



Fonte: Farrokhbadi et al., 2019.

IEEE (2018), como mostra na figura 11, afirma que uma microrrede normalmente contém uma infraestrutura de comunicação entre o Controlador Central da Microrrede (MGCC), chaves, controle primário dos componentes e dispositivos de medição. Dependendo dos requisitos e da topologia da grade superior, também pode existir um canal de comunicação entre o MGCC e uma camada de controle terciária. O Sistema de controle de microrrede refere-se ao conjunto de *software* e *hardware* que garantem a estabilidade operacional, otimização e confiabilidade da microrrede, onde é mencionado que o termo “sistema de controle de

microrrede” deve ser adotado em vez do termo “controlador de microrrede”, implicando que o as funções de controle necessárias podem ser distribuídas entre vários componentes em vez de serem centralizadas em um controlador.

As principais funções do sistema de controle de microrrede incluem: (i) manter as tensões, correntes e frequência dentro das faixas desejadas; (ii) manter o equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia; (iii) realizar despacho econômico e gerenciamento do lado da demanda; e (iv) transição entre vários modos de operação. Ainda como visto na figura 11, o sistema de controle da microrrede pode ser categorizado em três hierarquias, a saber, primária, secundária e terciária, e as principais variáveis usadas para controle primário em uma microrrede incluem tensão, frequência e fluxos de potência ativa e reativa (OLIVARES *et al.*, 2014).

Entre as características das microrredes, Farrokhhabadi *et al.* (2019), destaca as principais diferenças quando comparadas a sistemas elétricos massivos de potência, destacando que quanto menor o tamanho do sistema, maior penetração de fontes alternativas de energia, maior incerteza, menor inércia do sistema, maior relação R/X dos alimentadores, capacidade limitada de curto-circuito, e carregamento trifásico desbalanceado. Essas diferenças intrínsecas entre microrredes e sistemas de energia em massa relevantes requerem uma revisão das definições de estabilidade e classificação para microrredes em relação às redes de transmissão.

Por fim, esta nova modalidade de geração é uma das que mais se expande no sistema elétrico brasileiro, trazendo desafios em pesquisas abordando qualidade da energia, monitoramento, controle, eficiência, estabilidade do sistema, compensação reativa e inserção de sistemas de armazenamento de energia (OLIVEIRA, 2021).

#### **2.4.1. Impedância equivalente de um parque eólico para análise de curto-circuito**

A tendência para os próximos anos é que um número cada vez maior de parques eólicos seja conectado ao sistema elétrico, devido aos problemas relacionados as altas e crescentes demandas de energia e também às questões ambientais que têm se mostrado os maiores desafios enfrentados atualmente pela humanidade. Como solução, as tecnologias baseadas em energias renováveis, entre elas a energia eólica, são consideradas como a melhor escolha para suprir a demanda energética futura, o que exige que estes tenham uma operação bem planejada. Os equipamentos de manobra e proteção do sistema devem ser cuidadosamente projetados, para que sejam compatíveis com a operação dos geradores síncronos convencionais já conectados ao mesmo sistema (RUCKS, 2012).

Geralmente os parques eólicos cobrem uma extensa área, de modo que são encontradas diversidades na potência de saída dos vários geradores que constituem o parque. Cada gerador está localizado a uma distância elétrica diferente da subestação que conecta o parque ao sistema, ocasionando diferenças nas impedâncias das linhas. Além disso, cada turbina pode estar sendo movida por diferentes velocidades instantâneas dos ventos, dessa forma gerando condições de operação levemente diferentes em cada gerador dentro do mesmo parque eólico (MULJADI; GEVORGIAN, 2011).

Rucks (2012) relata ainda que para limitar uma sobrecarga mecânica no sistema do aerogerador, incluindo as hélices e torres, há a necessidade de prover uma forma de conexão “suave” à rede, que permita um desvio da velocidade fixa quando as hélices da turbina forem expostas à turbulência e rajadas de vento. Além disso, a energia extraída da turbina pode ser maximizada se a velocidade da turbina segue a velocidade do vento mantendo uma relação fixa entre a velocidade linear das hélices e a velocidade do vento.

Assim, com o intuito de atender essas necessidades as turbinas são desenvolvidas de diferentes tipos. Algumas tecnologias comuns são: geradores de indução e geradores síncronos com inversor.

Ainda de acordo com Muljadi e Gevorgian (2011), os geradores eólicos são divididos em grupos de geradores conectados utilizando cabeamento subterrâneo, esses grupos são então conectados à subestação através de linhas aéreas, ou novamente através de cabos subterrâneos em 34,5 kV. Uma vez que não é prático modelar centenas de turbinas em uma simulação dinâmica ou simulação de fluxo de carga, é comum encontrar circuitos equivalentes para os grupos de geradores ou mesmo para todo o parque eólico que está sendo estudado.

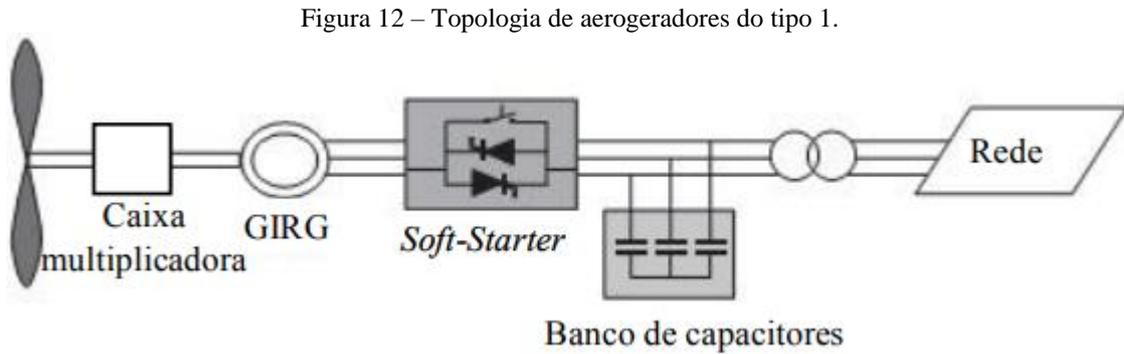
As impedâncias equivalentes de um parque eólico para estudos analíticos de curto-circuito que serão utilizados neste trabalho são apresentados por Ackermann (2005), Williams e Karlson (2012) e Rucks (2012), e são resumidos a seguir.

#### **2.4.1.1. Modelo I**

De acordo com Williams e Karlson (2012), o modelo I representa o tipo 1 (gerador de indução em gaiola de esquilo), o tipo 2 (gerador de indução de rotor enrolado) ou o tipo 3 (gerador de indução duplamente alimentado com circuito “*crowbar*”).

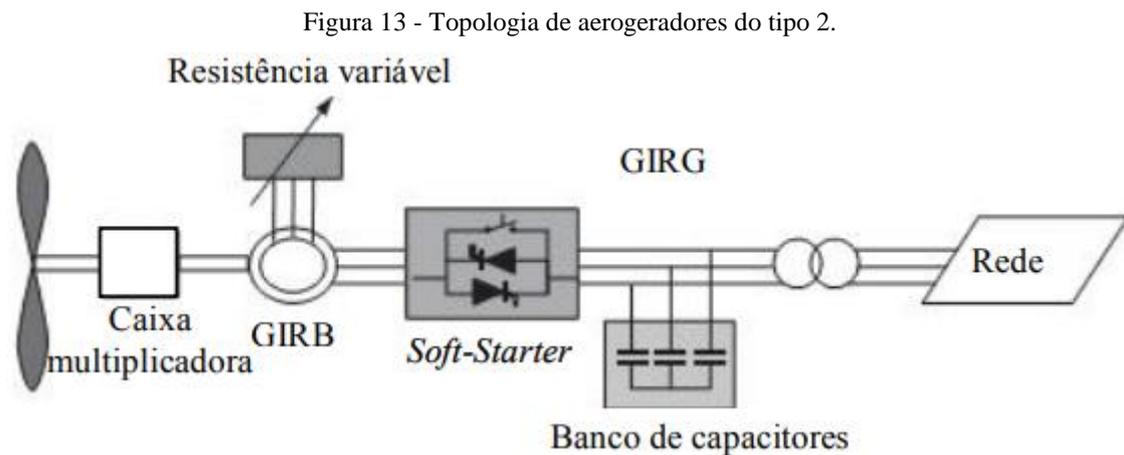
Ackermann (2005), descreve o gerador eólico tipo 1 como num aerogerador que opera com velocidade fixa e caixa multiplicadora. Um gerador de indução de rotor gaiola de esquilo

(GIRG) é conectado diretamente à rede através de um transformador. O GIRG sempre absorve potência reativa da rede, por isso, utiliza-se um banco de capacitores para compensação de potência reativa. Um Soft-Starter é utilizado para suavizar a conexão à rede. A figura 12 mostra a topologia do aerogerador tipo 1.



Fonte: ACKERMANN, 2005.

Para o gerador eólico tipo 2 onde é possível ver na figura 13 sua topologia, Ackermann (2005) o coloca como uma turbina eólica de velocidade variável limitada com resistência de rotor variável. Utiliza-se um gerador de indução de rotor bobinado (GIRB) conectado diretamente à rede. Um banco de capacitores realiza a compensação de potência reativa, e utiliza também um Soft-Starter para obter uma conexão mais suave à rede.

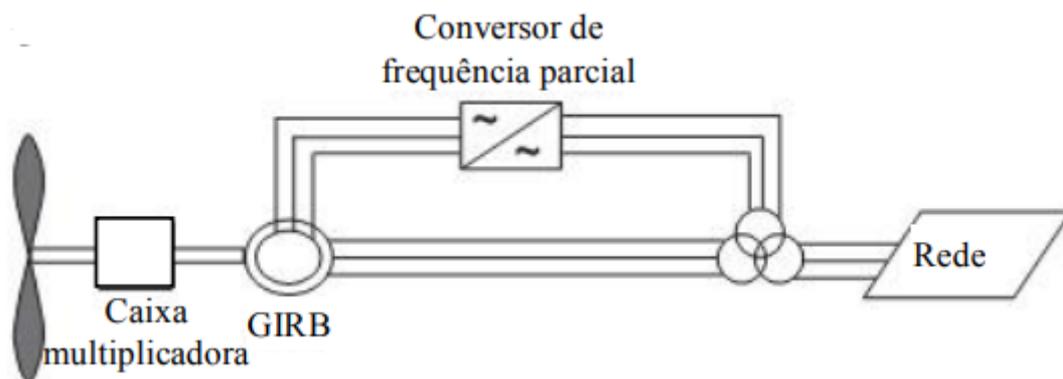


Fonte: ACKERMANN, 2005.

