

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

DOUGLAS HENRIQUE FIDELIS DA SILVA

**SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE MÉDIA TENSÃO POR
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO**

**VOLTA REDONDA
2021**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

**SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE MÉDIA TENSÃO POR
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de Engenheiros Eletricistas.

Alunos:

Douglas Henrique Fidelis da Silva

Orientador:

Prof. Dsc. Hélio de Paiva Amorim Júnior

RESUMO

A geração distribuída proporciona muitos benefícios para o sistema, sendo que um deles é a vantagem de gerar a energia próxima ao centro consumidor, reduzindo os custos com montagem de longas linhas de transmissão. O aumento da confiabilidade e da continuidade de fornecimento ao consumidor é outro ponto positivo da geração distribuída, já o consumidor ao produzir a sua própria energia, poderá atender demanda da sua carga instalada na sua unidade consumidora no momento em que a energia da concessionária estiver indisponível.

Mas a conexão da geração distribuída ao sistema também causa alguns impactos na operação das redes, onde esses impactos devem ser sempre analisados e mitigados a fim de se manter a qualidade de energia que é fornecida aos centros consumidores. A injeção de correntes harmônicas, a alteração do perfil de tensão, a superação de alguns equipamentos e o impacto sobre as proteções do sistema são alguns problemas que a geração distribuída causa na rede na concessionária. Por esse motivo, é muito importante a verificação das grandezas impostas pela rede aos equipamentos, e realizar a comparação dos valores do sistema com os valores nominais dos equipamentos instalados. O equipamento é considerado superado quando os valores impostos pela rede são iguais ou superiores aos valores nominais do equipamento analisado. Quando constatada a superação de algum equipamento, o mesmo deve ser imediatamente substituído por um modelo com capacidade maior ou devem ser estudadas medidas que reduzam a grandeza que superou o equipamento evitando a sua troca.

Nesse trabalho será apresentada a elaboração de um estudo de curto-circuito utilizando o software comercial ETAP a fim de detectar a superação de disjuntores, devido à conexão de um gerador de 8,5 MW na subestação. Será analisada a corrente a ser interrompida pelos disjuntores, e a corrente de pico em que os disjuntores estão submetidos antes e depois da implantação do reator de núcleo a ar, e também, são apresentadas algumas medidas operativas capazes de reduzir o nível da corrente de curto-circuito. Todas as medidas apresentadas nesse trabalho são medidas que buscam reduzir o nível da corrente de curto-circuito, com isso, evitar a substituição dos disjuntores superados.

Palavras-chave: Disjuntor de média tensão, Corrente de curto-circuito, Equipamentos superados.

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Tema	10
1.2	Justificativa	10
1.3	Objetivos	11
1.4	Organização do trabalho	11
2	Curto-circuito	13
2.1	Corrente de curto-circuito	13
2.1.1	Curto-circuito trifásico-terra	15
2.1.2	Curto-circuito monofásico.....	16
2.1.3	Curto-circuito bifásico.....	17
2.2	Cálculo computacional	19
2.3	Impedância ligada entre a nova barra e a barra de referência.....	21
2.4	Impedância ligada entre a nova barra e uma barra já existente.....	22
2.5	Impedância ligada entre duas barras já existentes no circuito	22
2.6	Redução de Kron	23
2.7	Geração distribuída	23
2.8	Sistema radial.....	25
2.9	Sistema em Anel	25
2.10	Conexão de transformadores	26
2.11	Decaimento CA	26
2.12	Norma IEC 60909.....	27
3	Disjuntores.....	31
3.1	Função	31
3.2	Manobra de abertura e fechamento do disjuntor.....	31
3.3	Técnicas de interrupção	32
3.3.1	Disjuntores a óleo.....	32

3.3.2	Disjuntores SF6.....	34
3.3.3	Disjuntores a Vácuo	36
3.3.4	Disjuntores a ar comprimido.....	36
3.4	Superação de equipamentos	37
3.5	Superação por tensão de restabelecimento transitório	37
3.6	Superação por corrente.....	38
3.7	Medidas de Mitigação para redução da corrente de curto-circuito	39
3.8	Aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito	40
3.9	Dispositivos passivos e dispositivos ativos	41
3.10	Dispositivos pirotécnicos	42
3.11	Reatores com núcleo a ar	43
3.10	Solução final para casos de superação por curto-circuito	43
3.11	Arco elétrico	44
3.12	Especificação do EPI	45
4	Estudo de caso.....	47
4.1	Considerações iniciais.....	47
4.2	Transformadores.....	49
4.3	Cabos.....	50
4.4	Disjuntores.....	51
4.5	Estudo de curto-circuito monofásico	52
4.6	Estudo de curto-circuito e análise de superação de disjuntores	54
4.7	Superação de equipamentos	55
4.7.1	Sistema conectado apenas pelo alimentador sem a presença de geração distribuída.....	55
4.7.2	Sistema conectado ao alimentador e ao gerador	57
4.7.3	Seccionamento do barramento de 13,8 KV.....	58
4.7.4	Inserção do reator de núcleo de ar no circuito	60
4.8	Análise de energia incidente	62

5	Conclusão	64
6	Referências bibliográficas	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere (unidade para corrente elétrica)
ANSI	American National Standards Institute
ATP	Alternative Transients Program
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
I_b	Valor eficaz da componente simétrica de curto-circuito no instante de abertura dos contatos do disjuntor, em amperes (A) ou quiloamperes (kA)
I''_k	Valor eficaz da componente simétrica da corrente de curto-circuito inicial, em amperes (A) ou quiloamperes (kA)
I''_{kG}	Valor eficaz da componente simétrica de corrente de curto-circuito inicial de um gerador, em amperes (A) ou quiloamperes (kA)
I_k	Valor eficaz da componente simétrica de corrente de curto-circuito em regime permanente, em amperes (A) ou quiloamperes (kA)
I_n	corrente nominal;
I_p	Valor instantâneo de pico do primeiro e maior semiciclo da corrente assimétrica de curto-circuito, em amperes (A) ou quiloamperes (kA).
I_{rG}	Corrente nominal de um gerador, em amperes (A) ou quiloamperes KA.
IEEE	"Institute of Electrical and Electronic Engineers".
kA	Quiloampere (múltipla da unidade "ampere": A)
kJ	Quilojoule (múltiplo da unidade "Joule")
kV	Quilovolt (múltiplo da unidade "volt")
L	Comprimento;
P	Número de par de polos de uma máquina rotativa.
P_{rM}	Potência nominal de um motor, em kilowatts (kW).
R	Resistência ôhmica, em ohms.
R1	Resistência de sequência positiva;
R_0	Resistência de sequência zero;
S_n	Potência nominal;
T_{min}	Tempo mínimo de abertura dos polos de um disjuntor, em milissegundos (ms).
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória, em quilovolts (kV).
V_n	Tensão nominal;

- Vp Tensão nominal do enrolamento primário;
- Vs Tensão nominal do enrolamento secundário; .
- X Reatância Indutiva, em ohms.
- X1 Reatância de sequência positiva;
- Xo Reatância de sequência zero;
- Z Impedância, em ohms.
- Watt (Unidade para potência elétrica).
- RN Resistência de neutro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Curto-circuito trifásico	15
Figura 2- Diagrama de sequência de um curto-circuito trifásico.....	16
Figura 3- Curto-circuito monofásico	16
Figura 4- Diagrama de sequência de um curto- circuito monofásico.....	17
Figura 5- Curto-circuito bifásico.....	18
Figura 6- Curto-circuito bifásico terra	18
Figura 7- Diagrama de sequência de um curto- circuito bifásico.....	19
Figura 8- Diagrama de sequência de um curto- circuito bifásico terra	19
Figura 9- Conexão de uma nova barra a barra de referência do circuito	21
Figura 10- Matriz que representa a conexão de uma nova barra a barra de referência	21
Figura 11- Conexão de uma nova barra a uma barra já existente.	22
Figura 12- Matriz que representa conexão de uma nova barra a uma barra já existente.....	22
Figura 13- Conexão de duas barras existentes no circuito	23
Figura 14- Sincronização de uma unidade geradora com a rede da concessionária.	24
Figura 15- Corrente de regime transitório, sub-transitório e regime permanente.....	27
Figura 16- Contribuição de um motor assíncrono e um motor síncrono.....	27
Figura 17- Sistema exemplo.....	28
Figura 18- Vista em corte de um disjuntor de grande volume de óleo.	32
Figura 19- Funcionamento de um disjuntor de pequeno volume de óleo.....	33
Figura 20- Vista de corte de um disjuntor de pequeno volume de óleo.....	34
Figura 21- Vista de corte da câmara de interrupção de um disjuntor SF6.	35
Figura 22- Vista de corte da câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo.	36
Figura 23- Superação de um disjuntor por TRT	38
Figura 24- Dimensionamento adequado de um disjuntor por TRT.....	38
Figura 25- Limitador de corrente de curto-circuito aplicado na entrada do barramento	40
Figura 26- Limitador de corrente de curto-circuito aplicado na interconexão entre barramentos	41
Figura 27- Limitador de corrente de curto-circuito aplicado na saída do barramento.....	41
Figura 28- Funcionamento do dispositivo pirotécnico.	42
Figura 29- Circuito de análise.....	49
Figura 30- Corrente de curto-circuito monofásica com transformador sem o neutro aterrado.....	52
Figura 31- Tensão de curto-circuito monofásico com transformador sem o neutro aterrado.....	53
Figura 32- Corrente de curto-circuito monofásica com transformador com o neutro aterrado.....	53
Figura 33- Tensão de curto-circuito monofásico com transformador com o neutro aterrado.....	54
Figura 34- Sistema conectado ao alimentador e gerador desconectado (Circuito simplificado)	55
Figura 35- Sistema conectado ao alimentador e ao gerador (Circuito simplificado)..	57
Figura 36- Seccionamento do barramento de 13.8 kV.	59
Figura 37- Inserção do reator de núcleo de ar no circuito	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados do Gerador.....	47
Tabela 2- Dados do alimentador	47
Tabela 3- Dados dos transformadores	50
Tabela 4- Dados dos cabos do subsistema de 13.8 KV	51
Tabela 5- Especificação dos disjuntores	51
Tabela 6- Nível de curto-circuito trifásico	54
Tabela 7- Análise de superação de disjuntores com gerador desconectado e tie fechado	56
Tabela 8- Análise de superação de disjuntores com gerador conectado	58
Tabela 9- Nível de curto-circuito trifásico com barramento de 13.8 kV seccionado.	59
Tabela 10- Análise de superação de disjuntores no circuito com gerador conectado e com barramento de 13,8 KV seccionado	60
Tabela 11- Dados dos Reatores limitadores	61
Tabela 12- Nível de curto-circuito com reator no sistema	61
Tabela 13- Análise de superação de disjuntores com gerador e reatores conectados ao circuito com tie fechado.....	62
Tabela 14- Nível de energia incidente no barramento de 13.8 KV	63

1 Introdução

1.1 Tema

A constante expansão do sistema nacional integrado devido a crescente de demanda de energia elétrica, e os custos cada vez mais atrativos que o mercado vem apresentando na implantação de usinas fotovoltaica e eólica, fazem que com mais unidades geradoras sejam conectadas ao sistema.

