

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAIO HENRIQUE CUNHA CONTI

**ALGORITMO PARA CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO
CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

MEDIANEIRA

2021

CAIO HENRIQUE CUNHA CONTI

**ALGORITMO PARA CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO CIRCUITO EM
SISTEMAS ELÉTRICOS**

**Short-circuit algorithm to consumer with voltage down regulation for
service entrance protection projects**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Evandro André Konopatzki.

MEDIANEIRA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CAIO HENRIQUE CUNHA CONTI

**ALGORITMO PARA CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO CIRCUITO EM
SISTEMAS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Data de aprovação: 17 / agosto /2021

Evandro André Konopatziki
Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hugo Ruiz Flores
Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edson Andreolli
Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2021

RESUMO

Os transformadores, dentre os componentes das subestações do sistema elétrico, são elementos de alto valor agregado e, por esse motivo, possuem sistema de proteção bastante criterioso realizado por diversas formas, dentre elas, as sobrecorrentes instantâneas de curto-circuito. As análises de curto-circuito têm a finalidade de parametrizar o sistema de proteção e promover sua coordenação. Para tanto se tornam necessárias, pelo menos, as análises da impedância equivalente de Thévenin; dos curto-circuitos mono, bi e trifásicos e das contribuições das fontes para a falta. A configuração do sistema elétrico pode se tornar complexa para análise, principalmente com as contribuições de corrente crescendo em escala geométrica. Dessa forma, foi desenvolvido um algoritmo que realiza os cálculos de curto-circuito e retorna os resultados das faltas. A metodologia foi desenvolvida de forma que os dados de entrada são apresentados no software Microsoft Office Excel, bem como os resultados de correntes e tensões de curto-circuito. O dimensionamento das matrizes respeita os circuitos equivalentes de sequência (positiva, negativa e zero) apresentados no capítulo de metodologia, sendo as transformações e cálculos necessários para validação dos modelos executados no MathWorks MATLAB. Os resultados obtidos pelo algoritmo foram validados com o ensaio de um problema genérico no estudo de faltas, apresentado no capítulo dos resultados. Eles mostraram baixos erros relativos e a conclusão foi de que o algoritmo desenvolvido pode auxiliar no cálculo de curto-circuitos em quaisquer elementos do sistema elétrico de potência (SEP) que possam ser reduzidos a circuitos equivalentes similares aos determinados por esse estudo. Levando tudo isso em consideração o algoritmo encontra-se disponível em: <https://github.com/Conticaio/do>, para futuros trabalhos sugere-se a implementação da defasagem angular, decomposição de fases no cálculo do curto-circuito e integração com fontes fotovoltaicas.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência, Proteção, Curto-Circuito, Algoritmo.

ABSTRACT

The Transformers, between substation's components, have a high value, and, for that reason, they have a quite criteria protection system made by many forms, between these, short-circuit's instantaneous overcurrent. The short-circuit analysis is due to parametrization to promote system protection and coordination. Therefore others analysis are required such as: Thévenin's impedance; monofase; two-fase; and three fase short circuit and the others source's contributions to short-circuit. The system configuration can became complex to analysis, mainly to current's contributions growing in geometrical scale. As a result, an algorithm was developed to performs the short-circuit's calculations and shows the results. The methodology was developed in a way that input data can be by Microsot Office Excel, as so the outputs of the results of short-circuit's and current's contributions. The matrices sizes is due to equivalent circuits of positive, negative a zero sequences, shown in methodology chapter, transformations and calculos being necessary to validate the models executed in MathWorks MATLAB. The algorithm results were validate with a generic short-circuit study problem, shown in results and discussion chapter. They showed low errors in doing so the conclusion were that the developed algorithm can help in short-circuit calculos in any alement os power eletrical system that may be reproduce with equivalent circuits as like this study. All in all, the algorithm is available at: <https://github.com/Conticaio/do>, for future studies is suggest to introduce angular lag, phases decompositions in short-circuit studies and integration with fotovoltaica sources.

Keywords: Eletrical power system, Protection, Short-circuit, Algorithm.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a capacidade de aproveitar as oportunidades que me foram oferecidas.

Aos meus pais Betenia e Paulo pelo suporte em todos os momentos difíceis.

Aos meus colegas, por sempre me apoiarem durante o curso.

Ao professor Dr. Evando André Konopatziki que persistiu em sua orientação por um longo período.

A todos os professores da minha graduação, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

”Dados olhos suficientes, todos os erros serão óbvios”. E. S. Raymond

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Transformador simplificado	13
FIGURA 2	– Transformador aberto	14
FIGURA 3	– Exemplo da aplicação do teorema de Thévenin	23
FIGURA 4	– Planilha de entrada de dados	25
FIGURA 5	– Decomposição em sequência positiva e negativa do circuito da Figura 4 ..	25
FIGURA 6	– Decomposição em zero do circuito da Figura 4	25
FIGURA 7	– Aba CURTO da planilha de resultados	31
FIGURA 8	– Aba MCC da planilha de resultados	31
FIGURA 9	– Exemplo didático de um sistema de potência	34
FIGURA 10	– Dados de entrada para o problema didático	38
FIGURA 11	– Resultado de admitância da função read-ta()	38
FIGURA 12	– Resultado de impedância da função read-ta()	39
FIGURA 13	– Resultado da corrente de falta da função CCgeral()	39
FIGURA 14	– Resultado de tesões de falta parte A da função CCgeral()	39
FIGURA 15	– Resultado de tensões de falta parte B da função CCgeral()	40
FIGURA 16	– Resultado das contribuições de corrente parte A da função mcc()	40
FIGURA 17	– Resultado das contribuições de corrente parte A da função mcc()	40
FIGURA 18	– Resultado de correntes de falta da função relatorio-Mod()	41
FIGURA 19	– Resultado de contribuições de corrente de falta da função relatorio-Mod() ..	41
FIGURA 20	– Resultado da impedância de Thévenin da função relatorio-Mod()	42
FIGURA 21	– Dados de saída da aba CURTO do problema didático	42
FIGURA 22	– Dados de saída da aba MCC do problema didático	42

LISTA DE SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
IEC	International Electrotechnical Commission
ANSI	American National Standards Institute
p.u	Por Unidade
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
PI	Pontos de interesse
MCC	Matriz de contribuição de curto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	TRANSFORMADOR	12
2.2	PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR	14
2.2.1	Tipos de falhas no transformador	15
2.3	FUNÇÕES DE PROTEÇÃO	16
2.3.1	Proteções instantâneas e temporizadas de sobrecorrente	17
2.4	COMPONENTES SIMÉTRICAS	17
2.5	TIPOS DE FALTA	18
2.5.1	Falta trifásica	18
2.5.2	Falta bifásica	19
2.5.3	Falta monofásica	20
2.5.4	Falta monofásica mínima	20
2.5.5	Fator de assimetria	20
2.6	SISTEMA POR UNIDADE	21
2.7	ANÁLISE NODAL	22
2.8	TEOREMA DE THÉVENIN	23
3	METODOLOGIA	24
3.1	MATERIAIS	24
3.2	MÉTODOS	24
3.2.1	Entrada de dados	25
3.2.2	Leitura e identificação	26
3.2.3	Cálculo das Faltas	28
3.2.4	Cálculo das contribuições	29
3.2.5	Apresentação dos resultados	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	O PROBLEMA DIDÁTICO	33
4.1.1	Falta monofásica simétrica	33
4.1.2	Falta monofásica mínima	34
4.1.3	Falta bifásica	35
4.1.4	Falta trifásica	35
4.1.5	Potência de Curto Circuito	36
4.1.6	Contribuições de Corrente	36
4.1.7	Fator de Assimetria	37
4.1.8	Entradas e saídas do software	38
4.2	EXATIDÃO DO SISTEMA	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.1	O CÁLCULO DO CURTO CIRCUITO NO PROJETO DE PROTEÇÃO	46
5.2	MELHORIA EM TRABALHOS FUTUROS	47

5.3 TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Durante o surgimento e popularização da energia elétrica, existia uma discussão a respeito de qual tipo de padrão a ser utilizado: alternado ou contínuo. A resposta é amplamente conhecida e discutida em BATTAGLIN e Barreto (2012), mas um dos elementos causais é deixado de lado, o transformador. Aquele que possibilitava a transição entre tensões, que poderia realizar isolamento por seu efeito de saturação. Fato é que o Transformador desde o princípio foi um dispositivo fundamental ao funcionamento do sistema elétrico.

Uma vez conhecido o seu papel vital para a correta operação das atividades elétricas, a importância de sua operação, desde um funcionamento anômalo da rede causando a redução de vida útil, a uma eventual perda total do aparelho dispositivos foram integrados ao transformador para a sua proteção. Os dispositivos tinham a função de acompanhar os parâmetros de funcionamento do trafo. Isto é, aspectos elétricos: tensão; frequência e corrente; e construtivos do transformador: nível de óleo, a temperatura interna entre outros.

A evolução histórica dos aparelhos que executavam tal proteção como descrito por MAMEDE (2017) eram: relés eletro-mecânicos, eletro-eletrônicos, digitais e numéricos. Dessa forma, os primeiros dispositivos dedicados a proteção do transformador foram os relés eletro-mecânicos que funcionavam por meio de contatoras e diferenças de coeficiente de dilatação térmica para a realização da proteção. Com a evolução dos semicondutores, um novo modelo foi desenvolvido, os relés eletro-eletrônicos. Com a diferença de que a ação de controle não mais viria de uma diferença entre dilatações térmicas, mas de ajustes em circuitos eletrônicos, possibilitando uma maior facilidade e precisão nos ajustes a serem executados.