O gerador eólico Tipo 3 como mostra sua topologia a figura 14, é conhecido como gerador de indução com dupla alimentação (GIDA), corresponde à turbina eólica de velocidade variável limitada com gerador de indução de rotor bobinado e conversor de frequência com

processamento parcial da potência (20% a 30% da potência nominal do gerador) no circuito do rotor. O conversor realiza a compensação de potência reativa e uma conexão suave à rede (ACKERMANN, 2005).

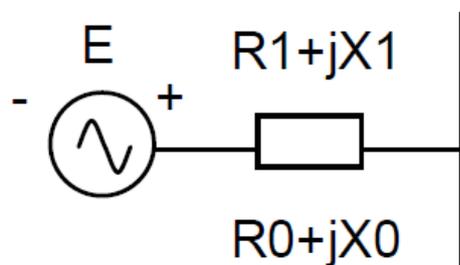
Figura 14 - Topologia de aerogeradores do tipo 3.



Fonte: ACKERMANN, 2005.

Os parques eólicos tipicamente possuem transformadores de aterramento e transformadores de potência aterrados, que devem ser incluídos na representação do parque eólico para o estudo de curto-circuito. Do ponto de vista prático, para análise de curto-circuito no nível de transmissão, não é interessante modelar o parque eólico em detalhes. Em vez disso, uma fonte de tensão de 1 p.u. em série com as impedâncias equivalentes de sequência positiva e zero, pode ser usada, conforme mostrado na figura 15 (RUCKS, 2012).

Figura 15 - Modelo I.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Antes disso, segundo Rucks (2012), um modelo detalhado do parque eólico é construído, incluindo a representação exata do sistema coletor com as turbinas, os cabos, linhas aéreas, transformadores de saída de cada gerador. Esse modelo é então usado para determinar a corrente de falta trifásica e monofásica à terra no ponto de baixa tensão (34,5kV) da subestação do parque eólico. Esses cálculos são efetuados com o disjuntor do lado de baixa tensão da subestação aberto, de modo que a única fonte para a corrente de curto-circuito seja o próprio parque eólico. Feito isso, as correntes de curto-circuito são calculadas e utilizadas para obter as impedâncias de sequência positiva e zero.

#### 2.4.1.2. Modelo II

Representa o tipo 4 (gerador síncrono de acionamento direto) ou o tipo 3 (gerador de indução duplamente alimentado com circuito “*chopper*”).

O gerador eólico tipo 4 corresponde à turbina eólica com ampla variação de velocidade, com o gerador conectado à rede através de um conversor de frequência com processamento total da potência. O gerador pode ser síncrono de rotor bobinado (GSRB), assíncrono de rotor bobinado (GIRB), ou síncrono com ímã permanente (GSIP) (ACKERMANN, 2005). Na figura 16 é possível ver a topologia do aerogerador tipo 4.

Figura 16 - Topologia de aerogeradores do tipo 4.



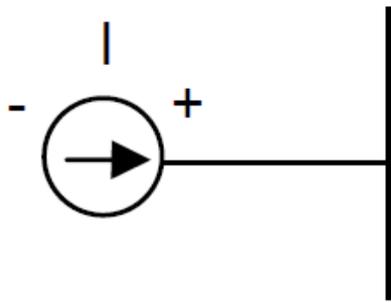
Fonte: ACKERMANN, 2005.

Diferentemente dos tipos 1 e 2, o conversor de tensão usado como dispositivo de saída de um gerador do tipo 4 é similar a um gerador síncrono pois produz uma tensão atrás da indutância de saída, e a magnitude e a fase dessa tensão determina a potência ativa e reativa fornecida pelo gerador. No entanto, essa tensão é sintetizada através de modulação PWM, e por esse motivo é altamente controlável, permitindo que a corrente de saída do gerador seja efetivamente controlada. Uma conclusão que pode ser obtida desse fato é que o modelo

convencional de curto-circuito, onde o gerador é representado por uma tensão fixa atrás de uma impedância fixa, não é um bom modelo para representar um gerador eólico tipo 4 (WALLING; REICHARD, 2009).

Logo, este tipo de curto-circuito equivalente se comporta como fontes de corrente de sequência positiva conforme mostrado na figura 17 (IEEE, 2011). Portanto, a injeção de corrente de um inversor de um parque eólico para o sistema trifásico pode ser aproximada como em (1) ou (2).

Figura 17 - Modelo II.



Fonte: Autoria própria, 2021.

$$I_{MII} = \frac{P_{ent}}{|V_{pós\ falta}| \cos\varphi_{CC}} \angle \theta \quad (1)$$

$$I_{MII} = |I_{max-inversor}| \angle \theta \quad (2)$$

Onde:

$$\theta = \hat{\text{ângulo}}(V_{pós\ falta}) - \text{arccos}\varphi_{CC} \quad (3)$$

$P_{ent}$  é o valor máximo de potência gerada pelo impedância equivalente de um parque eólico modelo II antes do curto-circuito;

$\cos\varphi_{CC}$  é o fator de potência específico para a impedância equivalente de um parque eólico modelo II durante o curto-circuito;

$|I_{max-inversor}|$  é o máximo valor de corrente que pode ser injetado pelo inversor da impedância equivalente de um parque eólico modelo II.

Considerando que o modelo 2 se comporta como corrente positiva e que sua contribuição depende do valor da tensão terminal, é necessário um processo iterativo para calcular a corrente de curto-circuito.

Com base na revisão da literatura abordada, será demonstrado um novo método denominado método unificado para cálculo de corrente de falta e fluxo de carga em microrredes não isoladas, que pode realizar estudos de curto-circuito e fluxo de carga usando a técnica de varredura de passos *backward/forward* tradicional e fontes de corrente iterativas. Assim, quando as fontes iterativas de corrente não estão presentes no algoritmo unificado, é possível processar o fluxo de carga.

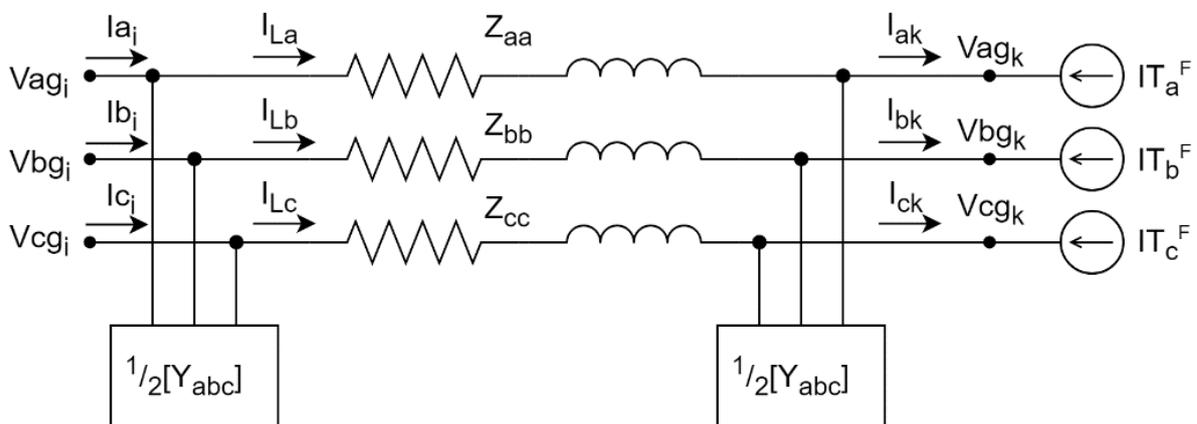
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da análise teórica e experimental da presente pesquisa, foi necessário projetar e modelar sistemas de microrredes, com interligação entre barras através de trechos de linhas devidamente parametrizados por seus comprimentos, resistências e reatâncias, utilizando o *software ATPDraw*, com o objetivo de simular o comportamento das situações de curto-circuito para obtenção dos valores de corrente de modo a confrontar com os valores obtidos com a aplicação do método. Assim, este tópico apresenta a descrição das formulações principais utilizadas para o desenvolvimento do método proposto e detalha as equações para os diferentes tipos de faltas que posteriormente serão implementadas em rotinas computacionais através de um *software* voltado para o cálculo numérico.

#### 3.1. Definição matemática de equações base

A técnica de varredura de passos *backward/forward* original trata de um processo de varredura bem conhecido na literatura, desenvolvido especificamente para a análise de fluxo de carga de sistemas de distribuição (KERSTING, 2017). Portanto, a novidade é integrar o fluxo de carga com o curto-circuito utilizando a técnica *backward/forward* permitindo o desenvolvimento de uma ferramenta com a mesma técnica para dois tipos de estudo. O método é baseado na técnica de passos *backward/forward* adicionada com as fontes de corrente iterativas conectadas para um barramento de curto-circuito de um ramo específico. A seguir, conforme mostrado na figura 18, as fontes de correntes iterativas são conectadas pela barra “k” de um ramal que é uma linha de distribuição.