A geração distribuída proporciona muitos benefícios para o sistema, sendo um deles é a vantagem de gerar a energia próxima ao centro consumidor, reduzindo os custos com montagem de longas linhas de transmissão. O aumento da confiabilidade e da continuidade de fornecimento ao consumidor é outro ponto positivo da geração distribuída. O consumidor ao produzir a sua própria energia, poderá atender a demanda da sua da carga instalada na sua unidade consumidora no momento em que a energia da concessionária estiver indisponível.

Um instrumento para a implantação de uma matriz energética mais limpa é a geração distribuída, fazendo com que muitos países adotassem mudanças regulatórias, a fim de promover a geração distribuída sob a forma de energia renovável.

Mas a conexão da geração distribuída ao sistema também causa alguns impactos na operação das redes, onde esses impactos devem ser sempre analisados e mitigados a fim de se manter a qualidade de energia que é fornecida aos centros consumidores. A injeção de correntes harmônicas, a alteração do perfil de tensão, a superação de alguns equipamentos e o impacto sobre as proteções do sistema são alguns problemas que a geração distribuída causa na rede na concessionária.

1.2 Justificativa

O custo da substituição do equipamento superado não é o único a ser levado em consideração, sendo que nem sempre o procedimento é de fácil execução, demandando mão de obra especializada. A interrupção no fornecimento de energia

no momento da troca de equipamento superado também deve ser levada em consideração, já que a paralização resulta em perda de faturamento.

A redução do nível de curto-circuito do sistema evita a superação do equipamento, mas também reduz o nível de energia incidente da barra, proporcionando maior segurança aos trabalhadores que constantemente realizam algum tipo de manutenção no circuito.

Dessa forma, aplicar às medidas de redução de curto-circuito evita a troca dos equipamentos. Com isso se mostra uma medida mais barata do que realizar a substituição do equipamento, que em muitos casos é constatada a superação de mais de um equipamento no circuito.

1.3 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo apresentar através da elaboração de um estudo de curto-circuito e a análise de superação de disjuntores, devido à conexão de um gerador de 10 MW na subestação. Será analisada a corrente a ser interrompida pelos disjuntores, a energia térmica liberada durante a abertura dos contatos do disjuntor e a corrente de pico em que os disjuntores estão submetidos antes e depois da implantação do reator de núcleo a ar, e também, são apresentadas algumas medidas operativas capazes de reduzir o nível da corrente de curto-circuito. Todas as medidas apresentadas nesse trabalho são medidas que buscam reduzir o nível da corrente de curto-circuito, com isso, evitando a substituição do disjuntores superados. Os cenários que serão analisados são quando a demanda de carga é suprida apenas pelo alimentador, e quando o alimentador e o gerador estão conectados a subestação. Para isso será utilizado o software comercial ETAP, para a determinação das correntes de curto-circuito, e o Software ATP para simulação de transitórios.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho é dividido em 5 capítulos. No capítulo 1, é feita a introdução do trabalho e é apresentado o objetivo principal e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os impactos que a conexão de geradores distribuídos causam no sistema, além da metodologia do cálculo para obtenção das correntes de curto-circuito.

O capítulo 3 trata do papel do disjuntor e traz algumas medidas eficazes na redução do nível da corrente de curto-circuito.

No capítulo 4, as medidas de redução da intensidade da corrente de curto circuito são implementadas no circuito proposto. É realizado um estudo de curto-circuito para detecção de quais disjuntores se encontram superados, no cenário em que a demanda das cargas está sendo suprida somente pelo alimentador da concessionária e quando o gerador se encontra conectado ao circuito junto com o alimentador.

Por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões.

2 Curto-circuito

A perda de isolamento de algum componente energizado do sistema elétrico pode dar origem a um curto-circuito. As correntes de curto-circuito tem um valor de pico normalmente superior a 10 vezes ou até mesmo 100 vezes o valor da corrente nominal, dependendo do ponto da instalação onde ocorre a falta. Durante um curto-circuito os condutores, chaves e até mesmo os barramentos sofrem um grande esforço mecânico causando deformações e rompimentos além da queima de equipamentos [1].

Todo componente elétrico que esteja ligado ao sistema e que contribua para intensidade da corrente de curto-circuito é considerado uma fonte de curto-circuito, como é o caso dos geradores, compensadores síncronos e motores de indução.

A corrente de curto-circuito provoca um aquecimento elevado que ocasiona danos a instalação elétrica, e a queda de tensão no momento do curto-circuito pode causar sérios danos a motores. Para que os danos sejam os menores possíveis o sistema de proteção deve eliminar o mais rápido possível a falta. Mas após a retirada do curto-circuito, algumas condições anormais de operação podem vir acontecer no sistema, como é o caso de sub e sobretensões, sub e sobrefrequência e até mesmo sobrecargas [2].

2.1 Corrente de curto-circuito

Existem três componentes para o caso de sistemas elétricos trifásicos [3] :

SEQUENCIA NEGATIVA é constituída de três fasores de módulos iguais, defasadas em 120 graus e com sequência negativa.

SEQUENCIA POSITIVA é constituída de três fasores de módulos iguais, defasadas de 120 graus e com sequência negativa.

SEQUENCIA ZERO é constituída de três fasores iguais em módulo, onde não apresentam defasagem entre eles.

As expressões das tensões V_a , V_b e V_c são representadas por três componentes de sequência:

$$V_a = V_{a0} + V_{a+} + V_{a-} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_b + V_b - \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_c + V_c - \quad (2.3)$$

Ao colocar V_a como referência as equações 2.1, 2.2 e 2.3 podem ser reescritas como mostra as equações 2.4, 2.5 e 2.6, onde $a = 120^\circ$.

$$V_a = V_{a0} + V_{a+} + V_{a-} \quad (2.4)$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a+} + a V_{a-} \quad (2.5)$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a+} + a^2 V_{a-} \quad (2.6)$$

Para simplificar os índices V_{a+} , V_{a-} e V_{a0} serão substituídos por V_1 , V_2 e V_0 . Dessa forma as tensões V_a , V_b e V_c podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A matriz A é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Multiplicando os dois lados da equação 2.7 por A^{-1} são obtidas as componentes de sequência.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Em que:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

2.1.1 Curto-circuito trifásico-terra

O curto-circuito trifásico é o curto de maior intensidade e ocorre quando as tensões das três fases se anulam no ponto de defeito. Conhecer o valor da corrente de curto-circuito trifásica é muito importante na elaboração de um projeto, pois é através dela que são feitos os ajustes máximos de proteção contra sobrecorrente, a determinação da capacidade de interrupção dos disjuntores que irão compor o circuito, capacidade térmica dos cabos e equipamentos e a capacidade dinâmica dos equipamentos e barramentos.

A figura 1 mostra a representação do curto-circuito trifásico.

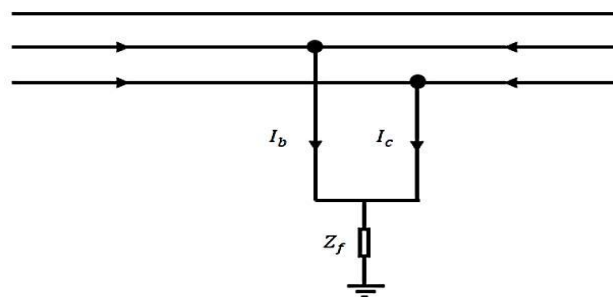


Figura 1- Curto-circuito trifásico
Fonte: [14]

O curto trifásico tem como condições de contorno:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \cdot Z_f \\ I_b \cdot Z_f \\ I_c \cdot Z_f \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = I_a \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Aplicando a condição apresentada na equação 2.9, têm-se :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = I_a \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \cdot Z_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Analisando os resultados apresentados na equação 2.13, é possível verificar que apenas a componente de sequência positiva apresenta valor de tensão. Dessa

$$I1 = I2 = I3 = \frac{Ia}{3} \quad (2.16)$$

Em seguida, utilizando a equação 2.16 e 2.1 na equação 2.14, têm-se:

$$(V1 + V2 + V0) = 3Zf \cdot I1 \quad (2.17)$$

Dessa forma, o curto-circuito monofásico pode ser representado como mostra figura 4.

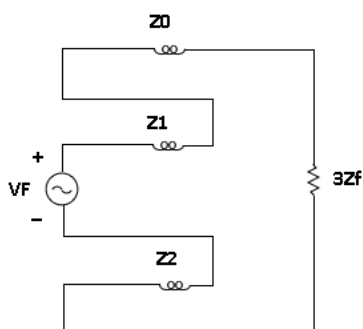


Figura 4- Diagrama de sequência de um curto-circuito monofásico
Fonte: [3]

O valor da corrente que o disjuntor deve interromper é dado pela equação 2.18:

$$Ia = \frac{3Eg1}{Z0 + Z1 + Z2 + 3Zf} \quad (2.18)$$

2.1.3 Curto-circuito bifásico

Existem dois tipos de curto bifásico. O primeiro é aquele onde ocorre o contato entre duas fases, a segundo é parecido com o primeiro só que além do contato entre as duas fases também ocorre o contato com a terra. A figura 5 mostra a representação do curto-circuito bifásico e a figura 6 representa o curto-circuito bifásico terra.

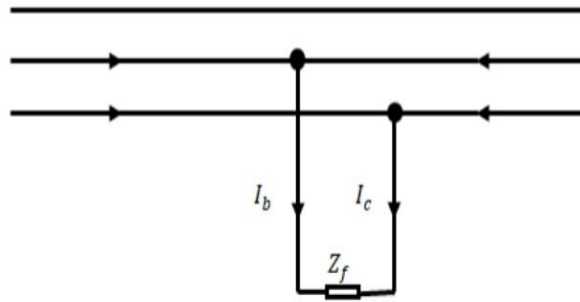


Figura 5- Curto-circuito bifásico
Fonte: [14]

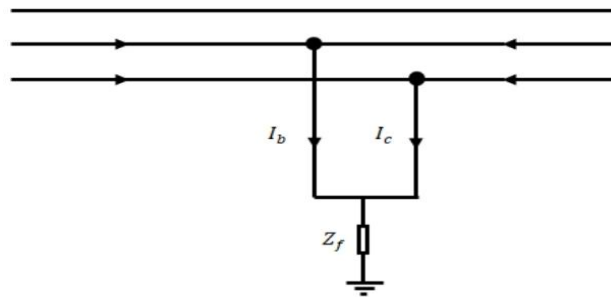


Figura 6- Curto-circuito bifásico terra
Fonte: [14]

O curto bifásico tem como condições de contorno:

$$I_a = 0 \quad (2.19)$$

$$I_b = -I_c \quad (2.20)$$

$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_b \quad (2.21)$$

Utilizando a equação 2.20 e 2.21 na equação 2.7, têm-se:

$$I_0 = 0 \quad (2.22)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(a - a^2) \cdot I_b \quad (2.23)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(a^2 - a) \cdot I_b = -I_1 \quad (2.24)$$

E utilizando a equação 2.5 e 2.6 na equação 2.21, têm-se:

$$V1 - V2 = Zf.Ib \quad (2.25)$$

A figura 7 mostra a representação do curto-circuito bifásico, onde os circuitos de seqüência positiva e negativa são conectados em paralelo.