Recentemente, os relés digitais, provindos da revolução digital tendo sua ação de controle baseado no processamento digital dos sinais de entrada dos sensores. Segundo KINDERMANN (2006a) dentre os relés digitais encontram-se aqueles que são capazes de realizar um processamento significativo do sinal de entrada, tais como: transformadas de Fourier, Wavelet e, também, a passagem por filtros como o de Kalman . Esse tipo específico se caracteriza como um relé numérico.

Entre as múltiplas funções de proteções elétricas e construtivas que o relé pode oferecer, as funções que mais se alteram dependendo das características do SEP são as de curto-

circuito. Isto porque todas as outras funções são bem padronizadas e não irão diferir muito, salvo casos de trabalho em diferentes faixas de tensão e aspectos construtivos do transformador. Assim é importante compreender o comportamento do SEP frente a uma falta, porque a variável para parametrização do elemento de sobrecorrente depende do valor do curto-circuito, e este, depende do SEP.

Para tanto foi criado o software que dada as entradas do sistema elétrico calcula e apresenta a extensão de sua amplitude e seus ângulos dentro das possibilidades de curto-circuito, sendo estas: Trifásica, Bifásica, Monofásica e Monofásica Mínima. Há diversas possibilidades de falta, trifásico com terra bifásico com terra entre outras. No entanto, as previsões que o software faz são daquelas que melhor auxiliam na parametrização do relé, como também, as requeridas em um projeto de proteção.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral desenvolver um algoritmo para cálculo de curto circuito e impedância de Thévenin em diversos pontos de uma entrada de serviço de unidade consumidora com rebaixamento de tensão feito por um ou vários transformadores de carga para o auxílio nos projetos de proteção.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar as diferentes possibilidades de curto-circuito;
- b) Implementar as lógicas para o cálculo da impedância de Thévenin e curto circuito;
- c) Desenvolver uma saída ordenada dos resultados, em um formato prático de utilização;
- d) Validar os resultados obtidos do software;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão desenvolvidos os conceitos dos aspectos funcionais e construtivos do transformador, os tipos de falhas que o aparelho está sujeito, da proteção e as funções de proteção indicadas. Como também as componentes simétricas, os tipos de curto circuito pertinentes, o sistema por unidade, a análise nodal e o teorema de Thévenin.

Necessários para a compreensão do assunto do trabalho. Também, serão apresentados conceitos sucintos para a compreensão do tema desenvolvido, não desejando esgota-los cientes de sua amplitude.

2.1 TRANSFORMADOR

O transformador opera segundo o princípio da indução mútua entre duas (ou mais) bobinas ou circuitos indutivamente acoplados, fenômeno descrito por KOSOW (2000) . A teoria sob sua operação está respaldada majoritariamente em dois eventos: do campo magnético produzido pela passagem de corrente e da transformação do campo magnético em tensão induzida. A tensão induzida foi inicialmente demonstrada na experiência de OERSTED (1830), na obtenção de eletricidade a partir do magnetismo. Como BIM (2014) traz, anos depois, de forma mais criteriosa, Faraday com o princípio da indução eletromagnética demonstrou como foi possível gerar tensões elétricas aplicando um fluxo magnético variável, .

Já a criação do campo magnético ocorre pela passagem de uma corrente em um condutor. Esse fenômeno sendo descrito de forma completa pelas equações de Maxwell, mais amplamente discutidas em FITZGERALD A. E. (1975), para uma análise do ponto de vista da operação do transformador, a relação entre a corrente elétrica e campo magnético pode ser descrita pela lei de Ampère, como em FITZGERALD A. E. (1975), sendo esta:

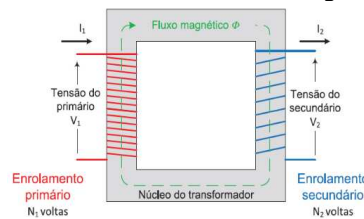
$$\int_S J da = \oint H dl \quad (1)$$

Em que, J é a densidade de corrente e H , a intensidade de campo magnético. Da equação que demonstra os feitos por Faraday e Oersted, com uma representação teórica maior tem-se a lei de Lenz. Tal lei mostra que sempre quando ocorre uma variação no fluxo concatenado, uma tensão é induzida numa direção, tal que produza um campo em oposição à variação do fluxo que concatena as espiras do circuito (KOSOW, 2000).

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Em que $e(t)$ é a tensão induzida no condutor secundário. No caso do transformador, a ação de um campo magnético causada pela injeção de energia elétrica alternada em um dos seus enrolamentos, irá produzir nos demais enrolamentos enlaçados uma energia elétrica de mesma frequência, em um nível proporcional a tensão aplicada, também descrita em Chapman (2013). Essa energia vem de uma fonte alternada, e a razão de proporcionalidade entre seus níveis de tensão é a razão entre o número de enrolamentos dos condutores envolvidos. Logo, e exemplificando para a figura 1, a razão entre o numero de espiras é o parâmetro proporcional, tanto descrito na lei de Faraday como explicitado na equação 2.

Figura 1 – Transformador simplificado



Fonte: Adaptado de Carvalho (2013)

Quando um transformador exerce a função de distribuição, ou transmissão, ou ainda, de elevação, entende-se que esse é transformador de potência. E entre as características físicas mais pertinentes a essa classe podem ser vistas na figura 2 e comentadas a seguir.

Como na identificação da figura do transformador, figura 3, sabe-se que: 1 Núcleo; 2 Enrolamentos; 3 Tanque principal; 4 Tanque de expansão de Óleo; 5 Buchas; 6 Comutadores sob Carga; 7 Acionamento do Comutador sob carga; 8 Radiadores/Trocadores de Calor; 9 Painel de Controle; 10 Secador de ar; 11 Termômetros;

Os transformadores de potência e suas aplicações mais usuais conforme MAMEDE (2017) são:

- Transformador de Distribuição: os transformadores de distribuição tem o intuito de baixar o nível da tensão que chega a ele, vindo da transmissão para uma tensão considerada de distribuição. Tal que, após essa adequação do nível de tensão, a distribuição para um

Figura 2 – Transformador aberto



Fonte: Adaptado de ABB (1999)

sistema local possa ser realizado de forma segura e sem maiores perdas.

- Transformador de Transmissão: esse transformador ajuda na normalização na operação do sistema elétrico de potência. Ele conta com TAP's variáveis, o qual é possível se alterar para uma dada condição a fim de normalizar a operação do sistema.
- Transformador Elevador: o transformador elevador tem o objetivo de elevar das tensões de geração para as novas tensões de distribuição, no intuito de reduzir a corrente, e consequentemente, minimizar as perdas.

Discorrido o necessário para esse trabalho em relação ao dispositivo a ser protegido, agora, deve-se atentar para o que fundamenta a proteção deste aparelho.

2.2 PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR

Para um esclarecimento coerente sobre a proteção da sobrecorrente do transformador deve-se primeiro entender o escopo, ou seja, a limitação a que essa proteção se aplica. Discorrido as aplicações mais comuns a máquina deve-se, então, observar quais são as faltas pertinentes para sua proteção.

Dentre as falhas, ou os eventos que não são considerados em um projeto de proteção, segundo MAMEDE (2017), estão as descargas atmosféricas, pois já existem elementos de

proteção adequados. Cabe aqui uma ressalva quanto a algumas correntes de curto, que serão extinguidas pela ação do fusível, ainda que, previstas nas proteções que serão discorridas ao longo do trabalho.

2.2.1 Tipos de falhas no transformador

Os tipos de falhas também convencionado como falta, segundo MAMEDE (2017) podem ser divididos em dois tipos: internas e externas. De forma simples, as falhas internas são aquelas oriundas do transformador e existentes, ou causadas devido a um processo de desgaste e/ou envelhecimento, já as falhas externas são eventos oriundos do sistema elétrico de potência - SEP.

De forma mais específica, as falhas caracterizadas como interna estão associadas a temperatura, pressão ou ativas. Os eventos da alteração quanto a temperatura estão associados a uma falha no sistema de refrigeração, quanto a pressão, geralmente, são consequências de uma falha ativa, de acordo com ARANTES (2005) na deterioração, como o envelhecimento do óleo e do papel, "processo de gases dissolvidos no óleo devido ao stress do papel e do líquido isolante (...)". Explicitado por BECHARA (2010) as faltas ativas são, em suma, curtos internos ou algum evento que crie um arco. Essas faltas ativas são muito danosas ao equipamento, ainda que sejam inerentes à sua utilização. Devido a força que ganha, além do fato de muitas vezes romperem o isolamento local, o stress mecânico sobre a coluna pode evoluir a outros danos. Reforçando a magnitude desta falha BECHARA W. Bissacot (1993) traz que a força que atua sobre condutores imersos em um campo magnético é proporcional ao quadrado da corrente e pela natureza da corrente, curto ou arco, trata-se de uma magnitude elevada .

Já as falhas externas mais preocupantes aos transformadores são: curtos-circuitos, sobrecargas, sobretensão, sub-frequência, segundo KINDERMANN (2006b). A grande maioria delas irá, a posteriori como elemento final, elevar a temperatura do trafo, ou causar um envelhecimento precoce no mesmo.