Figura 18 - Modelo de linha de distribuição com fontes iterativas de corrente.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Com base na figura 18 e aplicando as Leis de Kirchhoff de correntes e tensões na barra “k”, é possível escrever as seguintes equações:

$$[I_{L_{abc}}]_k = [I_{abc}]_k + \frac{1}{2}[Y_{abc}][V_{abcg}]_k - [IT_{abc}^F] \quad (4)$$

$$[V_{abcg}]_i = [V_{abcg}]_k + [Z_{abc}][I_{L_{abc}}]_k \quad (5)$$

Substituindo (4) em (5):

$$[V_{abcg}]_i = [aux_1][V_{abcg}]_k + [aux_2][I_{abc}]_k - [aux_2][IT_{abc}^F] \quad (6)$$

Onde as variáveis auxiliares  $[aux_1]$  e  $[aux_2]$  são:

$$[aux_1] = [I_{ident}] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}]; [aux_2] = [Z_{abc}]$$

$$[I_{ident}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A corrente de entrada no segmento de linha é dada pela Equação 7:

$$[I_{abc}]_i = [I_{L_{abc}}]_k + \frac{1}{2}[Y_{abc}][V_{abcg}]_i \quad (7)$$

Substituindo (4) em (7) vem:

$$[I_{abc}]_i = [I_{abc}]_k + \frac{1}{2}[Y_{abc}][V_{abcg}]_k - [IT_{abc}^F] + \frac{1}{2}[Y_{abc}][V_{abcg}]_i \quad (8)$$

Substituindo (6) em (8):

$$[I_{abc}]_i = [aux_3][V_{abcg}]_k + [aux_4][I_{abc}]_k - [aux_4][IT_{abc}^F] \quad (9)$$

Onde as variáveis auxiliares  $[aux_3]$  e  $[aux_4]$  são:

$$[aux_3] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4}[Y_{abc}][Z_{abc}]; [aux_4] = [I_{ident}] + \frac{1}{2}[Y_{abc}][Z_{abc}]$$

As equações (6) e (9) em forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} [V_{abcg}]_i \\ [I_{abc}]_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [aux_1] & [aux_2] \\ [aux_3] & [aux_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_{abcg}]_k \\ [I_{abc}]_k - [IT_{abc}^F] \end{bmatrix} \quad (10)$$

A Equação (10) pode ser usada para obter as tensões e correntes no barramento "k" salvo as devidas considerações:

As variáveis auxiliares  $[aux_1]$ ,  $[aux_2]$ ,  $[aux_3]$  e  $[aux_4]$  podem mudar de acordo com o fechamento e configuração nos lados de alta e baixa tensão e podem ser calculadas de acordo com Kersting (2017).

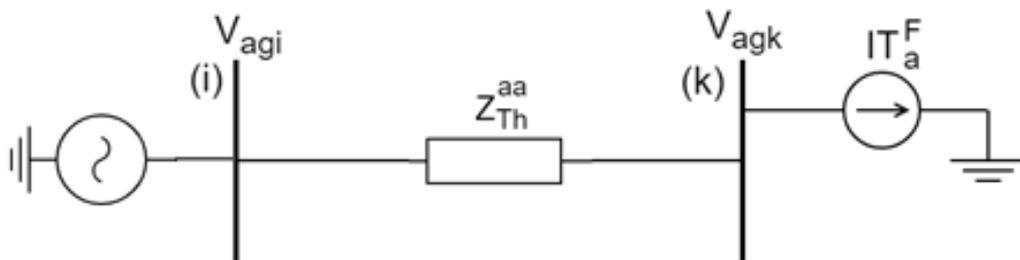
Este método é mais geral do que a técnica convencional de passos *backward/forward*, pois se a condição  $[IT_{abc}^F] = [0]$  for imposta, será obtida a mesma equação do método convencional para o cálculo de fluxo de carga para tensões e correntes.

A seguir, as equações do método proposto são demonstradas para o cálculo *shunt* dos tipos de curto-circuitos: monofásico-terra, bifásico-terra, trifásico-terra, trifásico e bifásico.

### 3.1. Falta monofásica-terra

A Figura 19 mostra um sistema equivalente com uma fonte de tensão no barramento "i" e a impedância de Thévenin vista do barramento "k", que é representada através da equação (11):

$$[Z_{Th}] = [Z_{Th}^{aa}] \quad (11)$$



Fonte: Autoria própria, 2021.

De acordo com a figura 19, se uma tensão  $V_{ag_k}$  é conhecida, pode-se calcular a corrente  $IT_a^F$  usando o teorema de superposição pela equação (12).

$$IT_a^F = \frac{V_{ag_k}}{Z_{Th}^{aa}} \quad (12)$$

Uma forma de simular a falta fase-terra na barra “k”, é utilizar a fonte de corrente, dentro do processo iterativo *backward/forward*, para calcular a tensão da barra “k” até que a condição de curto-circuito seja alcançada. Então, quando a tensão  $V_{ag_k}$  tende a zero, a corrente  $IT_a^F$  tenderá a zero também.

A variação da tensão da barra “k” implica na variação da fonte de corrente. Portanto, a atualização da fonte de corrente é calculada através da equação (13), onde “j” é a iteração real.

$$IT1_a^{F(j)} = IT1_a^{F(j-1)} + IT_a^{F(j)} \quad (13)$$

Os valores das submatrizes auxiliares tomando a equação (10) como referência são:

$[aux_1] = [1] + \frac{1}{2}[Z_{Th}^{aa}][Y_{Th}^{aa}] = [1]$  pois  $[Y_{Th}^{abc}] = [0]$ . Assim o efeito capacitivo é desprezado;

$[aux_2] = [Z_{Th}^{aa}]$ , que é a impedância de Thévenin vista da barra “k” no curto-circuito;

$[aux_3] = [0]$ , porque o efeito capacitivo é desprezado;

$[aux_4] = [1]$

Portanto, a equação do passo *forward* é dada pela equação (14).

$$V_{ag_i} = V_{ag_k} + Z_{Th}^{aa} IT1_a^F \quad (14)$$

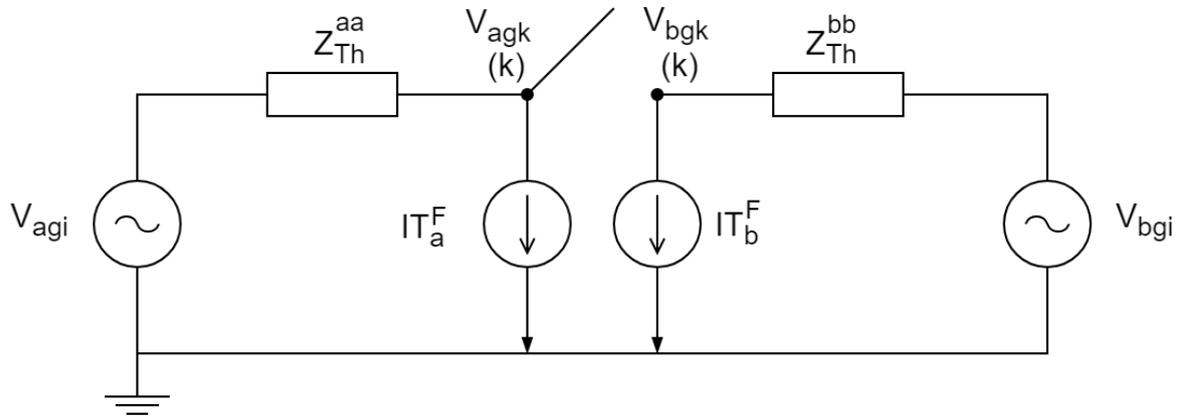
E a equação (15) fornece a equação do passo *backward*.

$$V_{ag_k} = E_a^{ref} - Z_{Th}^{aa} IT1_a^F \quad (15)$$

### 3.2. Falta bifásica-terra

A falta do tipo bifásica-terra tem característica assimétrica, devido ao desequilíbrio, e o cálculo da corrente neste tipo de falha requer duas fontes de correntes, pois a corrente de curto-circuito em cada fase pode assumir valores diferentes. Essas duas fontes de corrente, para o cálculo da falta das linhas a terra nas fases “a” e “b” da barra “k”, são mostradas na figura 20.

Figura 20 - Falta para circuito simples bifásica-terra.



Fonte: Autoria própria, 2021.

De acordo com a figura 20, as fontes iterativas de corrente são calculadas, similarmente ao item 3.1, pelas equações (16) e (17).

$$IT_a^F = \frac{V_{agk}}{Z_{Th}^{aa}} \quad (16)$$

$$IT_b^F = \frac{V_{bgk}}{Z_{Th}^{bb}} \quad (17)$$

As equações (18) e (19) são utilizadas para atualização das fontes iterativas de corrente, da mesma forma que no item 3.1.

$$IT1_a^{F(j)} = IT1_a^{F(j-1)} + IT_a^{F(j)} \quad (18)$$

$$IT1_b^{F(j)} = IT1_b^{F(j-1)} + IT_b^{F(j)} \quad (19)$$

Neste caso, as submatrizes da equação (10) são:

$$[aux_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; [aux_2] = \begin{bmatrix} Z_{Th}^{aa} & Z_{Th}^{ab} \\ Z_{Th}^{ba} & Z_{Th}^{bb} \end{bmatrix}; [aux_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } [aux_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Portanto, as equações para o passo *forward* são:

$$V_{agi} = V_{agk} + Z_{Th}^{aa} IT1_a^F + Z_{Th}^{ab} IT1_b^F \quad (20)$$

$$V_{bgi} = V_{bgk} + Z_{Th}^{ba} IT1_a^F + Z_{Th}^{bb} IT1_b^F \quad (21)$$

Então, as equações para o passo *backward* são representadas pelas equações (22) e (23).

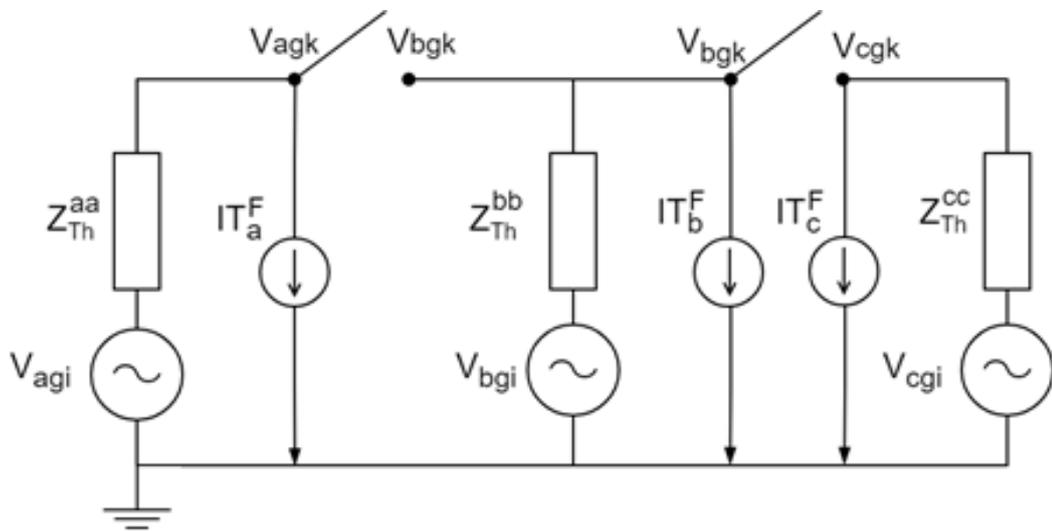
$$V_{agk} = E_a^{ref} - Z_{Th}^{aa} IT1_a^F - Z_{Th}^{ab} IT1_b^F \quad (22)$$

$$V_{bg_k} = E_b^{ref} - Z_{Th}^{ba} IT_1^F - Z_{Th}^{bb} IT_1^F \quad (23)$$

### 3.3. Falta trifásica-terra

Neste caso, se faz necessário o uso de três fontes iterativas de corrente para a falta trifásica-terra, pois as correntes de curto-circuito podem ser diferentes nas três fases, conforme mostrado na figura 21, as três barras também são aterradas individualmente.