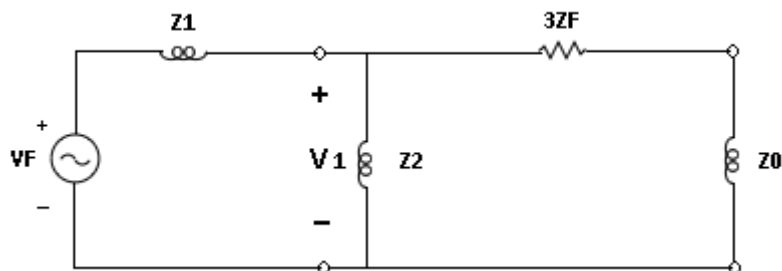


Figura 7- Diagrama de seqüência de um curto-circuito bifásico
Fonte: [3]

Já o curto-circuito bifásico terra tem as seguintes condições de contorno:

$$I0 + I1 + I2 = 0 \quad (2.26)$$

$$V2 = V1 \quad (2.27)$$

$$V0 - V1 = 3Zf.I0 \quad (2.28)$$

A figura 8 mostra como os circuitos de seqüência devem ser conectados para o caso do curto-circuito bifásico terra.

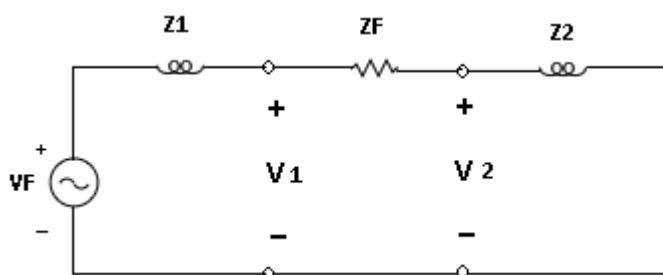


Figura 8- Diagrama de seqüência de um curto-circuito bifásico terra
Fonte: [3]

2.2 Cálculo computacional

Através de métodos computacionais cada elemento que compõe um sistema de potência pode ser representado através da matriz primitiva que descreve matematicamente o circuito interligado. Para análise de curto-circuito utilizando o

método digital é necessário a formação da matriz impedância que pode ser chamada de Z_{barra} .

A matriz Z_{barra} pode ser obtida através de um algoritmo de montagem que é o método empregado nas implementações computacionais. A montagem da matriz Z_{barra} é mais complexa do que a montagem da matriz admitância Y_{barra} , devido a regra de formação da matriz Y_{barra} ser muito simples. Os elementos na diagonal principal da matriz Y_{barra} são a soma de todos elementos conectados a barra e os elementos restantes são o negativo da admitância entre as barras. A matriz impedância pode ser obtida através da inversão da matriz Y_{barra} , mas em estudo de circuitos de grande porte a inversão da matriz Y_{barra} não é recomendada devido ao grande número de cálculos realizados [7].

A matriz impedância é empregada por computadores programas que realizam cálculos de curtos circuitos, sendo que no método manual ocorre a redução das redes até que possa ser encontrada a impedância equivalente ao ponto que ocorre a falta no circuito. A matriz impedância também fornece a impedância do ponto de falta, onde a diagonal principal são todas as impedâncias de Thévenin equivalente a todas as barras do circuito. Em análises de curto-circuito são utilizadas três matrizes impedância: a matriz de sequência positiva, negativa e de sequência zero.

A Matriz Z_{barra} é uma matriz simétrica que não possui elementos nulos e que tem sua dimensão de acordo com o número de barras do circuito que está sendo analisado, sem contar a barra de referência. Já a matriz Y_{barra} ela contém muitos zeros em sua formação, já que sempre que duas barras não forem vizinhas o elemento correspondente a essas duas barras na matriz Y_{barra} é nulo [7].

O único método que possibilita a formação da matriz impedância completa é o método digital. A matriz Z_{barra} contém a impedância equivalente de todas as barras com relação à barra de referência, sendo que esses elementos estão dispostos na diagonal principal da matriz e fora da diagonal principal estão dispostas as impedâncias de transferência entre cada barra e todas outras barras com relação à barra de referência [2].

A construção da matriz Z_{barra} é feita simulando a construção do sistema a partir da barra de referência, acrescentando um ramo de cada vez. Os tipos de ramos a serem incluídos tem rotinas distintas para a formação da matriz. Onde primeiro é incluído o ramo que liga a barra de referência a uma nova barra,

lembrando que cada novo ramo inserido deve ser conectado a uma barra já existente no circuito. Em seguida deve ser inserido o ramo que liga uma barra já incluída a uma nova barra e por último o ramo que liga duas barras já inclusas no sistema [2]. À medida que as barras vão sendo inseridas, a ordem da matriz Z_{barra} vai aumentando até a ordem que corresponde ao número de barras que compõe o circuito analisado, sendo assim um circuito de 5 barras sempre resultará em uma matriz 5x5.

2.3 Impedância ligada entre a nova barra e a barra de referência

Ao incluir uma nova barra no circuito, inclui-se uma nova linha e uma nova coluna na matriz impedância original do sistema, sendo que novos os elementos da matriz impedância fora da diagonal principal são nulos e o elemento da diagonal principal é o valor da própria impedância do ramo que liga as duas barras, como pode ser visto na figura 10 [8] . A figura 9 ilustra a inclusão de um novo ramo que liga uma nova barra a barra de referência do circuito

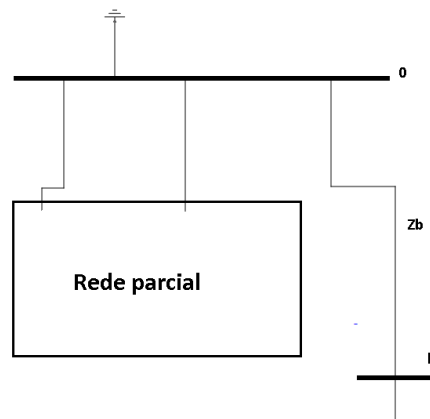


Figura 9- Conexão de uma nova barra a barra de referência do circuito
Fonte: [2]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ \hline V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ \hline 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \\ \hline I_p \end{bmatrix}$$

Z_{orig} *Z_b*

Figura 10- Matriz que representa a conexão de uma nova barra a barra de referência
Fonte: [8]

2.4 Impedância ligada entre a nova barra e uma barra já existente

Quando uma nova impedância é conectada entre uma nova barra e uma barra já existente se acrescenta uma linha e uma coluna na matriz impedância original. Os elementos da nova linha e da nova coluna, exceto o elemento da diagonal principal, são iguais aos elementos da linha e da coluna da respectiva barra em que a impedância foi conectada. O elemento da diagonal principal é a soma do elemento Z_{kk} na qual a barra foi conectada mais a própria impedância do ramo que liga as duas barras, como pode ser visto na figura 12 [8]. A figura 11 ilustra a inclusão de um novo ramo que liga uma nova barra a uma barra já existente no circuito.

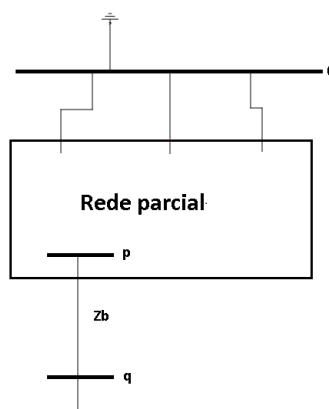


Figura 11- Conexão de uma nova barra a uma barra já existente.
Fonte: [2]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ V_p \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & 0 \\ & Z_{Orig} & & 0 \\ & & & 0 \\ \hline Z_{k1} & Z_{k1} & \cdots & Z_{kN} \\ \hline & & & (Z_{kk} + Z_b) \end{array} \right] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \\ I_p \end{bmatrix}$$

Figura 12- Matriz que representa conexão de uma nova barra a uma barra já existente
Fonte: [8]

2.5 Impedância ligada entre duas barras já existentes no circuito

A inserção dessa nova impedância não altera a ordem final da matriz impedância do sistema já que a barra adicionada é fictícia, mas altera todos elementos da matriz original. O método de montagem da matriz impedância desse caso é similar a do caso onde uma nova impedância é conectada entre uma nova

barra e uma barra já existente, acrescido de mais uma etapa. Na primeira etapa os elementos da nova linha e da nova coluna, exceto os elementos da diagonal principal, são iguais aos elementos da linha e da coluna da respectiva barra em que a impedância foi conectada. O elemento da diagonal principal é a soma do elemento Z_{kk} na qual a barra foi conectada mais a própria impedância que liga as duas barras [8]. A figura 12 ilustra a montagem da primeira etapa da formação da matriz impedância desse método e a figura 13 ilustra a interligação de duas barras existente no circuito.

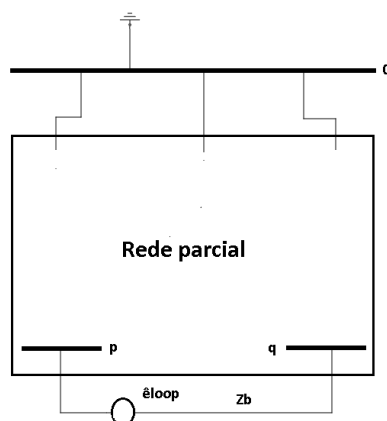


Figura 13- Conexão de duas barras existentes no circuito
Fonte: [2]

2.6 Redução de Kron

A redução de Kron é aplicada nos circuitos quando se deseja eliminar da matriz impedância uma linha e uma coluna referente a uma barra com tensão nula. A redução de Kron elimina as barras do circuito mais também recalcula os elementos da matriz impedância [8].

A segunda etapa consiste na aplicação da redução de Kron, que após a aplicação a ordem da matriz impedância volta a ser igual ao número de barras do circuito analisado.

2.7 Geração distribuída

Nos anos de 2001 e 2002 os consumidores brasileiros estavam vivenciando um período de racionamento de energia elétrica, uma saída encontrada pelos grandes consumidores comerciais e a indústria foi a implantação de usinas geradoras para suprir a demanda de carga. Outro fator que incentivou a criação das usinas geradoras foi o preço elevado da energia elétrica no mercado livre, em vista

que as usinas geradoras conseguem produzir energia a um preço bem mais inferior [1].

Uma maneira de aumentar a confiabilidade das usinas de geração e a continuidade do fornecimento de energia elétrica a carga é a conexão com a rede de energia da concessionária, sendo essa conexão usada também para venda de energia excedente. Essa conexão é regulamentada pela legislação vigente e como cada concessionária possui suas particularidades no seu sistema elétrico, para que a interligação entre a rede da concessionária e a usina geradora se concretize deve atender aos requisitos da concessionária [1].