2.3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

Segundo MAMEDE (2017) as funções segundo a tabela *International Electrotechnical Commission (IEC) / American National Standards Institute ANSI* (apud SEL, 2019) 61850 de proteção consideradas como adequadas a proteger o transformador são:

- 23 Dispositivo de Controle de temperatura.
- 26 Proteção Térmica.
- 27 Proteção contra subtensão.
- 30 Dispositivo anunciador de eventos.
- 49 RMS Proteção de sobrecarga por imagem térmica.
- 50/50N Proteção de sobre corrente instantânea de Fase e Neutro.
- 51/51N Proteção de sobrecorrente temporizada de Fase e Neutro.
- 51NS Proteção de sobre corrente de neutro sensível.
- 51G Proteção contra sobrecorrente de terra temporizada.
- 59 Proteção contra sobretensão.
- 63 Proteção contra a presença de gás.
- 63A Proteção contra sobrepressão de gás no transformador.
- 63C Proteção contra a presença de gás no comutador de derivação
- 63A/C Proteção contra a sobrepressão de gás no comutador de derivação.
- 64 Proteção de terra.
- 71 Detector de nível de óleo do comutador de derivação.
- 80 Proteção para fluxo de óleo do comutador de derivação do regulador de tensão.
- 81 Proteção contra subfrequência e sobrefrequência.
- 87T Proteção diferencial de sobrecorrente.
- 90 Regulação de tensão.

Dentro das funções pertinentes a proteção, existem algumas cuja manipulação é dispensada. Isto é, para a maior parte das funções intrínsecas como: temperatura, pressão, nível de óleo, o retorno do elemento sensor é digital. A implicação disso é que, a priori, nenhuma análise é necessária, apenas a ação de interromper a operação do transformador.

2.3.1 Proteções instantâneas e temporizadas de sobrecorrente

As proteções que serão abordadas são referentes as funções ANSI de proteção 50 e 51 respectivamente. Dada uma entrada padrão para corrente, a proteção atuará de forma imediata, função 50, se a diferença entre os valores medidos for superior ao valor ajustado. Caso exista a sobrecorrente, no entanto, de menor magnitude, então, a proteção 51 irá temporizar e atuar.

$$T = \frac{U}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^v - 1} * T_{ms} \quad (3)$$

A equação 3 demonstra a formula da temporização. Em que u e v são constantes para o tipo da curva característica da proteção, sendo, assim respectivamente, 13.5 e 1 para uma curva muito inversa; 80 e 2 para uma curva extremamente inversa; 120 e 1 para uma inversa longa e por fim 0.05 e 0.04 para uma inversa curta. Ainda, o T_{ms} é um multiplicador de tempo, que pode variar aparelho, e I_{ma} é a corrente.

Em relação ao Neutro, das funções que se acrescentam N ao fim, 50N e 51N, são de forma geral igual ao de fase, no entanto, o elemento a ser medido difere por se equiparar apenas a corrente entre fase-terra.

2.4 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Cerca 95% de todas as faltas são consideradas desequilibradas (SATO; FREITAS, 2015) uma análise simplificada monofásica fica inviável, ou seria necessário 3 abordagens para cada falta. Como uma forma de simplificar tal situação utiliza-se a transformada de fortescue, no qual encontra-se um sistema de equações muito mais simples e para casos gerais (FORTEESCUE, 1918). Tal transformação pode ser representado pelas pelas matrizes abaixo.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Em que $a = -0.5 + \frac{\sqrt{3}}{2}$ e T é a matriz de transformação dos fasores V_{abc} para componentes simétricas $V_{abc} * T = V_{012}$ e T^{-1} é a transformada inversa, que traz das componentes simétricas

para os fasores originais. $V_{012} * T^{-1} = V_{abc}$

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (5)$$

É muito importante entender que para além das tensões e correntes as impedâncias também tem a sua transformação para componentes simétricas.

2.5 TIPOS DE FALTA

Existem 11 tipos de curto circuito Amaral *et al.* (2017), sendo monofásicos, bifásicos com e sem terra, trifásicos puro e trifásicos terra, sendo o trifásico puro o único balanceado. Dessa forma, o cálculo das faltas foi equacionado em componentes simétricas. As faltas mais relevantes segundo MAMEDE (2017) são: trifásica, bifásica e monofásica, requeridas por projeto de proteção de transformadores de potência. Seguem suas definições e a equação para o cálculo do curto-circuito:

2.5.1 Falta trifásica

A Falta trifásica acontece quando todos os condutores carregados se unem. E sua magnitude e ângulo são dados por

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Estando as fases igualmente equilibradas pode-se simplificar a $I_a + I_b + I_c = I_a * (1 + \alpha^2 + \alpha)$ e reescreve-se

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * I_a * \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Logo,

$$3I_{F_{sim}} = \frac{1}{Z_1} \quad (8)$$

sendo Z_1 o equivalente de Thevénin para a impedância de sequência positiva e $3I_{F_{sim}}$ a corrente de curto circuito trifásica simétrica.

2.5.2 Falta bifásica

A Falta bifásica acontece quando quaisquer dois cabos carregados se unem. Admiti-se que um condutor terá corrente nula se equiparada as correntes que correm nas outras duas fases, e que essa corrente tem sentido oposto em uma das fases como pode ser vistos abaixo:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \frac{I_b}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha - \alpha^2 \\ \alpha^2 - \alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dessa forma pode-se inferir que $I_0 = 0$, e ainda:

$$I_1 = \frac{1}{Z_1 + Z_2} \quad (10)$$

sendo Z_2 o equivalente de Thevénin para a impedância de sequência Negativa. Finalmente $I2F_{cc}$ é obtida pela transformação inversa, sendo:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I2F_{cc} \\ -I2F_{cc} \end{bmatrix} = T^{-1} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \\ -I_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Importante ressaltar que essa última equação foi adaptada para ser a replica exata utilizada no software.

2.5.3 Falta monofásica

A Falta monofásica acontece quando um dos cabos carregado se une a terra. Por simplificação admi-se que a corrente nos outros condutores cai a zero, tal que:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

Aqui se tem a importante conclusão que a corrente de curto $I_a = 3.I_0$. Sendo esta a grandeza medida nas proteções monofásicas, 50N e 51N. Portanto:

$$1IF_{sim} = \frac{1}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (13)$$

sendo Z_0 o equivalente de Thevénin para a impedância de sequência zero e $1IF_{sim}$ a corrente monofásica simétrica de curto circuito.

2.5.4 Falta monofásica mínima

A Falta monofásica mínima não se trata de um outro tipo de falta e sim por apresentar um diferencial um elemento condutor entre o cabo carregado e a terra. E sua magnitude e ângulo são dados por:

$$1IF_{min} = \frac{1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_t} \quad (14)$$

sendo Z_t a impedância do elemento condutor a ser considerado.

2.5.5 Fator de assimetria

Tanto as faltas trifásicas quanto as monofásicas podem ter um fator de assimetria, Tal que:

$$3IF_{ass} = FA * 3IF_{sim} \quad (15)$$

$$3IF_{ass} = FA * 1IF_{sim} \quad (16)$$

Donde,

$$FA = \sqrt{1 + 2 * e^{\frac{-2\pi}{\tan(x/r)}}} \quad (17)$$

Sendo FA uma grandeza exclusivamente escalar e ainda, z_p se trata da impedância equivalente de Theveini no ponto o qual é realizado o cálculo do curto. As equações acima para o cálculo de curto circuito Sato e Freitas (2015), Glover *et al.* (2012), Mohan (2016)

2.6 SISTEMA POR UNIDADE

Dentro do sistema de potência a configuração da rede possui diversos elementos como linhas de transmissão, geradores e transformadores. A fim de poder trabalhar de forma simplificada é adotado o sistema de valores por unidade, p.u. Isto porque quando se trabalha com sistema de tamanho moderado esse pode conter centenas de transformadores, na utilização do sistema por unidade é possível evitar erros de cálculo na fronteira do transformador (GLOVER *et al.*, 2012).

Isto é, os sistemas elétricos tem uma tensão nominal o qual foi projetado, como também cada equipamento tem uma corrente nominal que possibilita a esse elemento seu uso contínuo sem alterações. Os parâmetros de tensão e corrente no sistema p.u são representados como uma fração dos valores de base apropriados (MOHAN, 2016). Podendo ser explicitado pela fórmula abaixo:

$$Valorporunidade = \frac{Valoratual}{ValorBase} \quad (18)$$

Utilizando o princípio dessa equação adota-se uma base para potência e tensão trifásicos e obtém-se a corrente base.

$$I_{3\phi,base} = \frac{S_{3\phi,base}}{\sqrt{3} * V_{3\phi,base}} \quad (19)$$

De uma forma prática, adota-se uma única potência base (GLOVER *et al.*, 2012), já as tensões base variam para a qual de lado do transformador se refere, e por fim, a corrente base vem como uma consequência da escolha dessas duas bases anteriores. As impedâncias bases podem ser encontradas conforme a equação a baixo:

$$Z_{base} = \frac{S_{base}^2}{V_{base}} \quad (20)$$

No caso da impedância do transformador, regularmente essa é fornecida em p.u adotando-se a potência do trafo como base. Logo, há necessidade de fazer a alteração das bases da impedância que é encontrada matematicamente por:

$$Z_{p.u,novo} = Z_{p.u,antigo} * \left(\frac{V_{base,antiga}}{V_{base,nova}} \right)^2 * \left(\frac{S_{base,nova}}{S_{base,antiga}} \right) \quad (21)$$