Figura 21 - Circuito para falta trifásica-terra.



Fonte: Autoria própria, 2021.

De acordo com a figura 21, as fontes iterativas de corrente são obtidas de forma semelhante ao item 3.1 através do teorema da superposição.

$$IT_a^F = \frac{V_{ag_k}}{Z_{Th}^{aa}} \quad (24)$$

$$IT_b^F = \frac{V_{bg_k}}{Z_{Th}^{bb}} \quad (25)$$

$$IT_c^F = \frac{V_{cg_k}}{Z_{Th}^{cc}} \quad (26)$$

De forma semelhante ao item 3.1, as seguintes equações são utilizadas para atualizar as fontes de corrente iterativas:

$$IT_1^{F(j)} = IT_1^{F(j-1)} + IT_a^{F(j)} \quad (27)$$

$$IT1_b^{F(j)} = IT1_b^{F(j-1)} + IT_b^{F(j)} \quad (28)$$

$$IT1_c^{F(j)} = IT1_c^{F(j-1)} + IT_c^{F(j)} \quad (29)$$

Nesse caso, as submatrizes auxiliares da equação (10) são dadas por:

$$[aux_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [aux_2] = \begin{bmatrix} Z_{Th}^{aa} & Z_{Th}^{ab} & Z_{Th}^{ac} \\ Z_{Th}^{ba} & Z_{Th}^{bb} & Z_{Th}^{bc} \\ Z_{Th}^{ca} & Z_{Th}^{cb} & Z_{Th}^{cc} \end{bmatrix}; [aux_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } [aux_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Assim, as equações do passo *forward* são:

$$V_{ag_i} = V_{ag_k} + Z_{Th}^{aa}IT1_a^F + Z_{Th}^{ab}IT1_b^F + Z_{Th}^{ac}IT1_c^F \quad (30)$$

$$V_{bg_i} = V_{bg_k} + Z_{Th}^{ba}IT1_a^F + Z_{Th}^{bb}IT1_b^F + Z_{Th}^{bc}IT1_c^F \quad (31)$$

$$V_{cg_i} = V_{cg_k} + Z_{Th}^{ca}IT1_a^F + Z_{Th}^{cb}IT1_b^F + Z_{Th}^{cc}IT1_c^F \quad (32)$$

E as equações do passo *backward* são:

$$V_{ag_k} = E_a^{ref} - Z_{Th}^{aa}IT1_a^F - Z_{Th}^{ab}IT1_b^F - Z_{Th}^{ac}IT1_c^F \quad (33)$$

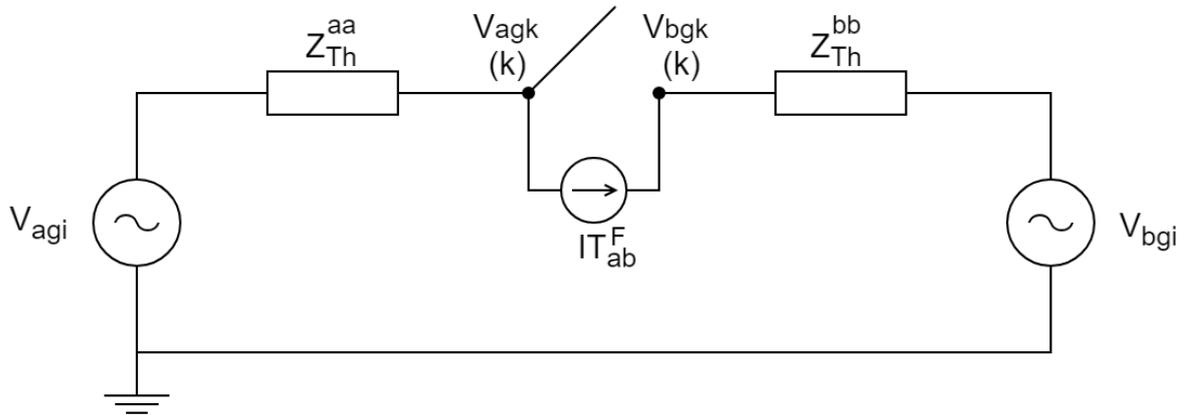
$$V_{bg_k} = E_b^{ref} - Z_{Th}^{ba}IT1_a^F - Z_{Th}^{bb}IT1_b^F - Z_{Th}^{bc}IT1_c^F \quad (34)$$

$$V_{cg_k} = E_c^{ref} - Z_{Th}^{ca}IT1_a^F - Z_{Th}^{cb}IT1_b^F - Z_{Th}^{cc}IT1_c^F \quad (35)$$

### 3.4. Falta bifásica

Em uma falta do tipo bifásica, a corrente que flui entre as duas fases em curto-circuito é a mesma. A única diferença entre as duas correntes é o ângulo da corrente. As duas fontes têm direções opostas, como mostra a figura 22.

Figura 22 – Circuito para falta bifásica.



Fonte: Autoria própria, 2021.

De acordo com a figura 22, as fontes de corrente iterativas foram calculadas usando as seguintes equações:

$$V_{ab} = V_{ag_k} - V_{bg_k} \quad (36)$$

$$Z_{Th} = Z_{Th}^{aa} + Z_{Th}^{bb} \quad (37)$$

$$IT_a^F = \frac{V_{ab}}{Z_{Th}} \quad (38)$$

$$IT_b^F = -IT_a^F \quad (39)$$

A seguinte equação é usada para atualizar a fonte de corrente iterativa:

$$IT1_a^{F(j)} = IT1_a^{F(j-1)} + IT_a^{F(j)} \quad (40)$$

Neste caso, as submatrizes auxiliares nas Eqs. (10) são calculados da seguinte forma:

$$[aux_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; [aux_2] = \begin{bmatrix} Z_{Th}^{aa} & Z_{Th}^{ab} \\ Z_{Th}^{ba} & Z_{Th}^{bb} \end{bmatrix}; [aux_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } [aux_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Portanto, as equações de varredura para o passo *forward* são dadas por (41) e (42).

$$V_{ag_i} = V_{ag_k} + (Z_{Th}^{aa} - Z_{Th}^{ab})IT1_a^F \quad (41)$$

$$V_{bg_i} = V_{bg_k} + (Z_{Th}^{ba} - Z_{Th}^{bb})IT1_b^F \quad (42)$$

As equações de varredura para o passo *backward* são dadas por:

$$V_{ag_k} = E_a^{ref} - (Z_{Th}^{aa} - Z_{Th}^{ab})IT1_a^F \quad (43)$$

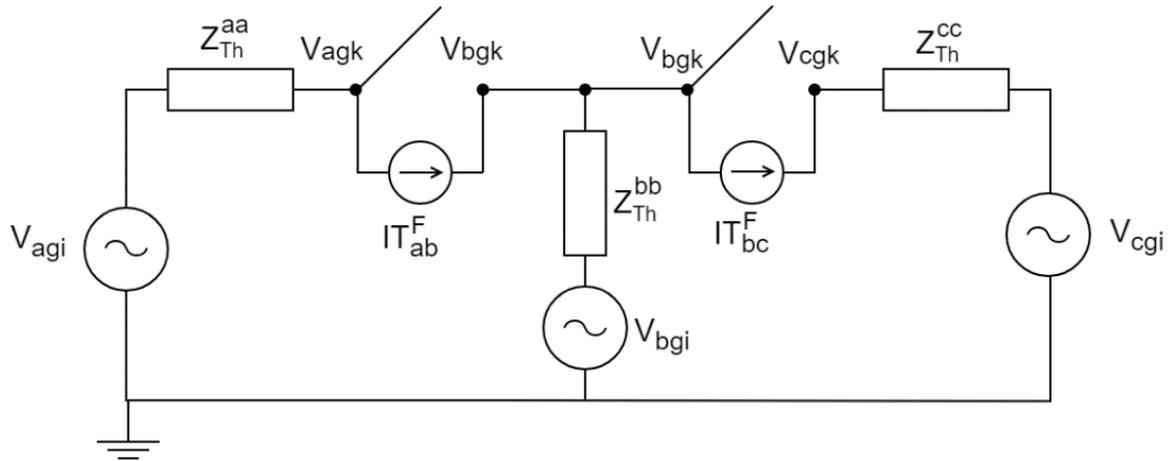
$$V_{bg_k} = E_b^{ref} - (Z_{Th}^{ba} - Z_{Th}^{bb})IT_1^F \quad (44)$$

### 3.5. Falta trifásica

Conforme mostrado na figura 23, no caso de falta trifásica, uma fase serve como retorno de corrente para as outras duas fases. A principal mudança em relação a outros tipos de curto-circuito é apresentada na eq. (45).

$$IT_c^F = -(IT_a^F + IT_b^F) \quad (45)$$

Figura 23 – Circuito para falta trifásica.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Portanto, as equações para as fontes de corrente iterativas são calculadas usando as seguintes equações:

$$V_{ab} = V_{ag_k} - V_{bg_k} \quad (46)$$

$$Z_{Th_{ab}} = Z_{Th}^{aa} + Z_{Th}^{bb} \quad (47)$$

$$IT_{ab}^F = \frac{V_{ab}}{Z_{Th_{ab}}} \quad (48)$$

$$V_{bc} = V_{bg_k} - V_{cg_k} \quad (49)$$

$$Z_{Th_{bc}} = Z_{Th}^{bb} + Z_{Th}^{cc} \quad (50)$$

$$IT_{bc}^F = \frac{V_{bc}}{Z_{Th_{bc}}} \quad (51)$$

As equações (52) e (53) são utilizadas para atualizar as fontes de corrente iterativas como nos itens anteriores.