É preciso realizar a sincronização das fontes para que elas possam funcionar em paralelo, isso é feito ajustando a tensão e frequência a valores iguais ou muito próximos tomando as grandezas da rede da concessionária como referência. O paralelismo é feito de modo automático utilizando uma unidade de supervisão em corrente alternada. A unidade é conectada aos TCs e TPs da usina geradora e aos TCs e TPs da rede da concessionária para que ela possa fazer o gerenciamento de dados e com isso realizar o paralelismo. A concessionária também exige estudos elétricos de fluxo de carga, curto-circuito, harmônicas e além de um projeto de proteção que garanta a integridade da rede da concessionária [1]. A figura 14 ilustra o processo de sincronização de uma unidade geradora com a rede da concessionária.

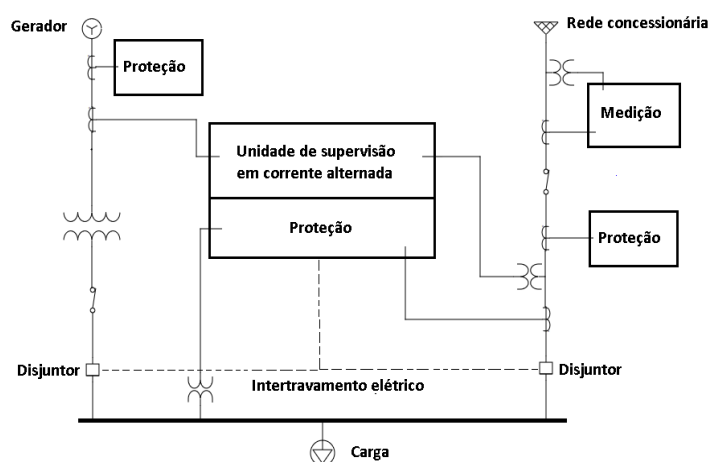


Figura 14- Sincronização de uma unidade geradora com a rede da concessionária.

Fonte: [Autor]

Quando um relé detecta uma falta no circuito, logo ocorre o desligamento da parte em que ocorreu o curto-circuito, podendo está separando a rede de uma parte

do sistema que possui geração distribuída. Essa separação recebe o nome de ilhamento, sendo que um gerador ilhado só poderá ser conectado a rede da concessionária após o ajuste de frequência e tensão. Um grande problema que os geradores causam ao conectarem e rapidamente se desconectarem da rede é o afundamento e a elevação da tensão do sistema[5].

A alteração do nível de curto-circuito pode fazer com que alguns componentes da rede tenham seus limites de suportabilidade ultrapassados e também podendo ocorrer à perda de coordenação da proteção de sobrecorrente da rede. A geração distribuída ocasiona a perda de coordenação da proteção de sobrecorrente devido o surgimento de correntes reversas no momento do curto-circuito, correntes essas que não foram previstas na elaboração da proteção de sobrecorrente.

De acordo com a resolução normativa da ANEEL nº 482/2012 [6] é a concessionária de energia quem define a quantidade de condutores de cada fase e o nível de tensão em que a usina geradora será conectada a rede. Sendo esse requisito muito importante já que cada concessionária possui uma particularidade em sua rede, com isso a conexão de geradores a um nível de tensão adequado minimiza os impactos causados na rede.

2.8 Sistema radial

Um sistema radial é composto apenas por uma fonte de alimentação, sendo que no caso de uma anormalidade do sistema e a atuação da proteção, o que acarreta na interrupção do fornecimento de energia as cargas conectadas no sistema. Devido a sua baixa confiabilidade é mais utilizado em sistemas de distribuição. A proteção desse sistema é relativamente simples em comparação ao sistema em anel, devido a corrente de falta fluir sempre na mesma direção. A intensidade da corrente de curto-circuito nesse sistema diminui a medida que distância da fonte aumenta

2.9 Sistema em Anel

Esse sistema proporciona uma flexibilidade maior sendo usado em sistemas de transmissão, pois é composto por mais de uma fonte. A capacidade de geração conectada ao sistema no momento de um curto-circuito influencia diretamente na

intensidade da corrente de curto-circuito. Como o sistema possui várias fontes a direção da corrente no momento da falta é praticamente imprevisível, sendo necessário o uso de relés direcionais para se obter uma proteção eficaz da rede. Para realização do cálculo de curto-circuito em sistemas em anel são utilizados aplicativos computacionais.

2.10 Conexão de transformadores

A maneira que um transformador é conectado a rede tem grande influência sobre o impacto que a geração distribuída causa no sistema no momento de um curto-circuito monofásico. Na ligação em estrela é inserida uma impedância entre o neutro e a terra, fazendo com que o somatório de impedâncias de sequência zero seja alterado. O método que utiliza um aterramento de alta impedância limita as correntes de curto-circuito monofásicas a correntes extremamente baixas, mas por outro lado eleva as tensões das fases em relação a terra. Esse método é muito usado em sistemas que demandam continuidade de serviço, já que esse método apresenta valores de corrente de curto-circuito relativamente baixos. O caso intermediário é o de baixa impedância, onde não apresenta tensões de fase e terra tão elevadas como no caso de alta impedância. Mas a corrente de curto-circuito monofásica apresenta um valor consideravelmente elevado, não permitindo a operação contínua sob falta [4].

Transformadores conectados em delta no primário e delta no secundário apresentam um valor de impedância infinita para o circuito de sequência zero, dessa forma a contribuição do gerador para a falta monofásica é mínima.

O aterramento do neutro do transformador só é eficaz para redução do nível de corrente de curto-circuito monofásica, não sendo aplicado na redução da intensidade da corrente de curto-circuito trifásico. Ao se fazer uso do aterramento de alta impedância a proteção encontra dificuldade em detectar a falta.

2.11 Decaimento CA

A ocorrência de um curto-circuito próximo ao gerador produz uma corrente de alta intensidade nos primeiros instantes causando o fenômeno de reação da armadura, que é o enfraquecimento do campo da máquina. Esse fenômeno causa uma queda nos enrolamentos do gerador o que diminui a contribuição de corrente

do gerador [4]. A figura 15 ilustra a corrente nos regimes transitório, sub-transitório e regime permanente.

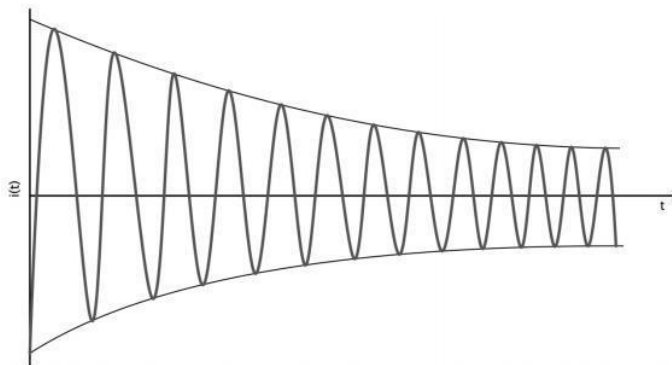


Figura 15- Corrente de regime transitório, sub-transitório e regime permanente.
Fonte: [4]

Os motores também contribuem elevando a corrente no momento em que ocorre a falta no sistema. No momento do curto-circuito o motor perde a tensão e o seu fluxo magnético tende a zero, mas devido a energia eletromagnética armazenada em seu campo girante o motor apresenta uma tensão induzida em seus terminais fazendo com que contribua com o curto-circuito. Motores assíncronos apresentam o decaimento mais rápido que os motores síncronos [4]. A figura 16 ilustra a forma de onda da contribuição de um motor assíncrono e um motor síncrono respectivamente.

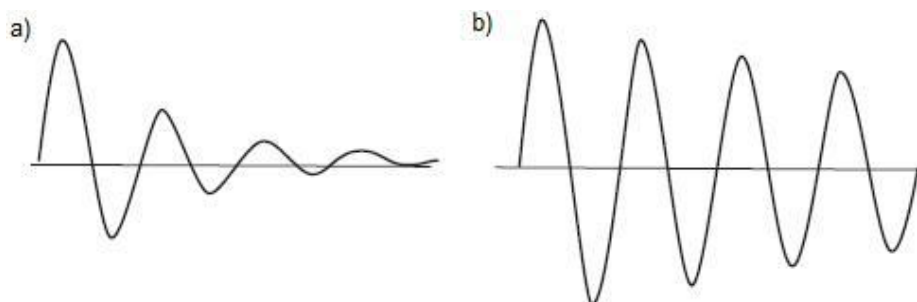


Figura 16- Contribuição de um motor assíncrono e um motor síncrono
Fonte: [4]

2.12 Norma IEC 60909

A norma IEC 60909 é utilizada para calcular as quatro correntes de curto-circuito: a corrente de regime permanente (I_k) que é a corrente de valor constante, corrente simétrica RMS (I_k'') que é a corrente que apresenta simetria em relação ao eixo dos tempos, corrente de pico (i_p) que é a corrente elétrica de maior intensidade

em um período, corrente de interrupção (I_b) que é o valor máximo da corrente de curto-circuito que o fabricante assegura que o disjuntor atue .

Para o cálculo da corrente simétrica em um sistema radial composto por três fontes de curto-circuito como apresentado na figura 17, o cálculo da impedância equivalente visto por cada uma das fontes, é feito considerando somente a fonte que será analisada e as demais fontes serão curto circuitadas. Para o caso da figura 17 esse procedimento deve ser realizado três vezes, para que seja analisada a contribuição das três fontes individualmente, e ao fim a corrente de curto-circuito final é a soma da contribuição das três fontes [4].

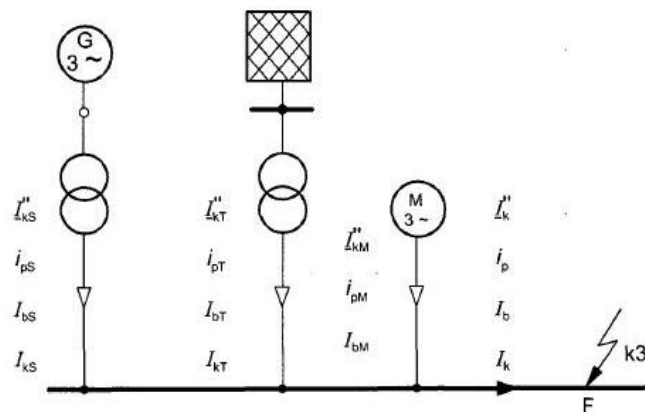


Figura 17- Sistema exemplo
Fonte: [4]

Se no caso houver fontes geradoras muito próximas à falta, ao realizar o cálculo da corrente de interrupção é considerado que a corrente de interrupção é igual a corrente inicial. Para encontrar o valor da corrente de interrupção a corrente simétrica deve ser multiplicada por um fator (μ) que depende do tempo da abertura dos disjuntores, pela proporção de corrente simétrica inicial (I''_{kG}) e a corrente nominal do gerador (I_{rG}) [4].