2.7 ANÁLISE NODAL

Existem diversas técnicas na análise de circuitos, por exemplo a análise nodal pela aplicação da Lei de Kirchhoff para as correntes, LKC, e a lei de Ohm. Donde a LKC irá fornecer informações para a construção dos sistemas de equação, tal qual:

$$I_s = I_s + I_s + \dots + I_n \quad (22)$$

e a lei de ohm é usada para expandir cada ponto desse sistema de equações (SADIKU *et al.*, 2014):

$$I_n = \frac{V_{n-1} - V_n}{R} \quad (23)$$

Na análise genérica matricial, isolam as admitâncias, o inverso da impedância, do sistema. Depois, multiplica-se pelas tensões encontrando assim as correntes (IRWIN, 2019). Matricialmente expresso:

$$\begin{pmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & y_{1,n} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \dots & y_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n,1} & y_{n,2} & \dots & y_{n,n} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} \quad (24)$$

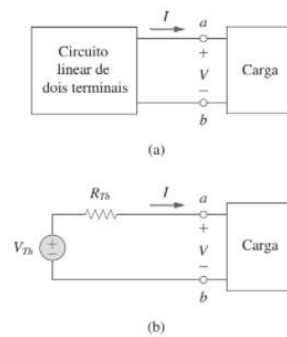
ou simplesmente:

$$Y * V = I \quad (25)$$

2.8 TEOREMA DE THÉVENIN

O teorema de se trata de uma técnica para análise de circuitos, que condensa informações de impedância e tensão para um determinado ponto. A impedância desse circuito equivalente, denomina-se de impedância de Thévenin e a Tensão de igual modo. De acordo com o teorema, existe um circuito equivalente para todo o ponto de um circuito linear, conforme a figura a baixo:

Figura 3 – Exemplo da aplicação do teorema de Thévenin



Fonte: Adaptado de Sadiku *et al.* (2014)

Onde (a) é um circuito linear e (b) o equivalente de Thévenin para o ponto. Mais especificamente V_{th} a tensão de circuito aberto e R_{th} a resistência equivalente sentida pelo circuito (IRWIN, 2019)

3 METODOLOGIA

Nesta secção serão apresentados os recursos utilizados para a criação do software: matlab e de planilha. Também, descrever a construção de seu algoritmo.

3.1 MATERIAIS

Foram utilizados Excel do pacote MSoffice de propriedade do aluno e o matlab de licença da UTFPR. Vale a pena ressaltar que o software matlab foi escolhido por ser uma ferramenta robusta e amplamente utilizada nas engenharias. Já o planilha eletrônica, ou os formatos equivalentes, são de fácil acesso e visualização dos dados, tanto para a entrada do SEP quanto para a apresentação dos resultados do cálculo.

3.2 MÉTODOS

Foram implementadas rotinas de cálculos padronizadas de forma a mitigar os erros e agilizar o processo do projeto de proteção, de forma modular, cada qual executando parte da rotina do cálculo do curto circuito, sendo esta:

1. Entrada dos dados do sistema através de ferramenta de planilha;
2. Leitura dos dados de entrada e identificação do sistema;
3. Criação das matrizes de admitância e impedância;
4. Cálculo das faltas;
5. Cálculo das contribuições das faltas;
6. Apresentação dos resultados obtidos em planilha eletrônica;

O arquivo possui três divisões nas abas superiores: Informações das Barras, Simples/Com Geração e Sem Geração. Na primeira divisão há subdivisões, para identificação das barras e suas respectivas tensões e defasamentos angulares. Logo abaixo do 'RF', deve-se colocar a impedância, em ohms, o qual deseja que o curto monofásico mínimo seja executado. Por fim, na Coluna do 'PI', indica-se os pontos de interesse para o Cálculo do Curto.

Na segunda divisão, Simples/Com geração, é inserida a configuração das impedâncias do sistema. Caso o sistema seja com apenas uma fonte de geração é preenchido os três primeiros grupamentos, no entanto, se existir uma fonte além, a qual possui elementos de impedância do tipo transitória e sub transitória, como é o caso das máquinas girantes, é preenchido o primeiro grupamento com as impedâncias de sequencia positiva transitória e o último grupamento com as suas sub transitórias.

Divididos em quatro macro colunas, nas quais devem ser inseridos os valores, respectivamente, das impedâncias de sequência positiva ou transitória, quando existirem. Negativa, zero e caso exista impedâncias transitórias, o último macro dessa divisão, "Seq. Sub Transitória" é preenchido com os valores das impedâncias de sequência positiva sub transitórias.

Ainda, caso haja o interesse de se realizar ambos os cálculos levando em consideração uma fonte com sequências sub transitórias e transitórias, como também desconsiderando essa mesma fonte, preenche-se a última divisão. O mesmo procedimento ocorre para o preenchimento da "SEM GERAÇÃO", excetuando os elementos de sequência positiva sub transitória e transitória, mais explicitamente tornando a conexão do elemento em aberto, desconectada totalmente da rede.

Para o preenchimento do arranjo do sistema, isto é, as colunas "De" e "Para", deve-se inicialmente enumerar todos as barras do sistema ainda que sejam barras imaginárias, como é o terciário do trafo de três enrolamentos, e quando existir uma impedância entre a barra e o ponto de terra comum se deve repetir o numero da barra nas colunas "De" e "Para".

3.2.2 Leitura e identificação

Feito o preenchimento deve-se chamar a função "do" no ambiente matlab para que essa realize o trabalho. A primeira parte a ser executada pela mesma é a leitura do arquivo em planilha. Para tanto, são argumentos, entre aspas simples, dessa função a pasta de destino e o nome do arquivo tal como o exemplo: do('local', 'nome do arquivo')

Para a leitura é chamada função *read – ta* essa vai requisitar a leitura do arquivo em planilha, em pontos específicos, e irá retirar as informações do arranjo do sistema. Se esse possui geração com transitório ou apenas geração proveniente da concessionária, obterá a as tensões de trabalho desejadas e a impedância de aterramento. Também, retirará os pontos de interesse do cálculo do curto.

Então retornará: a impedância de aterramento; as tensões das barras; a matriz de admitância; a defasagem angular e os PI.

$$[RF, TB, Y, def, PI] = read - ta(filename)$$

A construção das matrizes de admitância se dá de forma simples, inicialmente, se cria uma matriz nula de N dimensão

$$M_{n,n} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \quad (26)$$

em que todos os $a_{n,n} = 0$, e preenche-se com o inverso dos valores na posição "De" e "Para". Isto é, na linha de número "De", na coluna de número "Para", se adicionará $\frac{1}{z}$, sendo z o valor da impedância naquela localidade. Posteriormente, espelha-se a matriz tal que $a_{b,c} = a_{c,b}$ para $c, b \leq N$

Ainda, como essa matriz pode possuir barras imaginárias é feita a verificação sob quais barras são imaginárias, podendo essas apenas serem enumeradas depois de todas as reais. A verificação é feita pela diferença entre barras de sequência positiva e de sequência zero, a diferença entre essas, são consideradas barras imaginárias. Para o tratamento desse fato utiliza-se, um manobra matemática nas matrizes de admitância positiva e negativa, uma vez que não há necessidade de se fazer o mesmo processo para de sequência zero, pois ela já possui todas as barras.

Dando prosseguimento, calcula-se a inversa para ambas as matrizes, encontrando assim a matriz de impedância, adiciona-se colunas e linhas nulas, com elementos da diagonal principal na ordem de 10^6 , depois refaz o processo, obtendo agora as matrizes de admitância com um arranjo de ordem correta. O processo pode ser visto matematicamente abaixo:

$$Y_{1,2} = \begin{pmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,n} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \cdots & y_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n,1} & y_{n,2} & \cdots & y_{n,n} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$Z = Y^{-1} \quad (28)$$

$$Z'_{1,2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \cdots & 10^6 \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$Z + Z' = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,n} \cdots & 0 \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,n} \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ z_{n,1} & z_{n,2} & \cdots & z_{n,n} \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \cdots & 10^6 \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$Y_{1,2} = (Z + Z')^{-1} \quad (31)$$

3.2.3 Cálculo das Faltas

O algoritmo seleciona as próximas instruções a serem realizadas com base na entrada dos macros da planilha de leitura, executando uma de três possibilidades. Sendo: Geração apenas pela concessionária, geração em paralelo a concessionária e o cálculo para ambas situações.

Em todos os casos o programa chama a função *Modify – ta* essa que tem como argumentos de entrada a matriz de admitância, os pontos de interesse, as tensões, a impedância de aterramento e a defasagem angular. O que muda entre as opções é o argumento de entrada da admitância. No primeiro caso não, existem alterações, ou seja, introduz a matriz de admitância positiva, depois a negativa e a zero. No entanto, caso haja o desejo de calcular a geração em paralelismo, o primeiro argumento que antes era uma matriz bidimensional de admitância

positiva, se torna uma matriz tridimensional pela concatenação das duas matrizes de sequência positiva das impedâncias transitórias e sub transitórias.