$$IT1_{ab}^{F(j)} = IT1_{ab}^{F(j-1)} + IT_a^{F(j)} \quad (52)$$

$$IT1_{bc}^{F(j)} = IT1_{bc}^{F(j-1)} + IT_{bc}^{F(j)} \quad (53)$$

Neste caso, as submatrizes auxiliares nas eqs. (10) são:

$$[aux_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [aux_2] = \begin{bmatrix} Z_{Th}^{aa} & Z_{Th}^{ab} & Z_{Th}^{ac} \\ Z_{Th}^{ba} & Z_{Th}^{bb} & Z_{Th}^{bc} \\ Z_{Th}^{ca} & Z_{Th}^{cb} & Z_{Th}^{cc} \end{bmatrix}; [aux_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } [aux_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Assim, as equações para o passo *forward* direta são:

$$\begin{aligned} V_{ag_i} &= V_{ag_k} + Z_{Th}^{aa}IT1_a^F + Z_{Th}^{ab}IT1_b^F - Z_{Th}^{ac}IT1_a^F - Z_{Th}^{ac}IT1_b^F \\ &= V_{ag_k} + (Z_{Th}^{aa} - Z_{Th}^{ac})IT1_a^F + (Z_{Th}^{ab} - Z_{Th}^{ac})IT1_b^F \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} V_{bg_i} &= V_{bg_k} + Z_{Th}^{ba}IT1_a^F + Z_{Th}^{bb}IT1_b^F - Z_{Th}^{bc}IT1_a^F - Z_{Th}^{bc}IT1_b^F \\ &= V_{bg_k} + (Z_{Th}^{ba} - Z_{Th}^{bc})IT1_a^F + (Z_{Th}^{bb} - Z_{Th}^{bc})IT1_b^F \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} V_{cg_i} &= V_{cg_k} + Z_{Th}^{ca}IT1_a^F + Z_{Th}^{cb}IT1_b^F - Z_{Th}^{cc}IT1_a^F - Z_{Th}^{cc}IT1_b^F \\ &= V_{cg_k} + (Z_{Th}^{ca} - Z_{Th}^{cc})IT1_a^F + (Z_{Th}^{cb} - Z_{Th}^{cc})IT1_b^F \end{aligned} \quad (56)$$

As equações para o passo *backward* são dadas pelas eqs. (57), (58) e (59).

$$V_{ag_k} = E_a^{ref} - (Z_{Th}^{aa} - Z_{Th}^{ac})IT1_a^F - (Z_{Th}^{ab} - Z_{Th}^{ac})IT1_b^F \quad (57)$$

$$V_{bg_k} = E_b^{ref} - (Z_{Th}^{ba} - Z_{Th}^{bc})IT1_a^F - (Z_{Th}^{bb} - Z_{Th}^{bc})IT1_b^F \quad (58)$$

$$V_{cg_k} = E_c^{ref} - (Z_{Th}^{ca} - Z_{Th}^{cc})IT1_a^F - (Z_{Th}^{cb} - Z_{Th}^{cc})IT1_b^F \quad (59)$$

Um fluxograma geral do novo método é mostrado na figura 24.



Com as modelagens e equações matemáticas definidas para os tipos cinco de faltas tratados anteriormente e de posse dos dados e parâmetros necessários e intrínsecos aos sistemas de barras em estudo, foi realizado a adequação para enquadramento dentro das rotinas computacionais elaboradas no *software* MATLAB por se tratar de um programa interativo de alta performance desenvolvido para a elaboração de cálculos numéricos. Os resultados obtidos após aplicação do método, serão apresentados no tópico a seguir.

## 4. RESULTADOS

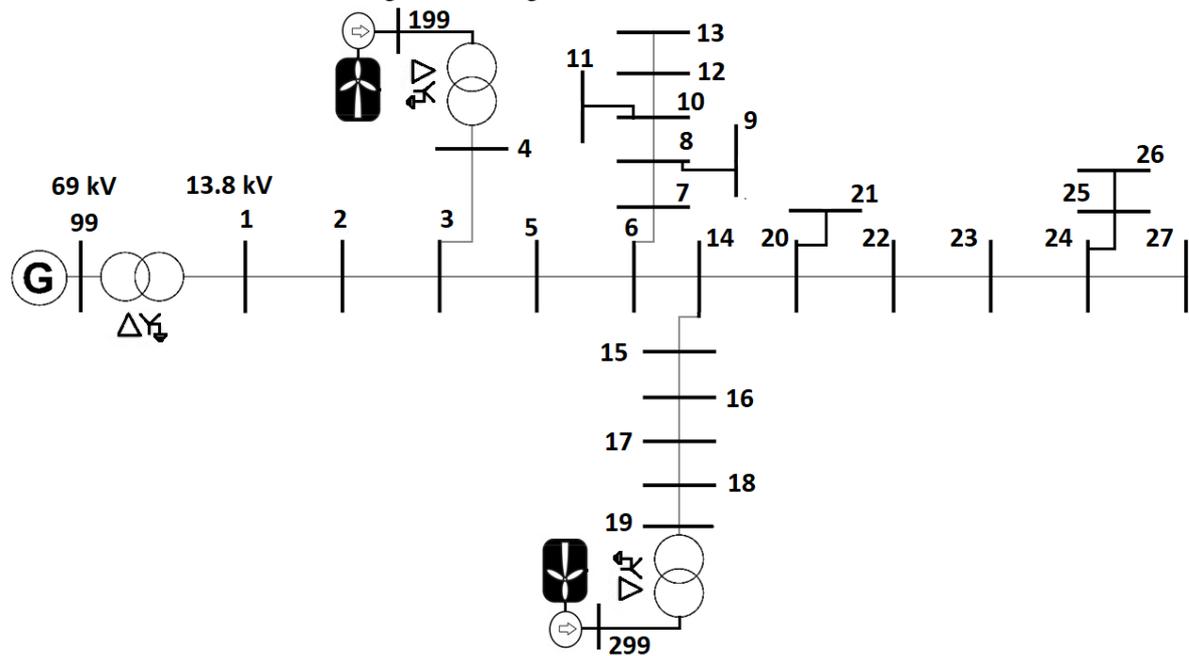
Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método em sistemas de barras com variados graus de complexidade, além de diferentes tipos de geração de energia dentro dos sistemas elétricos de potência, bem como as análises e discussões desses resultados.

O método proposto foi validado através das comparações de resultados de correntes de curto-circuito, entre os cinco tipos de falta: fase-terra, bifásica, bifásica-terra, trifásica e trifásica-terra, obtidos entre o método desenvolvido e os *softwares* padrões, por meio de simulações de sistemas de barras utilizando o método das componentes simétricos e o método das componentes de fase. Inicialmente, de posse dos parâmetros característicos do sistema em questão, foi simulado uma microrrede rural de 30 barras com a aplicação do método proposto pelo trabalho e comparado com os resultados do programa comercial ANAFAS aplicado ao mesmo sistema.

### 4.1. Resultados para a microrrede rural MG-30

A microrrede usada foi denominada MG-30 e é parte do sistema de distribuição da Companhia Energética do Ceará - Brasil. Ela tem 30 barramentos e 33 ramais, e sua potência de curto-circuito trifásico é de  $506 \angle 59,2^\circ$  MVA. A subestação transformadora é aterrada em estrela delta e seus dados são: 69/13,8 kV - 6% na base do sistema (100 MVA, 13,8 kV). O parque eólico conectado ao barramento de número 4 é do tipo 4 (gerador síncrono com conversor *back-to-back*) com 20 unidades de minigeradores de 95 kW totalizando 1,9 MW (fator de potência = 1) de potência nominal, e o parque eólico conectado ao barramento 19 é um tipo 1 (gerador de indução em gaiola de esquilo) com 10 unidades de minigeradores de 95 kW totalizando 0,95 MW. Os dados do minigerador são fornecidos pela fabricante WEG S.A, multinacional brasileira. O diagrama unifilar do alimentador MG-30 é mostrado na figura 25.

Figura 25 - Diagrama da microrrede MG-30.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Neste caso, as correntes de curto-circuito nas barras 2, 10 e 27 foram avaliadas com o objetivo de calcular os valores das correntes de falta em pontos bem distintos da MG-30. Os resultados, para ambos os métodos, da simulação das correntes de curto-circuito para as barras 2, 10 e 27 da microrrede MG-30 são mostrados na tabela 1 para os cinco tipos de falta: trifásica-terra (LLLG); trifásica (LLL); bifásica-terra (LLG); bifásica (LL) e fase-terra (LG).

Tabela 1 – Resultados das correntes de falta para os cinco tipos de faltas nas barras 2, 10 e 27.

Tipo de falta / Método	UFLF Corrente de falta (A)			ANAFAS – CEPEL Corrente de falta (A)			Erro (%)		
	A	B	C	A	B	C			
<b>Barra 2</b>									
LLLG	17272.5	17272.5	17272.5	17273	17273	17273	0.0029	0.0029	0.0029
LLL	17272.5	17272.5	17272.5	17273	17273	17273	0.0029	0.0029	0.0029
LLG	16240.3	16288.5	0	16240	16289	0	-0.0018	0.0031	0
LL	15005.4	15005.4	0	15005	15005	0	-0.0027	-0.0027	0
LG	14682.7	0	0	14683	0	0	0.0020	0	0
<b>Barra 10</b>									
LLLG	1390.8	1390.8	1390.8	1391	1391	1391	0.0144	0.0144	0.0144
LLL	1390.8	1390.8	1390.8	1391	1391	1391	0.0144	0.0144	0.0144
LLG	1101.1	1448.3	0	1101	1448	0	-0.0091	-0.0207	0
LL	1203.9	1203.9	0	1204	1204	0	0.0083	0.0083	0
LG	1119.4	0	0	1119	0	0	-0.0360	0	0
<b>Barra 27</b>									
LLLG	2644.1	2644.1	2644.1	2644	2644	2644	-0.0038	-0.0038	-0.0038
LLL	2644.1	2644.1	2644.1	2644	2644	2644	-0.0038	-0.0038	-0.0038
LLG	2132.1	2606.9	0	2132	2607	0	-0.0047	0.0038	0
LL	2288.6	2288.6	0	2289	2289	0	0.0175	0.0175	0
LG	1784.1	0	0	1784	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria, 2021.

Na tabela 1, é possível observar que todos os resultados das correntes de falta para as barras 2, 10 e 27 obtidas pelo método unificado para análise de faltas e fluxo de carga (UFLF) estão próximos dos resultados obtidos pelo *software* comercial ANAFAS. Além disso, nota-se que o maior erro foi calculado na barra 10 com o tipo de falta fase-terra (LG), atingindo um erro percentual com valor absoluto de 0,0360, que representa uma diferença de 0,4 A. Portanto, conclui-se que os resultados do novo método são eficazes.