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad \text{Para } T_{min} = 0,02s \quad (2.29)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-0,3 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad \text{Para } T_{min} = 0,05s \quad (2.30)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad \text{Para } T_{min} = 0,10s \quad (2.31)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I''_{KG}}{I_{rG}}} \quad \text{Para } T_{min} > 0,25s \quad (2.32)$$

Para o caso da existência de motores próximos a falta, é utilizado o fator (q) que também depende dos tempos de abertura do disjuntor, do par de polos (p) e da potência ativa nominal do motor (PrM) [4].

$$q = 1,03 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{PrM}{p}\right) \quad \text{Para } T_{min} = 0,02s \quad (2.33)$$

$$q = 0,79 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{PrM}{p}\right) \quad \text{Para } T_{min} = 0,05 \quad (2.34)$$

$$q = 0,57 + 0,12 \cdot \ln\left(\frac{PrM}{p}\right) \quad \text{Para } T_{min} = 0,10s \quad (2.35)$$

$$q = 0,26 + 0,10 \cdot \ln\left(\frac{PrM}{p}\right) \quad \text{Para } T_{min} > 0,25s \quad (2.36)$$

Dessa forma, a corrente de interrupção no local da falta é a soma das correntes de interrupção de todas as fontes geradoras de curto-circuito.

$$I_b = I_{bs} + I_{bt} + I_{bM} = \mu \cdot I''_{Ks} + I''_{kt} + \mu \cdot q \cdot I''_{kM} \quad (2.37)$$

No cálculo da corrente de regime permanente é desprezada a contribuição de motores. A contribuição de geradores distantes da falta, como é o caso da alimentação da concessionária, equivale a corrente simétrica inicial RMS ($I_{k''}$). Para encontrar a contribuição dos geradores próximos à falta é dada pela equação 2.1, onde (γ) é um fator que depende da curva de excitação da máquina [4].

$$I_k = \gamma \cdot I_{rG} \quad (2.38)$$

Então a corrente de regime permanente é a soma da contribuição do gerador e da concessionária, apenas desprezando a contribuição de motores.

$$I_k = I_{kS} + I_{kt} + I_{kM} = \gamma \cdot I_{rG} + I''_{kt} + 0 \quad (2.39)$$

Para o cálculo da corrente de pico a IEC estabelece a equação:

$$i_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \quad (2.40)$$

Onde o fator k é dado por:

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3 \frac{R}{X}} \quad (2.41)$$

Onde o fator R/X é obtido do equivalente calculado para cada contribuição.

3 Disjuntores

3.1 Função

Os disjuntores são utilizados na condução da corrente nominal do circuito na posição fechada e também na isolação de duas partes do sistema. Mas os disjuntores são empregados nos circuitos elétricos principalmente para realizar a interrupção de correntes de falta. Para realizar tal função de forma satisfatória, os disjuntores devem realizar a interrupção da corrente de defeito no menor tempo possível, a fim de evitar danos aos demais equipamentos conectados ao sistema.

3.2 Manobra de abertura e fechamento do disjuntor

Quando o disjuntor recebe o comando de abertura da sala de controle, o dispositivo identifica o primeiro zero de referência e calcula um tempo de atraso além do tempo que é necessário para realizar a abertura dos contatos. Esse tempo de atraso que o dispositivo calcula é necessário para que o disjuntor realize a abertura dos contatos antes do próximo zero de corrente [13].

Na manobra de fechamento dos contatos do disjuntor, também ocorre um arco elétrico. Esse arco ocorre devido a suportabilidade dielétrica entre os contatos diminuir à medida que o contato móvel vai se aproximando do contato fixo. No instante que ocorre o contato físico a suportabilidade dielétrica alcança valor zero [13].

Quando o disjuntor está manobrando cargas indutivas, como transformadores e reatores, a abertura deve sempre acontecer no tempo médio do arco afim de evitar reignição do arco elétrico. Dessa forma, ocorre a redução do estresse dielétrico e um menor envelhecimento dos componentes. Já o fechamento do disjuntor conectados a cargas indutivas deve ocorrer no pico de tensão, para reduzir intensidade da corrente inrush. Essa medida tem como benéfico a redução das solicitações eletromecânicas dos equipamentos, com isso há um aumento da vida útil do equipamento [13].

A abertura de cargas capacitivas como banco de capacitores e linhas descarregadas, assim como no caso das cargas indutivas deve ocorrer no tempo médio de arco, evitando a reignição, reduzindo o estresse dielétrico e retardando o envelhecimento dos componentes. No caso o fechamento de cargas capacitivas de

ocorrer no zero de tensão, reduzindo a corrente de inrush, reduzindo o desgaste do disjuntor e aumentando a vida útil do equipamento [13].

3.3 Técnicas de interrupção

3.3.1 Disjuntores a óleo

Nos disjuntores a óleo a energia liberada pelo arco no momento da abertura dos contatos do disjuntor causa a decomposição das moléculas de óleo, liberando hidrogênio no interior da câmara do disjuntor, que é um gás que possui um efeito refrigerante muito acentuado [13]. Existem dois tipos de disjuntores que utilizam óleo isolante para extinguir o arco elétrico dentro das câmaras do disjuntor: disjuntores de grande volume de óleo e disjuntores de pequeno volume de óleo.

O disjuntor de grande volume de óleo foi um dos primeiros disjuntores a serem desenvolvidos, sendo que alguns podem ser encontrados em funcionamento até os dias atuais. O disjuntor de grande volume de óleo possui um grande tanque que possui óleo, onde esse elevado volume de óleo é utilizado para extinguir o arco elétrico no momento da abertura dos contatos do disjuntor, e também para promover um isolamento para terra [13].

Cada polo do disjuntor de grande volume de óleo possui duas buchas situadas na parte superior, suas câmaras de interrupção, câmaras onde se encontram os contatos móveis, um mecanismo que realiza a interligação entre as duas câmaras e o mecanismo de acionamento do contato móvel [15]. Como pode ser visto na figura 18.

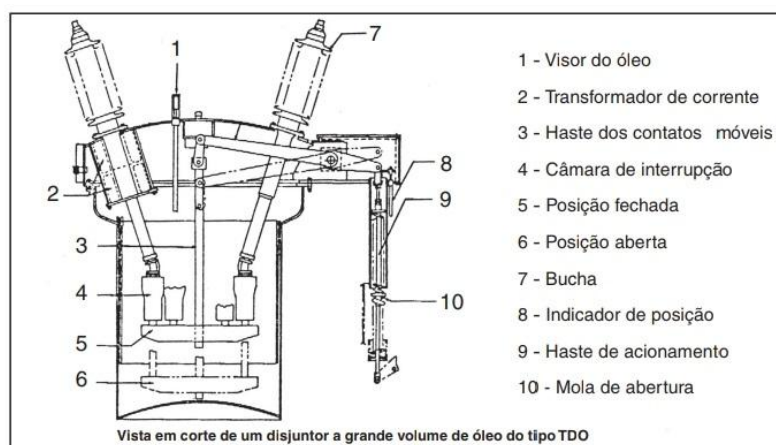


Figura 18- Vista em corte de um disjuntor de grande volume de óleo.

Fonte: [15]

Os disjuntores de pequeno volume de óleo são uma evolução dos disjuntores de grande volume de óleo. A utilização do princípio do sopro transversal nos disjuntores de pequeno volume de óleo é a grande razão dos disjuntores de pequeno volume de óleo possuírem menos óleo que os disjuntores de grande volume de óleo [13].

No sopro transversal à medida que o contato móvel vai se afastando do contato fixo, vai descobrindo aberturas pelas quais os gases produzidos são obrigados a passar devido à alta pressão formada na direção do duto de alívio. Essa alta pressão faz com que o arco entre em contato com as paredes da câmara de extinção e que também entre em contato com um óleo mais frio. No instante em que a corrente passa pelo instante zero não há a liberação de energia, e é nesse momento que a corrente passa pelo instante zero que ocorre uma pequena queda de temperatura na coluna do arco, provocando a deionização do arco. Essa queda na temperatura da coluna do arco provoca um aumento da suportabilidade dielétrica entre os contatos fazendo com que não ocorra uma reignição do arco. Nos disjuntores de pequeno volume de óleo também é utilizada uma bomba de injeção de óleo, que faz com que esse óleo mais frio entre em contato com os contatos no momento que ocorre o arco elétrico. A figura 19 lustra o funcionamento de um disjuntor de pequeno volume de óleo.

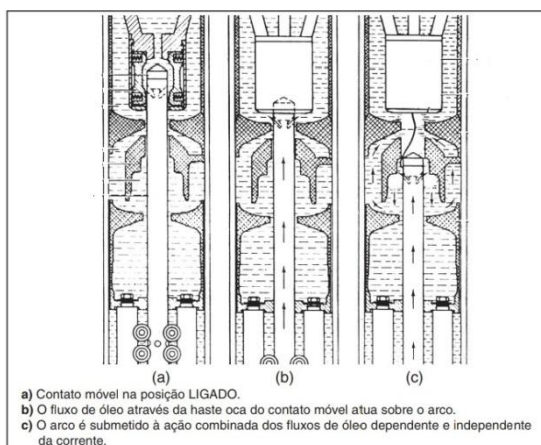


Figura 19- Funcionamento de um disjuntor de pequeno volume de óleo.
 Fonte: [15]

Os disjuntores de pequeno volume de óleo possuem uma parte ativa de interrupção formada por uma ou mais câmaras, nessa parte ativa é ligado o mecanismo de operação que é conectado a parte ativa através de hastes de

acionamento [15]. A Figura 20 ilustra o corte de um disjuntor de pequeno volume de óleo.

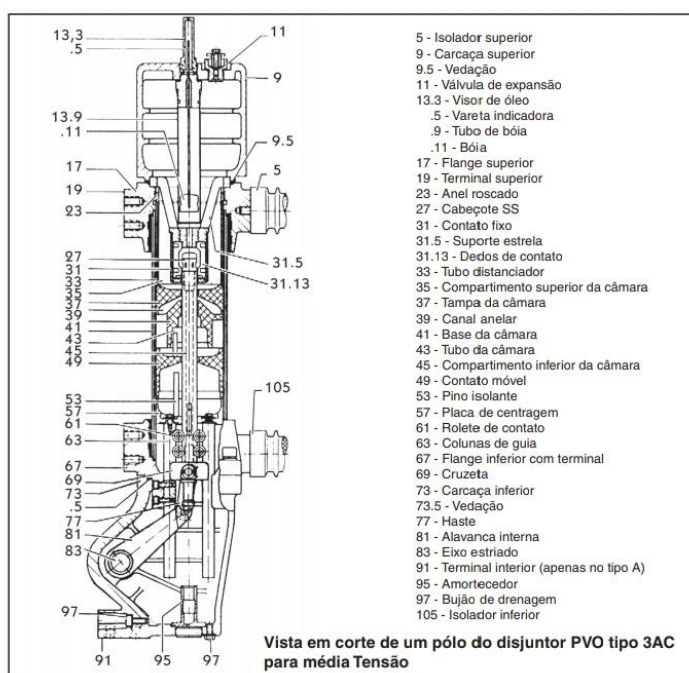


Figura 20- Vista de corte de um disjuntor de pequeno volume de óleo.

Fonte: [15]

3.3.2 Disjuntores SF₆

O SF₆ se trata de gás estável e inerte com peso molecular 146, sendo 5 vezes mais pesado que o ar. Em pressão atmosférica ele apresenta uma rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que a rigidez dielétrica do ar, quando pressurizado suas características dielétricas se compraram as características de um óleo isolante. Quando comparado a um óleo isolante no momento da interrupção do arco elétrico na câmara do disjuntor o SF₆ tem a vantagem de se decompor lentamente e não apresentar sinais de mudança química, liberando apenas SF₂ e SF₄, que apesar de serem gases tóxicos ao final da extinção do arco elétrico eles se recombinam formando produtos não tóxicos. Caso a haja a contaminação do SF₆ pelo ar, não ocorre uma mudança significativa das propriedades dielétricas do isolante [13].