Depois, encontra-se as matrizes de impedância $Z_{0,1,2}$, e de posse dessa matriz, considerando uma situação inicial onde as tensões em todas as barras é nominal, inicia-se o cálculo dos curtos com a função *CCgeral*. Esta função retorna as correntes de curto, bem como a tensão na condição de curto. Retorna as correntes em formato de matriz bidimensional $N \times 4$, sendo que, as colunas representam respectivamente: curtos trifásicos, monofásicos, monofásicos mínimos e bifásicos. Já as linhas, indicam o local do curto. As tensões são retornadas em uma Matriz tridimensional, isto é, $V_{K \times W \times S}$ sendo S representado de 1 à 9, respectivamente: tensões de sequência positiva para curto trifásico; positiva, negativa e zero para curto monofásico. Positiva, negativa e zero para curto monofásico mínimo. Positiva e negativa para curto bifásico. Os índices K e W indicam tensão da barra K para um curto em W , dessa forma o elemento $v_{1,2,3}$ é a tensão de sequência negativa para um curto monofásico da barra um, devido ao curto na barra dois. Na linguagem do matlab, segue o exemplo de como cálculo foi realizado:

$$Id(:,1) = 1./diag(Z(:, :, 1));$$

$$Iaux(:, :, 1) = eye(length(Id)).*Id(:,1);$$

$$V(:, :, 1) = Z(:, :, 1) * Iaux(:, :, 1);$$

Dessa forma, se obtém todas as tensões e correntes para faltas trifásicas. As demais faltas seguem a mesma lógica observando as equações para o calculo de curto circuito antes explicitadas.

3.2.4 Cálculo das contribuições

Uma vez obtidas todas as tensões nas barras, dadas as situações de faltas especificadas para encontrar a contribuição de corrente, basta utilizar a análise nodal, LKC, para encontrar a corrente e sua direção.

$$I_{mn} = (V_n - V_m) * Y_{mn}$$

Sua generalização pode parecer complexa, no entanto, fica bem intuitiva quando utilizada 4

dimensões para expressar as contribuições de curto-circuito. Para tanto, se faz uso da função MCC, construindo-a em um laço de repetição alternando pontualmente suas magnitudes, locais de falta e tipo tensão, sendo sua representação da seguinte forma:

$$MCC_{q,p,l,t} = (V_{q,l,t} - V_{p,l,t}) * Yax_{p,q,t}$$

Sendo p, q duas barras do circuito, l o local da falta e t o tipo de falta de acordo com os 9 tipos de tensão. Os 9 tipos de contribuições são análogas aos tipos de tensões. Como não existem 9 tipos de matrizes de admitância, é construída uma matriz auxiliar Yax com os componentes representados pela tensão, sem fazer distinção para o tipo de curto-circuito atendo-se apenas ao componente simétrico. Esse tensor, pode ser entendido por grupamentos bidimensionais, o qual, cada falta por sua vez gera uma matriz simétrica de contribuições de falta. Dando a terceira dimensão a informação do local do curto-circuito, e por fim, a quarta indicando que tipo de contribuição de curto-circuito ela se refere. Exemplo $MCC_{1,2,3,4}$ refere-se a uma corrente de sequência zero, de uma falta monofásica, que percorre da barra 1 para 2, como consequência da falta no ponto 3.

3.2.5 Apresentação dos resultados

Por fim, ocorre a ordenação dos resultados, esse é feito em duas etapas, e apresentado em planilha de duas abas distintas. Neste momento, a informação da tensão das barras e os pontos de interesse no curto-circuito é crítico. Ainda que o programa tenha calculado todos os curtos-circuitos em todos os pontos e tenha todas as contribuições, ele apenas mostrará os pontos que forem listados no PI (pontos de interesse) da planilha de entrada. O único que não difere dos pontos de entrada são as contribuições, independentemente, de ser selecionado ou não como pontos de interesse, o software mostrará todas as contribuições para um curto-circuito nos PI desde que elas existam.

Como uma forma de trazer as correntes refletidas na alta ou na baixa do transformador, as tensões na barras informadas são utilizadas para o calculo na formação de uma base de corrente para uma potência de 100 MVA. Essa potência base pode ser alterada extrinsecamente ao código.

Na primeira parte da apresentação encontrado na aba 'CURTO' da planilha de resultados são exibidos os faltas do tipo trifásico simétrico e assimétrico, monofásico, monofásico assimétrico, monofásico mínimo e bifásico. Como também, a impedância de

Thevenin nos pontos de interesse.

Figura 7 – Aba CURTO da planilha de resultados

Vbase	Falta	Tipo	Mag	Ang	Ponto	R	j X
13800	1	I3Fsim	4857	93	1	0,0490	0,8600
13800	1	PCC	116	93	1	0,0490	0,8600
13800	1	I3Fass	7521	93	1	0,3236	5,3644
13800	1	I1Fsim	1769	93	1	0,0490	0,8600
13800	1	I1Fass	2726	93	1	0,0490	0,8600
13800	1	I1Fmin	556	162	1	0,3236	5,3644
13800	1	I2F	4206	3	2	1,0766	2,2160

Fonte: Autoria própria

Nesta etapa encontra-se a maior distinção entre os tipos de possibilidades introduzidas na subseção do Cálculo das Faltas. Até então para as outras funções apenas se repetia o processo fazendo inicialmente com a sequência positiva transitória e depois com a sub transitória. Para a apresentação, no caso de ter uma geração em paralelo, são acrescentadas as faltas trifásicas simétricas e assimétricas sub transitórias, monofásicas simétricas e assimétricas sub transitórias, e as demais antes citadas do caso restrito a concessionária, essas tomam um caráter transitório. A forma como são retirados e exibidos os dados em questão vem dos argumentos de entrada da função *relatorio – Mod* e *reloriot – Mod* para o caso de geração em paralelismo. Ambas recebem as seguintes informações: A matriz de corrente de falta $Id_{N \times 4}$, matriz de contribuição de curto-circuito *MCC* e impedâncias do sistema $Z_{0,1,2}$

Figura 8 – Aba MCC da planilha de resultados

Vbase	Falta	De	Para	Tipo	Mag	Ang
13800	3	1	2	I"3Fsim	1133	124
13800	3	1	2	I"3Fass	1155	124
13800	3	1	2	I3F	1133	124
13800	3	1	2	I"1Fsim	545	110
13800	3	1	2	I"1Fass	609	110
13800	3	1	2	I'1F	550	110
13800	3	1	2	I1Fmin	346	145
13800	3	1	2	I'2F	980	33
13800	3	1	2	3.I"0.sim	574	108
13800	3	1	2	3.I"0.ass	641	108
13800	3	1	2	3.I"0.min	361	143
13800	3	1	2	3.I'0	573	108
13800	3	1	2	3.I'0.min	361	143

Fonte: Autoria própria

A mesma modificação ocorre na segunda parte encontrada na aba "mcc" da planilha de resultados. Aqui é realizada uma busca na matriz de contribuições de curto-circuito no

campo do local das faltas para encontrar aquelas requeridas pelos PI. As contribuições para faltas trifásicas, monofásicas e demais, não se diferem, tanto no processo do cálculo quanto das falatas efetivos citados na primeira parte com o diferencial do elemento 3I0 como também do 3I0 mínimo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado um problema didáticos no cálculo da falta. Este que permite observar as respostas do software e avaliar seu desempenho.

4.1 O PROBLEMA DIDÁTICO

A figura a seguir é um exemplo adaptado de (GLOVER *et al.*, 2012) o qual pede o cálculo de diversos tipos de falta para o ponto dois no capítulo de cálculo de curto-circuito em sistemas potência. Esse problema foi usado para validar os resultados obtidos com o software, principalmente para:

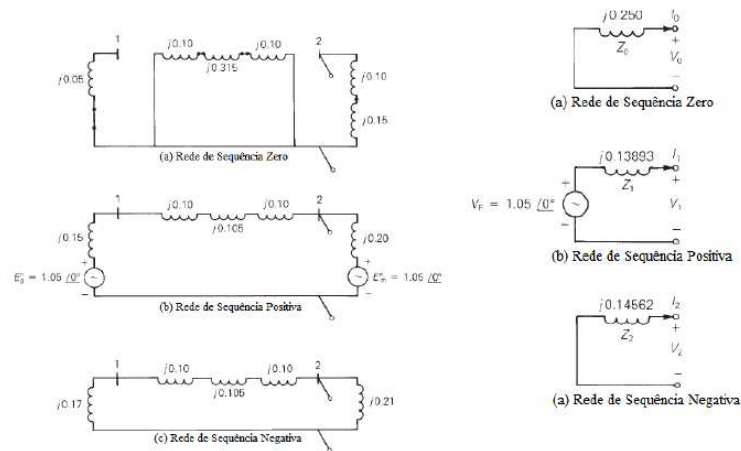
1. Análise da impedância equivalente de Thévenin;
2. Análise da falta monofásica;
3. Análise da falta bifásica;
4. Análise da falta trifásica;
5. Análise das contribuições das fontes para a falta;

Será realizada uma pequena alteração $V_f = 1.0 \angle 0.0^\circ$, uma vez que a situação nominal na pré falta é sempre assumida pelo software.