#### **4.2. Resultados para os alimentadores de teste 13 e 123 barras IEEE**

Em 1991 o grupo de trabalho de planejamento de distribuição IEEE, publicou um artigo fornecendo os dados para quatro alimentadores de teste de um sistema de distribuição. Cada um dos alimentadores de teste originais tinha características especiais que forneciam um teste para a precisão dos modelos de componentes de distribuição e as características de convergência do programa de análise de fluxo de potência que estava sendo testado.

O propósito dos alimentadores de teste era proporcionar aos desenvolvedores de *softwares* um conjunto comum de dados que pudessem ser usados para verificar a correção de seus programas de análise de fluxo de energia. O alimentador de teste de 13 barras forneceu um bom teste de convergência de um programa para um sistema muito desequilibrado, e o alimentador de teste de 123 barras se apresenta como um grande sistema que consiste em fases monofásicas aéreas e subterrâneas, laterais bifásicas e trifásicas, juntamente com reguladores de tensão de passo e capacitores de derivação (IEEE, 1991).

A partir disto, um método para analisar correntes de curto-circuito para alimentadores radiais de distribuição foi delineado. O programa de análise de curto-circuito deve ser capaz de analisar todos os tipos possíveis de curto-circuito em todos os nós. As correntes de curto-circuito para o alimentador de teste IEEE 13 barras foram calculados usando RDAP e Windmil (KERSTING; SHIREK, 2012). As figuras 26 e 27 mostram os diagramas dos alimentadores de teste IEEE 13 e 123 barras, respectivamente.



Os sistemas de alimentadores de teste IEEE 13 e 123 barras foram simulados, e os resultados foram comparados com os apresentados por IEEE (2011) obtidos por meio do programa computacional RDAP/WindMil®, com base na análise via componentes de fase. Assim, o novo método pode ser validado através dos resultados obtidos pela comunidade científica internacional.

Nas simulações realizadas com os alimentadores de teste IEEE, tanto o sistema IEEE de 13 barras como também o IEEE 123 barras, é importante ressaltar a difícil representação e modelagem em componentes simétricas devido a presença de linhas não transpostas e ramificações bifásicas e monofásicas.

De acordo com IEEE (2011) as faltas simuladas para obtenção dos dados através do programa computacional RDAP/WindMil® foram: fase-terra, bifásica-terra, bifásica, trifásica-terra e trifásica.

### 4.3. Resultados da análise da falta fase-terra para o alimentador de teste IEEE 13 barras

Para o caso da falta fase-terra, o maior erro em valor absoluto observado relacionado ao RDAP/WindMil® foi de 0,006%, correspondendo a falta na barra 652 (1795,7 A), o que equivale a uma diferença de corrente de apenas 0,1 A na fase “A”, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das correntes de curto para o tipo de falta monofásica no alimentador de teste IEEE 13 barras

Nó	Fases	Novo Método			WindMil®			Erro (%)		
		Falta Monofásica (A)			Falta Monofásica (A)					
		A	B	C	A	B	C			
<b>RG60</b>	<b>ABC</b>	8479	8479	8479	8479	8479	8479	0,000	0,000	0,000
<b>692</b>	<b>ABC</b>	2196.3	2156.9	2173.9	2196.3	2156.9	2173.9	0,000	0,000	0,000
<b>684</b>	<b>AC</b>	2019.5	0	2001.7	2019.4	0	2001.7	-0,005	-	0,000
<b>680</b>	<b>ABC</b>	1851.8	1817	1832	1851.8	1817	1832	0,000	0,000	0,000
<b>675</b>	<b>ABC</b>	2076.9	2049.9	2057.5	2076.8	2049.8	2057.5	-0,005	-0,005	0,000
<b>671</b>	<b>ABC</b>	2196.3	2156.9	2173.9	2196.3	2156.9	2173.9	0,000	0,000	0,000
<b>652</b>	<b>A</b>	1795.7	0	0	1795.6	0	0	-0,006	-	-
<b>646</b>	<b>BC</b>	0	2516.4	2524.2	0	2516.5	2524.2	-	0,004	0,000
<b>645</b>	<b>BC</b>	0	2806.4	2817.8	0	2806.5	2817.8	-	0,004	0,000
<b>634</b>	<b>ABC</b>	13046	12962	12985.7	13046	12962	12986	0,000	0,000	0,002
<b>633</b>	<b>ABC</b>	2950.5	2910.27	2921.7	2950.5	2910.3	2921.7	0,000	0,001	0,000
<b>632</b>	<b>ABC</b>	3495.4	3444.3	3466.4	3495.4	3444.4	3466.4	0,000	0,003	0,000
<b>611</b>	<b>C</b>	0	0	1852	0	0	1852	-	-	0,000

Fonte: Autoria própria, 2021.

#### 4.4. Resultados da análise da falta bifásica para o alimentador de teste IEEE 13 barras

No comparativo entre os valores apresentados nas tabelas 3 e 4 a seguir, é possível observar que o maior erro notado que ocorreu no tipo de falta bifásica, teve origem na barra reguladora de tensão, com uma diferença percentual de 0,01%, como mostra a tabela 05, equivalente a um valor de 0,74 A.

Tabela 3 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta bifásica no alimentador de teste IEEE 13 barras para o novo método.

Nó	Fases	Novo Método								
		Falta Bifásica (A)								
		Falta em AB			Falta em BC			Falta em CA		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
<b>RG60</b>	<b>ABC</b>	7288.46	7288.46	0	0	7288.46	7288.46	7288.46	0	7288.46
<b>692</b>	<b>ABC</b>	2938.3	2938.3	0	0	2599.5	2599.5	2734.9	0	2734.9
<b>684</b>	<b>AC</b>	0	0	0	0	0	0	2517.6	0	2517.6
<b>680</b>	<b>ABC</b>	2554.8	2554.8	0	0	2238.5	2238.5	2364.2	0	2364.2
<b>675</b>	<b>ABC</b>	2751.8	2751.8	0	0	2455.6	2455.6	2551.8	0	2551.8
<b>671</b>	<b>ABC</b>	2938.3	2938.3	0	0	2599.5	2599.5	2734.9	0	2734.9
<b>652</b>	<b>A</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>646</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	2881.6	2881.6	0	0	0
<b>645</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	3191	3191	0	0	0
<b>634</b>	<b>ABC</b>	13235	13235	0	0	12782	12782	13056	0	13056
<b>633</b>	<b>ABC</b>	3586	3586	0	0	3298.3	3298.3	3469.1	0	3469.1
<b>632</b>	<b>ABC</b>	4195	4195	0	0	3835.8	3835.8	3982	0	3982
<b>611</b>	<b>C</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 4 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta bifásica no alimentador de teste IEEE 13 barras para o método WindMil®.

Nó	Fases	WindMil®								
		Falta Bifásica (A)								
		Falta em AB			Falta em BC			Falta em CA		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
<b>RG60</b>	<b>ABC</b>	7289.2	7289.2	0	0	7289.2	7289.2	7288.7	0	7288.7
<b>692</b>	<b>ABC</b>	2938.4	2938.4	0	0	2599.6	2599.6	2734.9	0	2734.9
<b>684</b>	<b>AC</b>	0	0	0	0	0	0	2517.6	0	2517.6
<b>680</b>	<b>ABC</b>	2554.9	2554.9	0	0	2238.6	2238.6	2364.2	0	2364.2
<b>675</b>	<b>ABC</b>	2751.9	2751.9	0	0	2455.7	2455.7	2551.9	0	2551.9
<b>671</b>	<b>ABC</b>	2938.4	2938.4	0	0	2599.6	2599.6	2734.9	0	2734.9
<b>652</b>	<b>A</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>646</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	2881.7	2881.7	0	0	0
<b>645</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	3191.2	3191.2	0	0	0
<b>634</b>	<b>ABC</b>	13236	13236	0	0	12782	12782	13057	0	13057
<b>633</b>	<b>ABC</b>	3586.2	3586.2	0	0	3298.5	3298.5	3469.1	0	3469.1





Fonte: Autoria própria, 2021.

#### 4.6. Resultados da análise da falta trifásica para o alimentador de teste IEEE 13 barras

Para a falta simétrica do tipo trifásica, o maior erro em valor absoluto foi registrado na fase “A” nas barras 692 e 671 (3350,3 A), com valor de 0,006%, correspondendo a uma diferença de 0,2 A, conforme é possível observar na tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta trifásica no alimentador de teste IEEE 13 barras.

Nó	Fases	Novo Método			WindMil®			Erro		
		Falta Trifásica (A)			Falta Trifásica (A)			(%)		
		A	B	C	A	B	C			
<b>RG60</b>	<b>ABC</b>	8415.99	8415.99	8415.99	8416.3	8416.3	8416.3	0,004	0,004	0,004
<b>692</b>	<b>ABC</b>	3350.3	3271.4	2964.7	3350.1	3271.4	2964.7	-0,006	0,000	0,000
<b>684</b>	<b>AC</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-
<b>680</b>	<b>ABC</b>	2909.7	2839.4	2549.6	2909.6	2839.3	2549.7	-0,003	-0,004	0,004
<b>675</b>	<b>ABC</b>	3120.9	3088.7	2778.2	3120.8	3088.6	2778.3	-0,003	-0,003	0,004
<b>671</b>	<b>ABC</b>	3350.3	3271.4	2964.7	3350.1	3271.4	2964.7	-0,006	0,000	0,000
<b>652</b>	<b>A</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-
<b>646</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-
<b>645</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-
<b>634</b>	<b>ABC</b>	15276	15135	14720	15276	15135	14720	0,000	0,000	0,000
<b>633</b>	<b>ABC</b>	4150	4023	3802.3	4150.2	4023.2	3802.5	0,005	0,005	0,005
<b>632</b>	<b>ABC</b>	4801.1	4704.9	4392	4800.9	4704.9	4392.1	-0,004	0,000	0,002
<b>611</b>	<b>C</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-

Fonte: Autoria própria, 2021.

#### 4.7. Resultados da análise da falta trifásica-terra para o alimentador de teste IEEE 13 barras

Os últimos dados apresentados na tabela 10 são relativos as simulações no sistema alimentador de teste IEEE 13 barras para a falta do tipo trifásica-terra, e apontam o maior erro registrado na barra reguladora de tensão RG60, com um valor de 0,01%, correspondendo a uma diferença de 0,8A. Dessa maneira, em todos os casos e tipos de faltas vistos até aqui, o método apresentou exatidão e precisão.