Por se tratar de um gás eletronegativo, o SF₆ tem grande facilidade de capturar eletros livres. No momento do arco elétrico essa propriedade diminui a condutância do arco elétrico no momento em que a corrente passa pelo zero [13].

Nos disjuntores que utilizam a tecnologia puffer ou “autossopro” o SF₆ permanece no disjuntor a uma pressão constante. A pressão necessária para

3.3.3 Disjuntores a Vácuo

Nos disjuntores a vácuo o arco elétrico que se forma entre os contatos do disjuntor é mantido apenas por vapor metálico liberado dos contatos, sendo que quanto maior for à intensidade da corrente a ser interrompida maior a formação de vapor metálico. Quando corrente passa pelo zero, o vapor metálico se condensa e a região entre os contatos é rapidamente deionizada, com isso extinguindo o arco [13].

Os disjuntores a vácuo possuem um corpo cilíndrico cerâmico, onde em um dos lados é constituído de fole de expansão responsável pela impermeabilidade da câmara [15]. A figura 22 ilustra o corte da câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo.

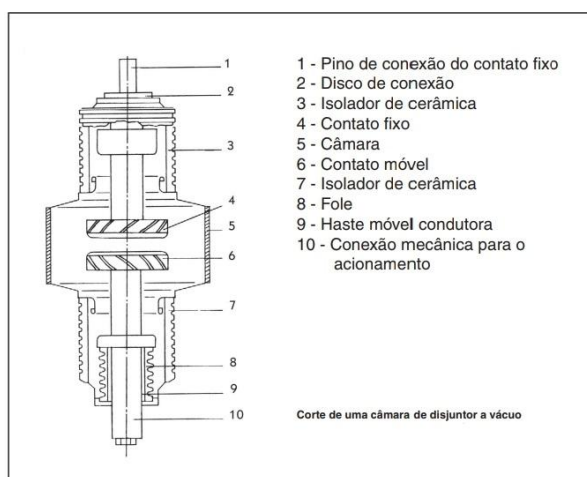


Figura 22- Vista de corte da câmara de interrupção de um disjuntor a vácuo.

Fonte: [15]

3.3.4 Disjuntores a ar comprimido

A extinção do arco elétrico é obtida através da liberação de ar comprimido na câmara de ar comprimido entre os contatos dos disjuntores, causando o resfriamento do arco e sua compressão [13].

Nos disjuntores de ar comprimido tanto a câmara de ar comprimido quanto o reservatório de ar comprimido se mantem pressurizados durante o funcionamento do circuito elétrico em que o disjuntor se encontra conectado. No momento da abertura dos contatos do disjuntor a válvula de exaustão da câmara e a válvula de sopro do reservatório são abertas, a fim de resfriar a região entre os contatos. Quando o

contato móvel se abre totalmente a câmara é fechada deixando o disjuntor cheio de ar comprimido e livre de substâncias ionizadas [13].

O sistema de sopro de duas direções aumenta consideravelmente a eficiência do disjuntor, já que o sopro dos produtos do arco elétrico em duas direções aumenta a suportabilidade dielétrica, com isso não sendo necessário utilizar resistores de abertura para a interrupção de faltas que possuem uma elevada taxa da tensão de restabelecimento transitória [13]

3.4 Superação de equipamentos

A conexão de usinas geradoras e de novas cargas a rede da concessionária implica em um aumento da corrente de curto-circuito e da corrente que flui pela rede. A cada nova conexão seus valores se elevam e podem ultrapassar a capacidade dos disjuntores existentes no circuito.

Os procedimentos de rede são documentos elaborados pelo próprio ONS e pelos agentes aprovados pela ANEEL, onde são estabelecidas as diretrizes para análise de superação da capacidade de chaves seccionadoras, transformadores de corrente e disjuntores. As grandezas do circuito que devem ser comparadas com as grandezas nominais dos equipamentos como: corrente de carga, corrente de curto-circuito, constante de tempo da rede e tensão de restabelecimento transitória [11].

3.5 Superação por tensão de restabelecimento transitório

A tensão de restabelecimento transitório é a diferença de potencial que aparece nos terminais do disjuntor, nos instantes após a interrupção da corrente de curto-circuito promovendo um arco elétrico. Se a tensão nos terminais do disjuntor for superior a suportabilidade dielétrica do meio extintor ou superar os limites térmicos, ocorre a superação pela tensão de restabelecimento transitório, causando reignição do arco elétrico que destrói o disjuntor [4].

A tensão de restabelecimento transitório atinge valores críticos no disjuntor, após a abertura dos contatos por faltas ocorridas próximo ao terminal do disjuntor e por faltas quilométricas, que são faltas ocorridas a poucos quilômetros do disjuntor.

Devido a elevada intensidade da corrente de uma falta quilométrica e de apresentar uma taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória elevada a atuação dos disjuntores é mais complexa do em faltas terminais. Nos

disjuntores a suportabilidade à taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória é menor para correntes mais elevadas, dessa forma a redução do valor da corrente a ser interrompida aumenta a suportabilidade à taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória [13].

Os testes de TRT são feitos comparando o oscilograma do sistema com a curva de suportabilidade do disjuntor. Caso o oscilograma ultrapasse a curva de suportabilidade do modelo de disjuntor em análise, o disjuntor está superado [4]. A figura 23 ilustra uma condição de um disjuntor superado pela TRT e a figura 24 ilustra o dimensionamento adequado do disjuntor com relação a TRT.

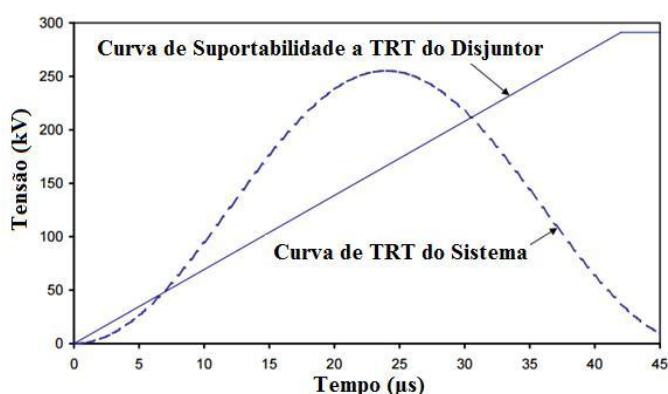


Figura 23- Superação de um disjuntor por TRT
Fonte: [4]

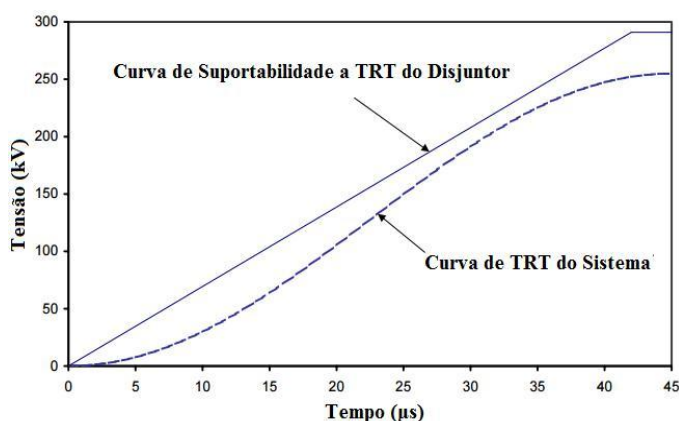


Figura 24- Dimensionamento adequado de um disjuntor por TRT.
Fonte: [4]

3.6 Superação por corrente

No momento em que a corrente do circuito ultrapassa a corrente determinada pelo fabricante do disjuntor em análise, o disjuntor se encontra superado. Os disjuntores são testados com base nas normas em que eles foram fabricados,

podendo ser pela norma IEC ou ANSI e suas especificações de corrente de curto-circuito e de regime permanente podem ser encontradas nos catálogos de equipamentos. No catálogo “making capacity” se encontram a informações técnicas dos disjuntores testados com base na norma IEC e no “closing and latching rating” os disjuntores testados com base na norma ANS [4].

3.7 Medidas de Mitigação para redução da corrente de curto-circuito

Quanto mais próxima a localização das fontes geradoras das unidades consumidoras maior a intensidade da corrente de curto-circuito. A conexão de geradores paralelos ao sistema da concessionária tem se mostrado o grande responsável pelo aumento do nível de curto-circuito da rede em que se encontra conectado. Se no caso a capacidade dos disjuntores e barramentos forem superados, eles devem ser trocados por outros modelos que atendam as características do circuito onde estão sendo empregados. A troca de componentes de uma rede tem um custo relativamente elevado, e muitas das vezes levam a interrupção do fornecimento de energia causando perda de faturamento e impactos negativos nos indicadores de continuidade.

Como a substituição de equipamentos tem um custo elevado e causam vários transtornos, algumas medidas podem ser adotadas como soluções de menor custo e em meio a uma emergência.

No desligamento sequencial o disjuntor superado só atua após a operação de outro disjuntor em um terminal remoto. Esta é uma técnica de alta complexidade, que causa desligamentos indevidos e instabilidade na rede [12].

O seccionamento de barramentos consiste na divisão do barramento em mais circuitos. No caso de duas fontes geradoras que alimentam um barramento onde foi realizada a divisão do barramento, cada carga só receberá a contribuição de uma das fontes e não das duas como ocorria antes da divisão. Dessa forma, só existe contribuição de uma fonte na corrente de defeito.

Para Realizar a alteração do nível de é necessária a especificação de novos transformadores podendo optar por transformadores com a impedância mais elevada aos que serão substituídos. É uma medida de custo elevado quando comparada a troca de disjuntores superados [12].

Como algumas medidas citas acima são de carácter paliativo ou possuem um custo muito elevado, o uso de dispositivos limitadores de corrente não implica na substituição de equipamentos da rede e tem apresentado um bom custo x benefício.

3.8 Aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito

O uso de limitadores de corrente em série com as fontes reduz o nível da corrente de curto-circuito do sistema a jusante do limitador de corrente, possibilitando que todos equipamentos conectados no sistema a montante do limitador possam ser dimensionados para uma corrente mais baixa [13]. A figura 25 ilustra um sistema utilizando um limitador de corrente de curto-circuito aplicado na entrada do barramento.