4.1.1 Falta monofásica simétrica

Utilizando as impedâncias equivalentes de Thévenin das componentes de sequência mostradas na figura acima, calcula-se:

Figura 9 – Exemplo didático de um sistema de potência



Fonte: Glover *et al.* (2012)

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{j(0,25 + 0,13893 + 0,14562)} \quad (32)$$

$$3.I_0 = 5,61 \angle -90^\circ \quad (33)$$

Tomando de bases $S_b = 100MVA$, $V_b = 13.8KV$, encontra-se o valor para a corrente de $I_b \approx 4,183697KA$ do real do curto.

$$1IF_{sim} = 3.I_0 * I_b = 23.470 \angle -90^\circ A \quad (34)$$

4.1.2 Falta monofásica mínima

A diferença entre a monofásica e a monofásica mínima está na presença de uma resistência no ponto do curto. Para essa impedância toma-se o valor de $Z = 40\Omega$. Deve-se então transformar para o sistema p.u, e para tanto calcula-se o valor da impedância base.

$$Z_{base} = \frac{(100MVA)^2}{13,8KV} = 1,904\Omega \quad (35)$$

$$Z_t = \frac{40}{1,904} = 21,01\Omega \quad (36)$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1,0\angle 0^\circ}{j(0,25 + 0,13893 + 0,14562) + 21,01} \quad (37)$$

$$3 \cdot I_0 = 0,1427\angle -1,46^\circ \quad (38)$$

$$1IF_{min} = 3 \cdot I_0 * I_b = 597\angle -1,46^\circ A \quad (39)$$

4.1.3 Falta bifásica

Para o cálculo da falta bifásica, considera-se a corrente fora da falta nula, e as correntes em curto com módulos iguais, mas com sentidos opostos. Também, é importante lembrar, que essa falta não possui componente de sequência negativa. Logo:

$$I_1 = -I_2 = \frac{1,0\angle 0^\circ}{j(0,13893 + 0,14562)} = 3,51\angle -90^\circ \quad (40)$$

$$2IF_{pu} = I_1 * (-j\sqrt{3}) = 6,08\angle 180^\circ \quad (41)$$

$$2IF_{cc} = 2IF_{pu} * I_b = 25.461\angle -90^\circ A \quad (42)$$

4.1.4 Falta trifásica

Para o cálculo da falta trifásica, considera-se apenas o circuito de sequência positiva. Portanto:

$$I_1 = \frac{1,0\angle 0^\circ}{j(0,13893)} = 7.197\angle -90^\circ \quad (43)$$

$$3IF_{pu} = I_1 * I_b = 30.113\angle -90^\circ \quad (44)$$

4.1.5 Potência de Curto Circuito

A potência de curto circuito é uma informação essencial na proteção para que o dimensionamento dos equipamentos que compõe a rede. Essa pode ser calculada como:

$$PCC = 3I_{Fsim} * V_{nominal} \sqrt{3} \quad (45)$$

$$PCC = 30.113A * 13,8KV \sqrt{3} \quad (46)$$

$$PCC = 719,76MVA$$

4.1.6 Contribuições de Corrente

Há somente contribuições de corrente para aquelas faltas que possuem sequências além da zero. Uma vez que é visível no exemplo, figura x, que estão isoladas para terra. Dessa forma, faz-se apenas as contribuições para o curto na barra dois das faltas bifásicas e trifásicas. Por se tratar de um problema simples uma abordagem com um divisor de corrente será apropriada.

$$I_1 = I_t * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (47)$$

Sendo $I_t = I_1 + I_2$, pode-se afirmar que:

$$I_2 = I_t - I_1 \quad (48)$$

Primeiramente, obtêm-se as contribuições de curto trifásico utilizando o divisor de corrente.

$$I_1 = 3I_{Fsim} * \frac{j0,2}{j(0,15 + 0,305 + 0,2)} = 3I_{Fsim} * 0,305 \quad (49)$$

$$I_1 = 301.137 \angle -90^\circ * 0,305 \quad (50)$$

$$I_1 = 9.184 \angle -90^\circ A$$

aplicando esse resultado na equação 33, tem-se:

$$I_2 = 301.137 \angle -90^\circ A - 91,846 \angle -90^\circ A \quad (51)$$

$$I_2 = 20.929 \angle -90^\circ A$$

Agora, deve-se repetir o processo para a contribuição de curto para a falta bifásica.

$$I_1 = 2IF_{cc} * \frac{j0,41}{j(0,41 + 0,455 + 0,475)} = 2IF_{cc} * 0,3059 \quad (52)$$

$$I_1 = 25.461 \angle -180^\circ A * 0,305 \quad (53)$$

$$I_1 = 7.765 \angle -180^\circ A$$

realizando o mesmo procedimento da contribuição trifásica, agora tem-se:

$$I_2 = 25.461 \angle -180^\circ A - 7,765 \angle -180^\circ A \quad (54)$$

$$I_2 = 17.695 \angle -90^\circ A$$

4.1.7 Fator de Assimetria

O Fator de assimetria é um elemento puramente escalar e é calculado pelas impedâncias no ponto do curto de Thévenin. relembrando sua expressão matemática:

$$FA = \sqrt{1 + 2e^{(-2\pi/\tan(x/r))}} \quad (55)$$

Como a impedância do exemplo não tem parte real, o termo da exponencial tenderá a 1, tanto no fator de assimetria trifásico quanto no monofásico. logo:

$$FA = \sqrt{1 + 2 * 1} \quad (56)$$

$$FA_{1\phi} = FA_{3\phi} = \sqrt{3} \quad (57)$$

Por fim, calcula-se as correntes trifásicas assimétricas e as monofásicas assimétricas:

$$3IF_{ass} = FA * 3IF_{sim} \quad (58)$$

$$3IF_{ass} = \sqrt{3} * 30.133 \angle -90^\circ \tag{59}$$

$$3IF_{ass} = 52.191 \angle -90^\circ \tag{60}$$

$$1IF_{ass} = FA * 1IF_{sim} \tag{61}$$

$$1IF_{ass} = \sqrt{3} * 23.470 \angle -90^\circ \tag{62}$$

$$1IF_{ass} = 40.651 \angle -90^\circ \tag{63}$$

4.1.8 Entradas e saídas do software

De acordo com o sistema na Figura 9, foi preenchida a planilha de entrada de dados da seguinte maneira:

Figura 10 – Dados de entrada para o problema didático

Informações das Barras					Simples/Com Geração												SEM GERAÇÃO																
Barra	Tensão Barra	def.	RF	PI	Seq. Positiva ou Transitória				Seq. Negativa				Seq. Zero				Seq. Sub Transitória				Seq. Positiva			Seq. Negativa			Seq. Zero						
					De	Para	R	X	De	Para	R	X	De	Para	R	X	De	Para	R	X	De	Para	R	X	De	Para	R	X	De	Para	R	X	
1	13800	0	21,00	1	1	1	0,0000	0,1500	1	1	0,0000	0,1700	1	1	0,0000	0,0500																	
2	13800	0		2	1	2	0,0000	0,3050	1	2	0,0000	0,3050	2	2	0,0000	0,2500																	
					2	2	0,0000	0,2000	2	2	0,0000	0,2100																					

Fonte: Autoria própria

Executando o código passo a passo através de suas funções modulares descritas no capítulo de metodologia, partido da função $read - ta('filename')$, obteve-se as seguintes matrizes de admitância e impedância

Figura 11 – Resultado de admitância da função read-ta()

```

Yc(1,1,1) =
0,0000 - 9,9454i 0,0000 + 3,2787i
0,0000 + 3,2787i 0,0000 - 8,2787i

Yc(1,1,2) =
0,0000 - 9,1610i 0,0000 + 3,2787i
0,0000 + 3,2787i 0,0000 - 8,0406i

Yc(1,1,3) =
0,0000 -20,0000i 0,0000 + 0,0000i
0,0000 + 0,0000i 0,0000 - 4,0000i
    
```

Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Resultado de impedância da função read-ta()

```

Zt(:, :, 1) =
    0.0000 + 0.11561i    0.0000 + 0.04581i
    0.0000 + 0.04581i    0.0000 + 0.13891i

Zt(:, :, 2) =
    0.0000 + 0.12781i    0.0000 + 0.05211i
    0.0000 + 0.05211i    0.0000 + 0.14561i

Zt(:, :, 3) =
    0.0000 + 0.05001i    0.0000 + 0.00001i
    0.0000 + 0.00001i    0.0000 + 0.25001i

```

Fonte: Autoria própria

Como uma próxima etapa, para a execução do cálculo das correntes de falta utiliza-se a *CCgeral()*, obtendo os resultados das figuras 13 à 15. Na Figura 13, é possível visualizar a matriz de correntes devido as faltas nos pontos 1 e 2, por isso duas linhas com 4 colunas referentes respectivamente à: falta trifásica, monofásica, monofásica mínima e bifásica.

Figura 13 – Resultado da corrente de falta da função CCgeral()

```

Id =
    0.0000 - 8.64691i    0.0000 - 3.40761i    0.0476 - 0.00071i    0.0000 - 4.10751i
    0.0000 - 7.19781i    0.0000 - 1.87071i    0.0476 - 0.00121i    0.0000 - 3.51431i

```

Fonte: Autoria própria

Na Figura 14 é possível ver as tensões nas barras devido ao curto: Trifásico para $V(:, :, 1)$, monofásico para $V(:, :, 2 : 4)$.