Tabela 10 - Resultados das correntes de curto para o tipo de falta trifásica-terra no alimentador de teste IEEE 13 barras.

Nó	Fases	Novo Método			WindMil®			Erro		
		Falta Trifásica-terra (A)			Falta Trifásica-terra (A)			(%)		
		A	B	C	A	B	C			

<b>RG60</b>	<b>ABC</b>	8416	8416	8416	8416.8	8416.8	8416.8	0,010	0,010	0,010
<b>692</b>	<b>ABC</b>	3317.4	3268	3009.5	3317.1	3268.0	3009.6	-0,009	0,000	0,003
<b>684</b>	<b>AC</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-
<b>680</b>	<b>ABC</b>	2880.5	2836.8	2589.5	2880.3	2836.7	2589.6	-0,007	- 0,004	0,004
<b>675</b>	<b>ABC</b>	3091.5	3086.9	2816.3	3091.3	3086.9	2816.4	-0,006	0,000	0,004
<b>671</b>	<b>ABC</b>	3317.4	3268	3009.5	3317.1	3268.0	3009.6	-0,009	0,000	0,003
<b>652</b>	<b>A</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-
<b>646</b>	<b>BC</b>		0	0	0	0	0		-	-
<b>645</b>	<b>BC</b>	0	0	0	0	0		-	-	
<b>634</b>	<b>ABC</b>	15190	15149	14796	15191	15150	14796	0,007	0,007	0,000
<b>633</b>	<b>ABC</b>	4115.4	4028.2	3837	4115.4	4028.2	3837.0	0,000	0,000	0,000
<b>632</b>	<b>ABC</b>	4759	4698	4449.1	4758.8	4698.0	4449.2	-0,004	0,000	0,002
<b>611</b>	<b>C</b>	0	0	0	0	0	0	-	-	-

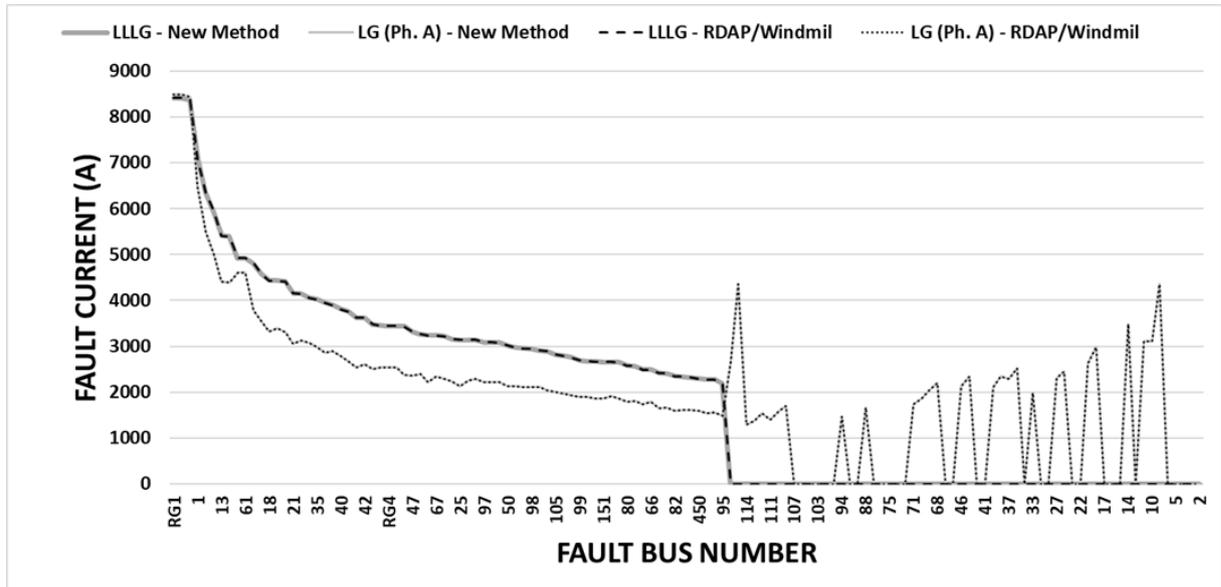
Fonte: Aatoria própria, 2021.

#### 4.8. Resultados da análise das faltas fase-terra e trifásica-terra para o alimentador de teste IEEE 123 barras

Por fim, o método proposto por este trabalho foi aplicado para simular o alimentador de teste IEEE de 123 barras. Este sistema possui maior dimensão e se apresenta como um grande sistema que consiste em fases monofásicas aéreas e subterrâneas, laterais bifásicas e trifásicas, juntamente com reguladores de tensão de passo e capacitores de derivação. Devido a estas características que dificultam a representação e análise de faltas via componentes simétricas, as correntes de curto-circuito para o alimentador de testes IEEE 123 barras foram calculados usando o *software* Windmil®, que baseia-se na análise de componentes de fase para estudo de análise de faltas. Os tipos de faltas analisados neste caso foram: falta fase-terra e trifásica-terra.

A figura 28 mostra o gráfico com as diversas simulações realizadas no alimentador de teste IEEE de 123 barras, e o erro tanto para a fase “A” da falta fase-terra quanto para a falta trifásica-terra foi inferior a 0,019%, e por este motivo, visualmente pode-se ver as linhas traçadas sobrescritas, o que comprova novamente a exatidão e acurácia do método, tornando válida assim, a sua aplicação, com resultados fidedignos.

Figura 28 – Resultados das aplicações do método em comparação com os dados apresentados por IEEE (2011) para o alimentador de teste IEEE 123 barras.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Com o fim das simulações e análise dos resultados apresenta-se no tópico a seguir as conclusões finais sobre o método apresentado neste trabalho e ideias a serem estudadas futuramente com base neste estudo.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A determinação das correntes de curto-circuito nos mais variados pontos de um determinado alimentador de distribuição é fundamental para outros estudos, como os de proteção, em sistemas de distribuição.

O fluxo de carga, por outro lado é uma ferramenta muito importante para se estudar como operar o sistema elétrico corretamente. Um novo método baseado na técnica iterativa de varredura de passos *backward/forward* com modelagem para simular o fluxo de carga e cálculos de curto-circuito foi desenvolvido neste estudo.

### 5.1. Considerações finais

O método proposto por este trabalho pode ser utilizado para simular microrredes não isoladas conectadas a redes elétricas. Os resultados numéricos do método UFLF foram comparados com os resultados do *software* comercial ANAFAS através da aplicação na microrrede MG-30, e com os resultados do RDAP/WindMil® através das simulações dos sistemas de alimentadores de teste de 13 e 123 barras do IEEE, onde foi possível mensurar o erro percentual, observando seu grau dentro de uma margem aceitável e confiável podendo assim ser considerado válido por meio de resultados conhecidos pela comunidade científica internacional.

Os resultados para a primeira aplicação do método na microrrede rural MG-30, em comparação com o programa comercial ANAFAS, apresentaram para os cinco tipos de falta nas barras 2, 10 e 27, erro percentual que variou dentro da margem de -0,0360% a 0,0175%, correspondente a valores de corrente entre 0,4 A a -0,4 A, respectivamente. Nos sistemas alimentadores de teste de 13 e 123 barras, sistemas com maior grau de complexidade, os resultados apresentados pelo método na falta fase-terra no sistema de 13 barras, expuseram um erro percentual que variou dentro da margem de -0,006% a 0,004%, correspondente a valores de corrente entre 0,1 A a -0,1 A, respectivamente. Para a falta bifásica, o erro percentual mostrou valor máximo de 0,010%, correspondente a um valor de corrente igual a 0,74 A. Já na falta bifásica-terra, o erro percentual variou dentro da margem de -0,007% a 0,010%, correspondente ao maior valor diferencial de corrente igual a 0,3. Ainda no sistema de 13 barras IEEE, o método apresentou erro que transitou entre -0,006% e 0,005%, correspondente a valores de corrente entre 0,2 A a -0,2 A aproximadamente, respectivamente. Por fim, o sistema

de 123 barras do IEEE, com grande dimensão, provou que o método pode ser aplicado em sistemas com grande complexidade, entregando resultados fidedignos, pois nos dois tipos de falta simulados o erro percentual esteve abaixo de 0,019%. Assim, o método proposto foi validado.

As simulações computacionais mostraram que o novo método é eficiente com boa acurácia mostrando erros sempre de ordem centesimal, além de possuir boa precisão, fácil de programar e se mostra como uma ferramenta de baixo custo, tendo em vista a otimização e minimização das rotinas computacionais com a unificação dos dois métodos. Portanto, com o método UFLF é possível simular condições de curto-circuito em redes de distribuição através de um algoritmo de cálculo de fluxo de carga, obtendo resultados exatos e com pouco uso da memória do computador, justificando assim a sua versatilidade além de mostrar-se como uma ferramenta vantajosa para a indústria de energia elétrica e também para estudos e análises no meio acadêmico.

## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação do método para finalidades e estudos mais específicos que podem ser desenvolvidos tomando como base o método unificado de análise de faltas e fluxo de carga. A princípio existia a perspectiva de utilização deste método para a localização de faltas em sistemas elétricos, sendo uma das proposições sugeridas, trabalhando métodos e formas de se calcular um dos parâmetros necessários para este fim, que é a resistência de falta no ponto. Outra recomendação para trabalho futuro é a aplicação deste método em sistemas elétricos mais complexos, que apresentem em suas características impedâncias mútuas e estas sejam consideradas nas matrizes de seus trechos de linhas.

## REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, Thomas. Wind Power in Power Systems. Sweden: Ed John Wiley and Sons, 2005.
- AHMADI M., FARSADI M.; HOSSEINI S. H. A New Method for Load Flow Analysis of Distribution Systems under Different Network Topologies, *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2021, pp. 334-339, doi: 10.23919/ELECO54474.2021.9677771.
- AUGUGLIARO, A. *et al.* A backward sweep method for power flow solution in distribution networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Palermo, v. 32, n. 4, p.271-280, Maio 2010.
- BALAMURUGAN, B; SRINIVASAN, D. Review of Power Flow Studies on Distribution Network with Distributed Generation. Singapore: IEEE Peds, v. 5, n. 8, December. 2011.
- BARBOSA, A. de S. **Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Aplicações Práticas**. 1995. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.
- BICHELS, A. Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução [Recurso eletrônico] / Arlei Bichels.– Curitiba: EDUTFPR, 2018. 497 p.: il. ; 23 cm. ISBN: 978-85-7014-208-5 (E-book)
- BROADWATER, R. P. et al. Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems. *Electric Power Systems Research*, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 23–33, Feb. 1988.
- BOMPARD, E.; CARPANETO, E.; CHICCO, G.; NAPOLI, R. Convergence of the backward/forward sweep method for the load-flow analysis of radial distribution systems, *Electrical Power and Energy Systems*, 2000.
- CARDOSO JUNIOR, G. *et al.* Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 215-229, jun. 2004.
- CARVALHO, M. R. **Estudo comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. ANAFAS - Análise de Faltas Simultâneas. Acesso em: 11 jan. 2023.
- CESPEDES, R. G. New Method for the Analysis of Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 391–396, Jan. 1990.