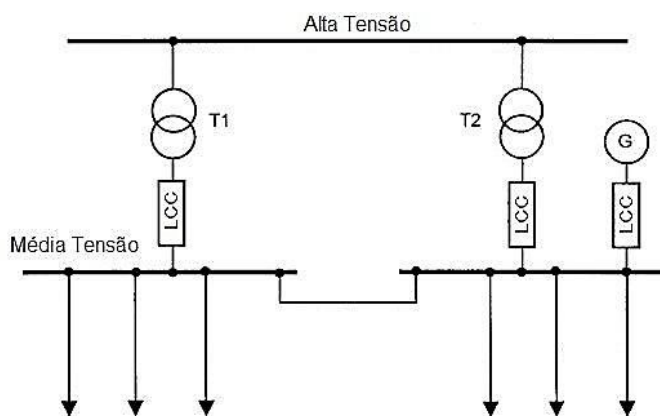


Figura 25- Limitador de corrente de curto-circuito aplicado na entrada do barramento
Fonte: [4]

A configuração que utiliza os limitadores de corrente na interconexão dos barramentos pode ser vista na figura 26, e essa é uma configuração que diminui a contribuição entre os barramentos, fazendo com que nem todo o sistema precise ser dimensionado para capacidade máxima da corrente de curto de curto-circuito [13].

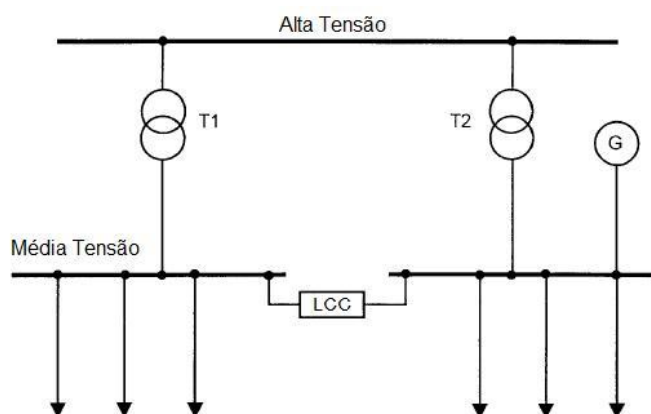


Figura 26- Limitador de corrente de curto-circuito aplicado na interconexão entre barramentos
Fonte: [4]

Com os limitadores conectados na saída de cada carga, o subsistema pode ser dimensionado para um nível de curto-circuito mais baixo, e o sistema principal precisa ser dimensionado para a capacidade máxima da corrente de curto-circuito [13]. A figura 27 ilustra um sistema com limitador de corrente de curto-circuito aplicado na saída do barramento

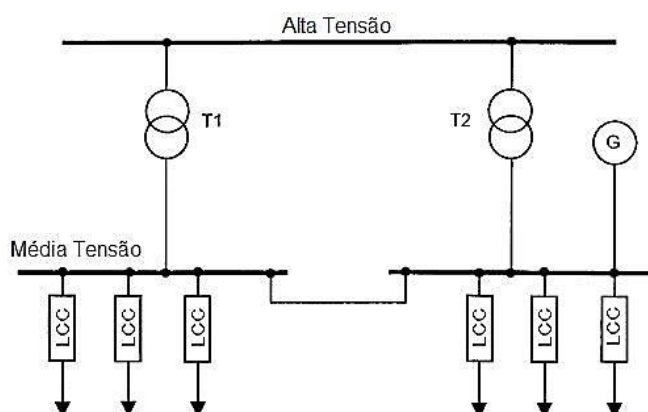


Figura 27- Limitador de corrente de curto-circuito aplicado na saída do barramento
Fonte: [4]

3.9 Dispositivos passivos e dispositivos ativos

São caracterizados como dispositivos passivos aqueles que aumentam a impedância em condições normais e de curto-circuito. Já os dispositivos ativos são aqueles que possuem baixa impedância em condições normais de funcionamento e um rápido crescimento da impedância em condições de curto-circuito [4].

Alguns exemplos de dispositivos passivos são os transformadores de alta impedância e os reatores com núcleo a ar. Os dispositivos ativos são divididos em

dois grupos, sendo que no primeiro grupo se encontram os dispositivos capazes de realizar a interrupção de corrente e também limitar a intensidade da corrente de curto-circuito, um exemplo é o dispositivo pirotécnico. Já o segundo grupo possui a característica de apenas limitar a corrente de curto-circuito. Os dispositivos que compõem o segundo grupo dos dispositivos ativos, são os reatores de núcleo saturado e os supercondutores.

3.10 Dispositivos pirotécnicos

O equipamento é munido de duas câmaras em paralelo, onde uma possui um fusível que interrompe a corrente de curto-circuito e a outra um condutor de cobre que conduz a corrente nominal do circuito. Esse condutor de cobre possui pequenos estrangulamentos em sua seção, onde são fixadas pequenas cargas explosivas. As cargas explosivas são controladas através de uma lógica de disparo, que ao detectar um curto-circuito faz com que as cargas explosivas sejam detonadas, com isso destruindo o condutor de cobre e fazendo com que a corrente passe pelo fusível, que logo extingue a corrente de curto-circuito [13].

Após a atuação do dispositivo pirotécnico é necessário fazer a substituição das duas câmaras, para que seja restabelecida a conexão do circuito. O funcionamento de um dispositivo pirotécnico pode ser visto na figura 28.

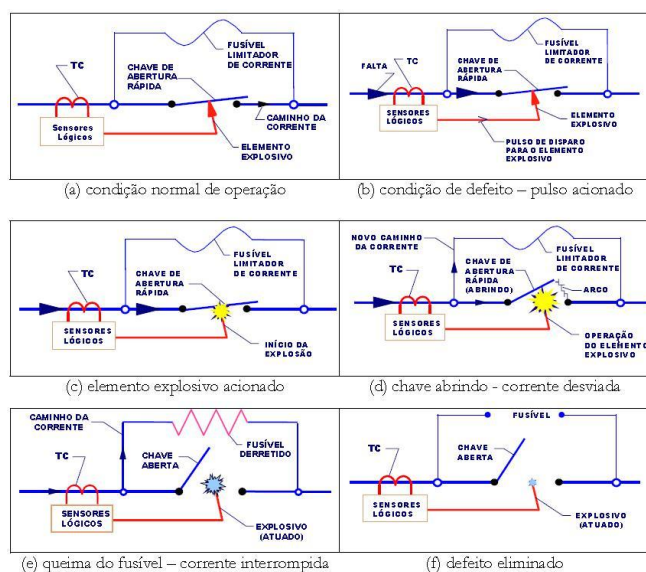


Figura 28- Funcionamento do dispositivo pirotécnico.
Fonte: [4]

3.11 Reatores com núcleo a ar

É um dispositivo passivo que tem a finalidade de aumentar a impedância do sistema, podendo ser instalados em série com a fonte geradora, seccionando barramento e alimentadores de saída. O reator é conectado ao sistema permanentemente e as suas características são constantes em condições normais de funcionamento tanto quanto no momento em que ocorre uma falta no sistema. O uso de reatores no sistema apresenta uma queda de tensão permanente, causando perdas constantes. A determinação da reatância que será utilizada é feita através de estudos de curto-circuito, sempre levando em consideração o limite determinado por cada fabricante. [13].

Uma maneira de aperfeiçoar o uso dos reatores é seu uso em paralelo com os dispositivos pirotécnicos, onde o reator é curto circuitado pelo dispositivo pirotécnico durante a operação normal. No momento da falta o dispositivo pirotécnico atua limitando o curto-circuito, com isso o dispositivo pirotécnico passa a ficar inoperante até que a equipe de manutenção realize a troca de suas câmaras. Com o dispositivo pirotécnico fora de operação a corrente flui pelo reator, caso ocorra outra falta no sistema o disjuntor extingue o curto-circuito [4].

Os reatores limitadores produzem um campo magnético elevado, sendo necessária uma distância maior entre as fases. Portanto, em subestações que possuem pouco espaço, a aplicação de um reator limitador de corrente é inviável.

Quando o reator é implantado na linha, também são inseridos capacitores que são conectados permanentemente a barra. Os capacitores tem a função de reduzir a frequência natural da tensão de restabelecimento transitória, já que sua frequência é determinada pelas capacitâncias e indutâncias do circuito. Mas os capacitores não altera o valor de pico da tensão de restabelecimento transitório [13].

3.10 Solução final para casos de superação por curto-circuito

As medidas apresentadas tem a finalidade de diminuir o nível da corrente de curto-circuito. Se no caso for constatado que no estudo de curto-circuito que mesmo com aplicação das medidas de redução da corrente de curto-circuito ainda ocorrerá

à superação do disjuntor, ou até mesmo quando elas se mostrarem antieconômicas, os disjuntores podem ser recapitados ou até mesmo substituídos.

A elevação da capacidade de interrupção um disjuntor consiste na substituição dos mecanismos por outra tecnologia mais moderna. Esses fatores fazem com que a medida de elevar a capacidade de interrupção de um disjuntor seja uma medida pouco econômica [13].

Quando a decisão tomada for à substituição dos disjuntores, os disjuntores superados podem ser aplicados em outros projetos que demandem uma capacidade de interrupção inferior a sua capacidade de interrupção nominal do equipamento.

3.11 Arco elétrico

Os trabalhadores podem ser expostos a energia incidente em qualquer situação em que esteja trabalhando com equipamento energizado ou até mesmo próximo ao equipamento. A IEEE Std 1584 trata da análise de calor associada a energia liberada no momento de um arco elétrico, tendo como a principal preocupação as queimaduras que uma pessoa possa sofrer.

A potência de curto-circuito e o tempo de duração está associado ao valor de energia incidente. Por isso estudos de curto-circuito e de coordenação e seletividade são tão importantes na decisão de tomada de medidas para redução dos valores.

Os fatores que influenciam no nível de energia incidente em uma superfície são: a corrente de curto-circuito presumida no ponto, tempo de eliminação da falta, a distância entre o trabalhador e o ponto em que ocorreu o curto-circuito, o nível de tensão do barramento e o tipo de ligação do transformador. As unidades usadas para medir a energia incidente são joules por centímetro quadrado (J/cm^2) e calorias por centímetro quadrado (Cal/cm^2), sendo que $1,2 cal/cm^2$ já é suficiente para causar queimaduras na pele humana [9].

É importante que em lugares onde o nível de energia incidente seja elevado, o trabalhador use uma vestimenta que seja resistente aos efeitos térmicos do arco elétrico. Segundo o caderno de especificação técnica de vestimenta resistente aos efeitos térmicos do arco elétrico da Chesf [10] o uniforme de classe II suporta até $8 Cal/cm^2$.

3.12 Especificação do EPI

Para evitar um acidente envolvendo um arco elétrico é necessário o conhecimento detalhado da atividade, tecnologia e detalhes do ambiente onde ocorrerão essas atividades. A análise de risco auxilia os trabalhadores na identificação e controle dos riscos.

Após a análise de risco, é preciso especificar o EPI que atende as características dos riscos constatados na instalação e das atividades e que serão realizadas. Para isso é necessário ter conhecimento dos conjuntos normativos, podendo ser os conjuntos normativos norte-americanos ou os internacionais [16].

As normativas americanas foram desenvolvidas através de experiências vivenciadas pelos norte-americanos, e tem como objetivo principal manter padrões para a supervisão de atividades, treinamentos e a especificação do EPI que deve ser utilizado em cada cenário. As normas para os equipamentos de proteção são estabelecidos pelo comitê Técnico de segurança em eletricidade da National Fire Protection Association – NFPA. As normas de vestimenta são: NFPA 2112 que é a norma para vestimentas resistentes a chama para proteção industrial contra fogo repentino, e a norma NFPA 70E que é norma de segurança e eletricidade no local de trabalho [16].