Figura 14 – Resultado de tesões de falta parte A da função CCgeral()

```

V(:, :, 1) =
    1.0000 + 0.00001i    0.3287 + 0.00001i
    0.3960 + 0.00001i    1.0000 + 0.00001i

V(:, :, 2) =
    0.3941 + 0.00001i    0.0857 + 0.00001i
    0.1561 + 0.00001i    0.2599 + 0.00001i

V(:, :, 3) =
    0.4355 + 0.00001i    0.0975 + 0.00001i
    0.1776 + 0.00001i    0.2724 + 0.00001i

V(:, :, 4) =
    0.1704 + 0.00001i    0.0000 + 0.00001i
    0.0000 + 0.00001i    0.4677 + 0.00001i

```

Fonte: Autoria própria

A disposição das informações das tensões devido ao curto segue a seguinte ordem, em que as linhas caracterizam o local da falta, e as colunas o ponto onde a tensão foi calculada. Na Figura 15 é possível ver as tensões nas barras devido ao curto: monofásico mínimo para $V(:, :, 5 : 7)$, bifásico para $V(:, :, 8 : 9)$

Dessa forma de posse das tenções e matrizes de admitâncias de sequências, entramos

Figura 15 – Resultado de tensões de falta parte B da função CCgeral()

```

V(:, :, 5) =
    0.0001 + 0.00551i    0.0001 + 0.00221i
    0.0000 + 0.00221i    0.0002 + 0.00661i

V(:, :, 6) =
    0.0001 + 0.00611i    0.0001 + 0.00251i
    0.0000 + 0.00251i    0.0002 + 0.00691i

V(:, :, 7) =
    0.0000 + 0.00241i    0.0000 + 0.00001i
    0.0000 + 0.00001i    0.0003 + 0.01191i

V(:, :, 8) =
   -0.2375 - 0.41141i   -0.0805 - 0.13941i
   -0.0941 - 0.16291i   -0.2441 - 0.42281i

V(:, :, 9) =
    0.2625 - 0.45461i    0.0916 - 0.15861i
    0.1070 - 0.18541i    0.2559 - 0.44321i

```

Fonte: Autoria própria

com a função *mcc()* o qual nos fornecerá quais são as contribuições de corrente em cada ramo a partir de uma análise LKC. tal que:

Figura 16 – Resultado das contribuições de corrente parte A da função mcc()

```

Mcc(:, :, 1, 1) =
    0.0000 - 6.66671i    0.0000 + 1.98021i
    0.0000 - 1.98021i    0.0000 - 1.98021i

Mcc(:, :, 2, 1) =
    0.0000 - 2.19781i    0.0000 - 2.19781i
    0.0000 + 2.19781i    0.0000 - 5.00001i

```

Fonte: Autoria própria**Figura 17 – Resultado das contribuições de corrente parte A da função mcc()**

```

Mcc(:, :, 1, 2) =
    0.0000 - 2.62731i    0.0000 + 0.78041i
    0.0000 - 0.78041i    0.0000 - 0.78041i

Mcc(:, :, 2, 2) =
    0.0000 - 0.57121i    0.0000 - 0.57121i
    0.0000 + 0.57121i    0.0000 - 1.29951i

Mcc(:, :, 1, 3) =
    0.0000 - 2.56191i    0.0000 + 0.84571i
    0.0000 - 0.84571i    0.0000 - 0.84571i

Mcc(:, :, 2, 3) =
    0.0000 - 0.57351i    0.0000 - 0.57351i
    0.0000 + 0.57351i    0.0000 - 1.29721i

Mcc(:, :, 1, 4) =
    0.0000 - 3.40761i    0.0000 + 0.00001i
    0.0000 + 0.00001i    0.0000 + 0.00001i

Mcc(:, :, 2, 4) =
    0.0000 + 0.00001i    0.0000 + 0.00001i
    0.0000 + 0.00001i    0.0000 - 1.87071i

```

Fonte: Autoria própria

Agora, tem-se em p.u todos os cálculos requeridos basta transforma-los de volta para

suas bases de corrente, como também montar uma tabela para que o resultado possa ser apresentado de forma fácil e prática. Então é chamada a função *relatorio – Mod()*, tendo as matrizes de impedância, matriz dos curtos, das tensões e das contribuições de corrente como argumento de entrada. Obtendo como resultados dessa função as figuras 18 á 20.

Figura 18 – Resultado de correntes de falta da função relatorio-Mod()

T =

14x5 [table](#)

Vbase	Falta	Tipo	Mag	Ang
13800	1	'I3Fsim'	36176	-90
13800	1	['PCC']	864.69	-90
13800	1	'I3Fass'	62658	-90
13800	1	'IlFsim'	42769	-90
13800	1	'IlFass'	74079	-90
13800	1	'IlFmin'	597.5	-0.80046
13800	1	'I2F'	29764	180
13800	2	'I3Fsim'	30113	-90
13800	2	['PCC']	719.78	-90
13800	2	'I3Fass'	52158	-90
13800	2	'IlFsim'	23480	-90
13800	2	'IlFass'	40668	-90
13800	2	'IlFmin'	597.36	-1.4579
13800	2	'I2F'	25466	180

Fonte: Autoria própria

Dessa forma na Figura 18, está disposto a *Table*, e não matriz, uma vez que contem caracteres especiais e números em uma mesma estrutura. Que é o resultado das correntes de falta para os pontos de interesse selecionados na planilha de entrada, Figura 10. Esse resultado já esta nas bases de correntes efetivas e estão prontas para serem inseridas na planilha final dos resultados.

Figura 19 – Resultado de contribuições de corrente de falta da função relatorio-Mod()

Mc =

34x7 [table](#)

Vbase	Falta	De	Para	Tipo	Mag	Ang
13800	1	1	1	'I3Fsim'	27891	-90
13800	1	1	1	'I3Fass'	48309	-90
13800	1	1	1	'IlFsim'	42769	-90
13800	1	1	1	'IlFass'	74079	-90
13800	1	1	1	'IlFmin'	597.5	-0.80046
13800	1	1	1	'I2F'	22663	179.58
13800	1	1	1	['3.I0.sim"]	42769	-90
13800	1	1	1	'3.I0.ass'	74079	-90
13800	1	1	1	'3.I0.min'	597.5	-0.80046
13800	1	1	2	'I3Fsim'	8284.5	90
13800	1	1	2	'I3Fass'	14349	90
13800	1	1	2	'I2F'	7103.4	1.3285
13800	1	1	2	['3.I0.sim"]	0	0
13800	1	2	2	'I3Fsim'	8284.5	-90
13800	1	2	2	'I3Fass'	14349	-90
13800	1	2	2	'I2F'	7103.4	-178.67
13800	1	2	2	['3.I0.sim"]	0	0
13800	2	1	1	'I3Fsim'	9194.9	-90
13800	2	1	1	'I3Fass'	15926	-90
13800	2	1	1	'I2F'	7791.5	-179.93
13800	2	1	1	['3.I0.sim"]	0	0
13800	2	1	2	'I3Fsim'	9194.9	-90
13800	2	1	2	'I3Fass'	15926	-90
13800	2	1	2	'I2F'	7791.5	-179.93
13800	2	1	2	['3.I0.sim"]	0	0
13800	2	2	2	'I3Fsim'	20918	-90
13800	2	2	2	'I3Fass'	36232	-90
13800	2	2	2	'IlFsim'	23480	-90
13800	2	2	2	'IlFass'	40668	-90
13800	2	2	2	'IlFmin'	597.36	-1.4579
13800	2	2	2	'I2F'	17674	179.97
13800	2	2	2	['3.I0.sim"]	23480	-90
13800	2	2	2	'3.I0.ass'	40668	-90
13800	2	2	2	'3.I0.min'	597.36	-1.4579

Fonte: Autoria própria

Figura 20 – Resultado da impedância de Thévenin da função relatorio-Mod()

Tr =

6×3 [table](#)

Falta	R	X
1	0	0.11565
1	0	0.12781
1	0	0.05
2	0	0.13893
2	0	0.14562
2	0	0.25

Fonte: Autoria própria

Nas figuras 19 e 20, analogamente a Figura 18, encontram-se por sua vez as *Tables* prontas para serem inseridas na planilha final com a diferenciação que a Figura 20 os resultados das impedâncias continuam em p.u.

Na execução efetiva da função *do()* tais sub resultados das saídas das funções são omitidos do usuário, podendo ser obtido apenas a partir da execução do algoritmo linha função por função. Como resultado efetivo da função *do()* é criado e aberto um arquivo do tipo planilha o qual terá duas abas, tal qual as figuras 21 e 22.

Figura 21 – Dados de saída da aba CURTO do problema didático

Vbase	Falta	Tipo	Mag	Ang	Ponto	R	jX
13800	1	I3Fsim	36176	-90	1	0,0000	0,1156
13800	1	PCC	865	-90	1	0,0000	0,1278
13800	1	I3Fass	62658	-90	1	0,0000	0,0500
13800	1	I1Fsim	42769	-90	2	0,0000	0,1389
13800	1	I1Fass	74079	-90	2	0,0000	0,1456
13800	1	I1Fmin	597	-1	2	0,0000	0,2500
13800	1	I2F	29764	180			
13800	2	I3Fsim	30113	-90			
13800	2	PCC	720	-90			
13800	2	I3Fass	52158	-90			
13800	2	I1Fsim	23480	-90			
13800	2	I1Fass	40668	-90			
13800	2	I1Fmin	597	-1			
13800	2	I2F	25466	180			

Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Dados de saída da aba MCC do problema didático

Vbase	Falta	De	Para	Tipo	Mag	Ang
13800	2	1	1	I3Fsim	9195	-90
13800	2	1	1	I2F	7791	-180
13800	2	1	2	I3Fsim	9195	-90
13800	2	1	2	I2F	7791	-180
13800	2	2	2	I3Fsim	20918	-90
13800	2	2	2	I1Fsim	23480	-90
13800	2	2	2	I2F	17674	180

Fonte: Autoria própria

Na Figura 21 é possível encontrar os valores das faltas para diversos cenários de curto-circuito, como também para diversos pontos de interesse do sistema modelado. Também é possível encontrar as impedâncias equivalentes de Thévenin. Já na Figura 22 estão os

valores das contribuições de cada nó do sistema modelado para um determinado tipo de falta. Essas contribuições contemplam todas as contribuições possíveis dado os pontos de interesse requeridos.