CHANG, G. W.; CHU, S. Y.; WANG, H. L. An Improved Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, May 2007, v. 2, n. 22, p.882-884.

CHANG, G. W.; CHU, S. Y.; WANG, H. L. A Simplified Forward and Backward Sweep Approach for Distribution System Load Flow Analysis, *Power System Technology*, 2006.

COSTA, H. **Sistema de proteção para microrredes utilizando unidades de medição fasorial**. 2019. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

DECOURT, P.C.K., **Facilidades do programa ANAFAS para estudos de curto-circuito e proteção de sistemas de energia elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

DRESCH, R. de F. V. **Análise do efeito da modelagem da carga nas estimativas de perdas elétricas em Sistemas de Distribuição**. 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FARROKHABADI, M. et al., "Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13-29, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2925703.

GUIMARÃES, C. H. C. *Sistemas Elétricos de Potência e seus Principais Componentes / Carlos Henrique Costa Guimarães - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2021. 222 p:il. ISBN: 978-85-399-0550-8*

HAMEED, F.; HOSANI, M. A.; SHAABAN, M. F.; SABER, A.; ZEINELDIN, H. H.; MENG, K. A meshed backward/forward sweep load flow method for islanded meshed microgrids. **International Transactions On Electrical Energy Systems**, [S.L.], v. 31, n. 11, 26 set. 2021. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1002/2050-7038.13127>.

HOOSHYAR, H.; VANFRETTI, L. Multiphase Unbalanced Power Flow and Fault Analysis of Distribution Networks with High Penetration of Inverter-Interfaced DERs, *IEEE Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, 2015.

IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial distribution test feeders", *IEEE Transactions on Power Systems*,. August 1991, Volume 6, Number 3, pp 975-985.

IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers, in *IEEE Std 2030.7-2017*, pp.1-43, 23 april 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8340204.

IEEE Short Circuit Test Cases. IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 01 fev. 2021. Base de dados.

KAWAMBWA, S.; MWIFUNYI, R.; MNYANGHWALO, D.; HAMISI, N.; KALINGA, E.; MVUNGI, N. An improved backward/forward sweep power flow method based on network

tree depth for radial distribution systems. **Journal Of Electrical Systems And Information Technology**, [S.L.], v. 8, n. 1, 25 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s43067-021-00031-0>.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. fourth edition, New York: CRC Press, 2017.

KERSTING, W. H.; SHIREK, G., "Short circuit analysis of IEEE test feeders," *PES T&D 2012*, 2012, pp. 1-9, doi: 10.1109/TDC.2012.6281539.

KERSTING, W. H.; PHILLIPS, W. H. *Distribution System Short Circuit Analysis*. IEEE Conferences, 1990.

LI, J. *et al.* Short circuit current calculation of non-full measured distribution network based on modified power flow algorithm. *In: IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, p.429-433, 2014, Guilin. **IEEE Transactions on Power System**, ago. 2014.

MARCHESAN, A. C. *et al.* Análise de Métodos de Fluxo de Potência por Varredura para Cálculo do Desequilíbrio de Tensão em Sistemas de Distribuição Radiais. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, jul. 2020.

MARINHO, G. S. P. **Apresentação de uma Indústria Sucroalcooleira sob os conceitos de Microrrede de energia elétrica**. 2011. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2011.

MASSIGNAN, J. A. D. *et al.* Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo e suas Aplicações em microrredes. **Comunicação técnica**, Universidade de São Paulo, São Carlos, dez. 2016.

MATHUR, A.; KUMAR, R.; SINGH, V. P. A new load flow and short-circuit analysis for unbalanced modern distribution system. **International Transactions On Electrical Energy Systems**, [S.L.], v. 31, n. 12, dez. 2021. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1002/2050-7038.13257>.

MORAES FILHO, J. J. C. **Análise Comparativa da Expansão da Transmissão para Escoamento de Geração na Área Leste do Nordeste 2022 - 2028**. 2022. 57 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MOURA, A. P. de; MOURA, A. A. F. de; ROCHA, E. P. da. **Engenharia de sistemas de potência: análise de fluxo de carga em sistemas de potência**. São Paulo: Artliber Editora, 2018. 218 p.

MULJADI, E.; GEVORGIAN, V. Short-circuit modeling of a wind power plant., *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-9, doi: 10.1109/PES.2011.6039068.

**O SETOR ELÉTRICO**. São Paulo: Atitude Editorial, v. 16, n. 181, ago. 2021.

OLIVARES, D. E. *et al.*, "Trends in Microgrid Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, July 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.

OLIVEIRA, D. de S. de. **Classificação e Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão com Compensação Série Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2016. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, G. H. da C. *et al.* Capítulo VI Desenvolvimento de microrredes com energia renovável. **O Setor Elétrico**, Curitiba, v. 181, n. 16, p. 22-28, set. 2021.

OU, T. A novel unsymmetrical faults analysis for microgrid distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Taiwan, v. 43, n. 1, p.1017-1024, Dez. 2012.

OUALI, S.; CHERKAOUI, A. An Improved Backward/Forward Sweep Power Flow Method Based on a New Network Information Organization for Radial Distribution Systems. **Journal Of Electrical And Computer Engineering**, [S.L.], v. 2020, p. 1-11, 17 jan. 2020. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/5643410>.

PINHEIRO, D. A. **Cálculo de correntes de curto-circuito e ajuste dos relés de proteção em microrredes**. 2018. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PIZZALI, L. F. O. **Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição com Modelagem a Quatro Fios**. 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

PWS, Powerworld Corporation. **Simulador PWS**. Disponível em: <https://www.powerworld.com/products/simulator/overview>. Acesso em: 11 jan. 2023.

REITAN, D. K. A New Method Using the Bus Impedance Matrix Model for Short-Circuit Calculations. **Proceedings of the IEEE**, Madison, v. 68, n. 8, p.1027 – 1030, Aug. 1980.

ROSA, B. P.; ASSIS, T. M. L. Impacto da Modelagem Balanceada de Redes de Distribuição Desequilibradas na Análise de Curto-Circuito Simétrico e Assimétrico. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020**, v. 1, n. 1, 15 ago. 2020. Sbabra. <http://dx.doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2410>.

RUBACK, R. O. **Análise de faltas em sistemas elétricos de potência considerando dados incertos**. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

RUCKS, G. **Integração de Parques Eólicos ao Sistema Elétrico de Potência: Uma análise voltada ao estudo de curto-circuito**. 2012. 63 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RUPA, J. A. M.; GANESH, S. Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward/Forward Sweep Method. **International Journal of Electrical and Computer Engineering: World Academy of Science, Engineering and Technology**, January. 2014 v. 8, n. 10, p.1621-1625

SATO, F.; FREITAS, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica / 1. ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 753–762, May 1988.

SIEMENS. **Package: PSS®SINCAL v19.0 Electricity Basic**. Disponível em: [https://pss-store.siemens.com/store/sipti/en\\_IE/buy/productID.5218981700](https://pss-store.siemens.com/store/sipti/en_IE/buy/productID.5218981700). Acesso em: 11 jan. 2023.

SILVA, M. da. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada de Wavelet**. 2003. 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SIQUEIRA, V. **Tutorial sobre o software de Análise de Faltas**. 2017. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SOUZA JUNIOR, S. G. de. **Apresentação e aplicação do software Anafas em estudo de curto-circuito**. 2018. 126 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

STOTT, B.; ALSAC, O. Fast Decoupled Load Flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93, No.3, pp.859-867, Maio/Junho de 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293985.

SUN, H. *et al.* Line Fault Analysis of Ungrounded Distribution Systems. *In: North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6, 2013, Manhattan. **IEEE Transactions on Power System**, September 2013.

TENG, J. Unsymmetrical Short-Circuit Fault Analysis for Weakly Meshed Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Taiwan, v. 25, n. 1, p.96-105, fev. 2010.

TIEN, D. V.; GONO, R.; LEONOWICZ, Z. A New Approach Newton-Raphson Load Flow Analysis in Power System Networks with STATCOM. **Lecture Notes In Electrical Engineering**, [S.L.], v. 554, p. 88-100, 13 abr. 2019. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-14907-9\\_10](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-14907-9_10).

TRISTIU, I. *et al.* A New and Efficient Algorithm for Short-circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Generation. *In: International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 9., 2015, Bucharest. **IEEE Transactions on Power System**, May 2015.

VERMA R.; SARKAR V. Application of Modified Gauss-Zbus Iterations for Solving the Load Flow Problem in Active Distribution Networks. **Electric Power Systems Research**, v. 168, p. 8-19, 2019.

WALLING, R. A.; REICHARD, M. L., Short circuit behavior of wind turbine generators, *2009 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, 2009, pp. 492-502, doi: 10.1109/CPRE.2009.4982536.

WEEDY, B. M. *et al.* Electric power systems – 5th ed. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 978-0-470-68268-5

WILLIAMS, J. R.; KARLSON, B. Wind power plant short-circuit modeling guide, **Sandia report**, California, Sand 2012-6664 Unlimited Release, p. 1 -31, Aug. 2012.

YOUSSEF, K. H. A New Method for Online Sensitivity-Based Distributed Voltage Control and Short Circuit Analysis of Unbalanced Distribution Feeders. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Alexandria, v. 6, n. 3, p.1253-1260, May 2015.

ZAGO, M. G. **Fluxo de carga Trifásico**. 1992. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

ZHANG, X. *et al.* A Distribution Short Circuit Analysis Approach using Hybrid Compensation Method. **IEEE Transactions on Power System**, San Ramon, v. 10, n. 4, p.2053-2059, nov. 1995.