4.2 EXATIDÃO DO SISTEMA

Nessa etapa será avaliado os resultados obtidos pelo software frente aqueles que foram calculados. A Tabela 1, difere das demais por conter o elemento "Apresentado", o qual se refere as informações obtidas problema proposto. Nela, não foi possível encontrar erros, uma vez que se esse existisse seria inferior a ordem de 10^{-6} evidenciando a precisão dos resultados

As fórmulas adotadas para o cálculo de erro relativo e percentual seguem a baixo

$$E_{abs} = |V_{ger} - V_{calc}| \quad (64)$$

Donde, E_{abs} é o erro absoluto, V_{ger} é o valor gerado pelo software e V_{calc} é o valor calculado

$$E_{\%} = \frac{E_{abs}}{V_{calc}} \quad (65)$$

Tabela 1 – Comparação das impedâncias de Thevénin

	Seq. Positiva	Seq. Negativa	Seq. zero
Apresentado	$j0,13893$	$j0,14562$	$j0,250$
Software	$j0,1389312$	$j0,1456204$	$j0,250$
Erro abs	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
Erro %	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 2, pode-se observar que os erros foram inferiores a 0,05% mesmo não ocorrendo preocupação em preservadas muitas casas decimais para o cálculo da falta. Isto é, se preservados e com maior rigor, os erros devem se reduzir, uma vez que, não foram obtidas discrepâncias em relação as impedâncias de Thevénin.

Nas tabelas 3 e 4 avalia-se o comportamento do software para as contribuições de corrente. Visto que em ambas o erro continua ínfimo, menor que 0,4%. Lembrando que, quando os cálculos são feitos manualmente, são mais susceptíveis a erros, como exemplo erro

Tabela 2 – Comparação das faltas calculadas e geradas pelo software

	$1IF_{sim}$ [A]	$1IF_{min}$ [A]	$2IF_{cc}$ [A]	$3IF_{sim}$ [A]
Calculado	$23.470 \angle -90^\circ$	$597,19 \angle -46^\circ$	$25.461 \angle -180^\circ$	$30,113 \angle -90^\circ$
Software	$23.480 \angle -90^\circ$	$597,36 \angle -1^\circ$	$25.466 \angle 180^\circ$	$30,113 \angle -90^\circ$
Erro abs	10	0,17	5	0
Erro %	0,04	0,02	0,02	0,00

Fonte: Autoria própria

em cascata devido a um número limitado de casas decimais usadas. Já no software esse tipo de erro é ínfimo.

Tabela 3 – Comparação das contribuições de corrente para uma falta trifásica

	De 1 para 2 [A]	De 2 para 2 [A]
Calculado	$9.184 \angle -90^\circ$	$20.929 \angle -90^\circ$
Software	$9.195 \angle -90^\circ$	$20.918 \angle -90^\circ$
Erro abs	9	9
Erro %	0,09	0,04

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Comparação das contribuições de corrente para uma falta bifásica

	De 1 para 2 [A]	De 2 para 2 [A]
Calculado	$7.765 \angle -180^\circ$	$17.695 \angle -180^\circ$
Software	$7.791 \angle -180^\circ$	$17.674 \angle 180^\circ$
Erro abs	26	21
Erro %	0,3	0,12

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Outras comparações

	PCC [MVA]	$1IF_{ass}$	$3IF_{ass}$
Calculado	719,76	$40.651 \angle -90^\circ$	$52.191 \angle -90^\circ$
Software	719,78	$40.668 \angle -90^\circ$	$52.158 \angle -90^\circ$
Erro abs	0.02	17	33
Erro %	0,00	0,04	0,06

Fonte: Autoria própria

É importante observar que os erros aumentam conforme o processo de cálculo se desenvolve. Veja que na Tabela 1 o erro é 0; na Tabela 2, o erro é inferior a 0,05%, já nas

Tabelas 3 e 4 é superior, sendo a menor discrepância entre eles é igual ao maior erro da Tabela 2.

Também, compara-se os resultados do software e com os do cálculo manual para as demais situações da Tabela 5, apresentando novamente um erro ínfimo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo será apresentado as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, bem como as sugestões de trabalhos futuros a partir dos resultados mostrados no Capítulo anterior.

5.1 O CÁLCULO DO CURTO CIRCUITO NO PROJETO DE PROTEÇÃO

O software desenvolvido atende os parâmetros de curto circuito voltado a proteção da derivação a um consumidor ou um fornecedor de energia desde que não tenha prolongação da rede. Esse serve tanto como ferramenta profissional quanto acadêmica, proporcionando agilidade e segurança na acurácia dos resultados. São muitas faltas a serem consideradas, e podem ficar cada vez maiores no acréscimo de mais barras, fontes de geração e transformadores.

Outros meios para o cálculo das faltas, seja de forma manual ou cálculos em planilhas, restringe muito a generalização e aumentam a possibilidade de erro. Então, como forma de superar esses desafios buscando minimizar os erros de cálculos mais complexos, esse algoritmo de cálculo de faltas em ambiente matlab, ficará aberto ao meio acadêmico e profissional, ficará disponível no repositório on-line *https://github.com/Conticaio/do*

Os resultados das simulações foram satisfatórios apresentando um erro pequeno mostrado nas tabelas do Capítulo 4. Pela natureza do software, isto é, um algoritmo com rotinas padrões bem definidas, caso submetido a um teste prolongando, simplesmente aumentando o número de barras, ou até mesmo o número de PI, trará o mesmo grau de qualidade diferindo pelo tempo de processamento maior. No entanto, a variação das topologias do sistema, isso é, de como o sistema elétrico pode ser organizado para determinado cálculo não foi esgotada, até pelo fato de ser muito grande. Contudo, o software apresenta uma generalização ampla que não se atem a grandes especificidades do sistema, aceitando barras imaginárias e impedâncias.

5.2 MELHORIA EM TRABALHOS FUTUROS

O software em si, apesar de genérico para a questão de número de barras, tem um uso mais específico e pontual. Esse fato pode ser notado por apresentar em sua entrada de dados a possibilidade de realizar a defasagem angular que a barra imprime no sistema. O software irá desconsiderar essa informação. Esse acontecimento é excelente para a perspectiva pontual do atuador. Porque não haverá defasagem angular entre aquilo que passa pelo atuador e um curto após um elemento que cria tal defasagem.

Ainda, os curtos apresentados como essenciais, aqui se referem para um projeto de proteção para entradas de serviço, para proteção de transformadores, com até 3 enrolamentos ou que eventualmente surjam com barras fictícias, proteção para paralelismo momentâneo. Para diferentes casos o software pode não trazer as informações necessárias, como é o exemplo da função ANSI 51V, sobrecorrente dependente de tensão, ainda que o software tenha os dados das tensões no estado atual ele não irá apresentá-los nos resultados.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Trazer informações sobre as tensões e correntes em cada barra para todos os curtos, integração para fontes renováveis, integração com ferramentas que auxiliassem a desenvolver a seletividade e a efetiva parametrização de relé

REFERÊNCIAS

- ABB. Transformadores de Potência e Reatores de Derivação. catálogo, p. 7, 1999.
- AMARAL, D.; PEREIRA, C.; SILVA, S. M. Cálculo de correntes de curto-circuito e ajuste dos relés de proteção em microredes. In: **XV-CEEL Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2017.
- ANSI. **American National Standards Institute**. 2019. Disponível em: <<https://www.ansi.org/>>. Acesso em: 25 jun. 2019.
- ARANTES, J. G. Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos em óleo isolante através de redes neurais. **Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais**, 2005.
- BATTAGLIN, P. D.; BARRETO, G. Revisitando a história da engenharia elétrica. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 30, n. 2, p. 49–58, 2012.
- BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- BECHARA W. BISSACOT, A. R. M. Repotenciamento de Transformadores. **Revista Qualimetria**, n. 28, p. 38–43, 1993.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 65,67 p.
- CARVALHO, A. C. C. de. Equipamentos eletrônicos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão. In: . Brasília: Aneel, 2013.
- CHAPMAN, K. S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- FITZGERALD A. E., K. J. C. K. A. **Máquinas Elétricas**. 1. ed. São Paulo: McGraw-hill do Brasil, LTDA, 1975. 2,8,12 p.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, IEEE, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. **Power system analysis & design, SI version**. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.
- IRWIN, J. **Análise básica de circuitos para engenharia**. [S.l.]: LTC, 2019.
- KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência Volume 1**. 1. ed. Florianópolis: LabPlan, 2006.
- KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência Volume 2**. 1. ed. Florianópolis: LabPlan, 2006.

KOSOW, I. L. **Máquina elétricas e transformadores**. 14. ed. São Paulo: Globo, 2000. 11,510 p.

MAMEDE, J. F. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC Ltda., 2017.

MOHAN, N. **Sistemas elétricos de potência : curso introdutório**. [S.l.]: LTC, 2016.

OERSTED, H. C. Der naturwissenschaft verhältniss zu zeitaltern und deren philosophic. 1830.

SADIKU, M. N.; ALEXANDER, C. K.; MUSA, S. **Análise de circuitos elétricos com aplicações**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

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

SEL. **Schweitzer Engineering Laboratories, Tabela ANSI para proteção**. 2019. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>>. Acesso em: 25 jun. 2019.