A norma NFPA 70E estabelece a proteção mínima das vestimentas em função das categorias de risco [16].

- São classificadas como risco mínimo as instalações que apresentem energia incidente até 1,2 cal/cm². Esta instalação assume a categoria de risco 0, onde o ATPV mínimo requerido para o EPI, recebe status de não aplicável.
- São classificadas como risco leve as instalações que apresentem energia incidente na faixa de 1,2 a 4,0 cal/cm². Esta instalação assume a categoria de risco 1, onde o ATPV mínimo requerido para o EPI é de 4,0 cal/cm².
- São classificadas como moderado as instalações que apresentem energia incidente na faixa de 4,1 a 8,0 cal/cm². Esta instalação assume a categoria de risco 2, onde o ATPV mínimo requerido para o EPI é de 8,0 cal/cm².
- São classificadas como risco elevado as instalações que apresentem energia incidente na faixa de 8,1 a 25,0 cal/cm². Esta instalação assume a categoria de risco 3, onde o ATPV mínimo requerido para o EPI é de 25,0 cal/cm².

- São classificadas como risco elevadíssimo as instalações que apresentem energia incidente na faixa de 25,1 a 40,0 cal/cm². Esta instalação assume a categoria de risco 1, onde o ATPV mínimo requerido para o EPI é de 40,0 cal/cm².

O EPI atua como uma barreira, reduzindo e eliminando lesões causadas ao trabalhador que é exposto a um acidente que envolve um arco elétrico. Para a redução dos níveis de energia incidente devem ser adotadas medidas administrativas e de engenharia nas fases de projeto e montagem das instalações [16].

4 Estudo de caso

4.1 Considerações iniciais

Esse capítulo tem a finalidade de analisar os efeitos da geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito em uma rede de distribuição. O circuito que será analisado é um circuito genérico, que de certa forma possui características típicas das redes encontradas em todo Brasil. A rede é alimentada por uma linha de transmissão com tensão de 34,5 KV, que está conectada a dois transformadores de potência 5MVA que reduzem a tensão para 13,8 KV. Foi conectado a essa barra de 13,8 KV um gerador síncrono com uma potência de 8,5 Mw através de um transformador de potência de 10MVA que eleva a tensão de 6 KV para 13,8 KV.

As tabelas 1 e 2 mostram algumas características importantes sobre a fonte e sobre o gerador conectado a subestação.

Gerador distribuído (Base: 100 MVA)			
Potência ativa	8 MW	R1 (%)	2
Tensão nominal	6 KV	X1 (%)	18
Fator de potência	0.85	R0 (%)	1
Número de polos	4	X0 (%)	7

Tabela 1- Dados do Gerador
Fonte: Autor

Alimentador (Base: 100Mva)	
Tensão nominal	34,5 KV
Impedância de sequência positiva	0,6199+j4,95917 Pu
Impedância de sequência negativa	0,6199+j4,95917 Pu
Corrente de curto-circuito (kAsc)	33,485 KA

Tabela 2- Dados do alimentador
Fonte: Autor

As expressões através do equacionamento das correntes de falta rapidamente se tornam grandes e complexas, fazendo que muitas das vezes os resultados obtidos não fossem de confiança. Dessa forma, análise será feita utilizando o programa comercial de análise de redes ETAP.

O ETAP é um programa computacional para projeto, análise, otimização, monitoramento, controle e automação de sistemas elétricos. As principais ferramentas disponíveis são:

- Short-circuit- Estudos de curto-circuito baseados na norma ANSI/ IEEE.
- Arc Flash- Desenvolvimento de estudo de energia incidente por arco elétrico com base na norma IEEE 1584.
- Motor Acceleration- Desenvolvimento de estudos de partida de motores.
- Harmonic- Estudos de harmônicos e projeto de filtros.
- Transient Stability- Estudo de estabilidade transitória.
- Star (Protection e Coordination)- Desenvolvimento de estudos de coordenação e seletividade da proteção.

Para o estudo de caso desse trabalho foram utilizadas apenas as ferramentas Short-circuito e Arc Flash.

Com o sistema completo modelado no ETAP, foram propostos quatro cenários para desenvolvimento do estudo de curto-circuito e análise de superação dos disjuntores.

- No cenário 1 será feito o estudo de curto-circuito sem a presença do gerador distribuído no sistema e a chave do barramento de 13.8kV fechada.
- No cenário 2 será feito o estudo de curto-circuito com o gerador distribuído conectado ao barramento de 13.8 kV, e a chave do barramento de 13.8 kV se encontra na posição fechada.
- No cenário 3 será feito o estudo de curto-circuito com o gerador distribuído conectado ao barramento de 13.8 kV, e a chave do barramento de 13.8 kV se encontra na posição aberta.
- No cenário 4 será feito o estudo de curto-circuito com os reatores conectados em série com alimentador e em série com o gerador distribuído que está conectado ao barramento de 13.8 kV. A chave do barramento de 13.8 kV se encontra na posição fechada.

O cálculo de curto-circuito é padronizado pela norma americana ANSI/IEEE Std 141 e pela norma europeia IEC 60909. Neste trabalho será utilizada a norma europeia IEC 60909, onde serão simulados quatro casos para o curto-circuito trifásico, com intuito de detectar se há superação dos disjuntores do circuito, também será feita uma análise dos efeitos causados pelo tipo de ligação de

transformadores para redução da magnitude do curto-circuito monofásico e por fim será analisado o nível de energia incidente na barra de 13,8 KV. Para a análise de energia incidente dos quatro cenários propostos foi utilizada a norma a IEEE 1584.

Na figura 29 pode ser visto o circuito de teste, que é composto de um alimentador com tensão de 34,5 KV conectado a dois transformadores de 5 MVA, um gerador de 8,5 Mw conectado a um transformador de 10 MVA. O Subsistema de 13,8 KV é dividido em duas barras possibilitando maior flexibilidade de operação, sendo composto por 8 transformadores que reduzem a tensão de 13,8 KV para 0,44 KV ou 0,22 KV, e na baixa tensão pode ser visto 8 cargas com características mistas de cargas rotativas e cargas estáticas. As cargas rotativas presente no circuito são alimentadas por inversores de frequência não regenerativos, dessa forma em caso de falta não haverá contribuição das cargas rotativas na corrente de curto-circuito.

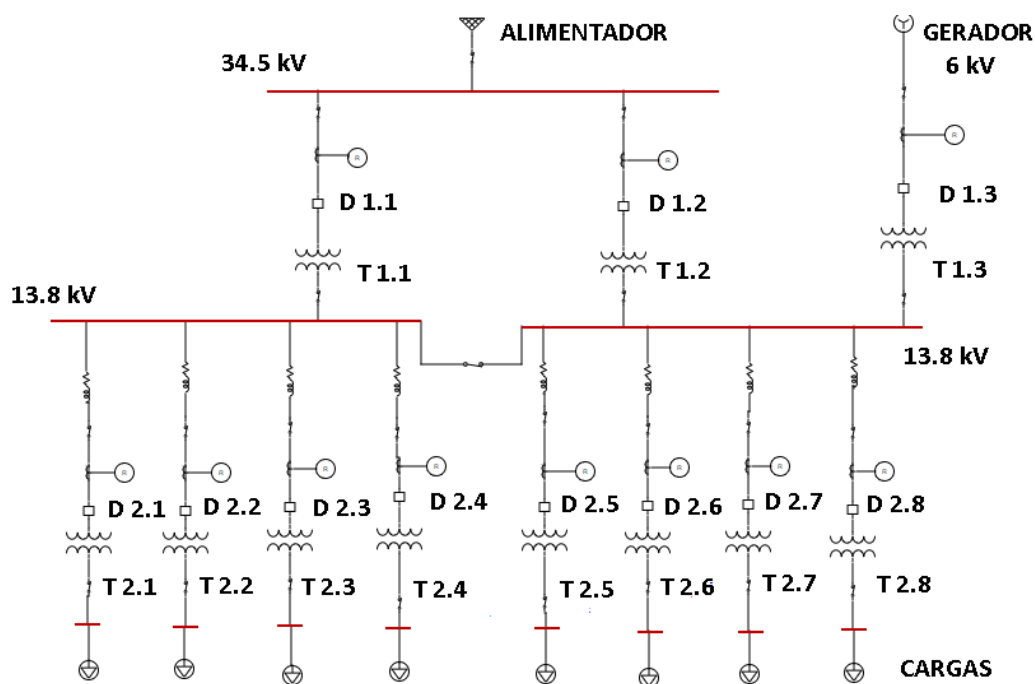


Figura 29 - Circuito de análise
Fonte: Autor

4.2 Transformadores

Os transformadores que estão conectados ao alimentador e ao gerador estão conectados em delta no primário e delta no secundário. Já os transformadores que tem seu lado de alta tensão conectado no barramento de 13,8 KV estão com

primário conectado em delta e o secundário em estrela. A tabela 3 mostra algumas características dos transformadores presente no circuito.

Transformadores 1.1 e 1.2 (BASE : 10 MVA)			
Sn (MVA)	10	R1 (%)	0,575
VP (kV)	34,5	X1 (%)	6,976
VS (kV)	13,8	Z0 (%)	7
Ligação	Delta/ Delta	R0 (%)	0,575
Z1 (%)	7	X0 (%)	6,976
Transformador 1.3 gerador (BASE : 10 MVA)			
Sn (MVA)	10	R1 (%)	0,64
VP (kV)	6	X1 (%)	8,325
VS (kV)	13,8	Z0 (%)	8,35
Ligação	Delta/ Delta	R0 (%)	0,64
Z1 (%)	8,35	X0 (%)	8,325
Transformadores 2.1 e 2.8 (Base:1 MVA)			
Sn (MVA)	1	R1 (%)	1,727
VP (kV)	13,8	X1 (%)	1,519
VS (kV)	0,22	Z0 (%)	2,3
Ligação	Delta/ estrela	R0 (%)	1,727
Z1 (%)	2,3	X0 (%)	1,519
Transformadores 2.2 (BASE : 0,750 MVA)			
Sn (MVA)	0,750	R1 (%)	1,408
VP (kV)	13,8	X1 (%)	5,575
VS (kV)	0,22	Z0 (%)	5,75
Ligação	Delta/ estrela	R0 (%)	1,408
Z1 (%)	5,75	X0 (%)	5,575
Transformadores 2.3, 2.4, 2.6 (BASE : 3 MVA)			
Sn (MVA)	3	R1 (%)	0,537
VP (kV)	13,8	X1 (%)	5,575
VS (kV)	0,44	Z0 (%)	5,75
Ligação	Delta/ estrela	R0 (%)	0,537
Z1 (%)	5,75	X0 (%)	5,575
Transformadores 2.5, 2.7 (BASE : 2 MVA)			
Sn (MVA)	2	R1 (%)	0,802
VP (kV)	13,8	X1 (%)	5,694
VS (kV)	0,22	Z0 (%)	5,75
Ligação	Delta/ estrela	R0 (%)	0,802
Z1 (%)	5,75	X0 (%)	5,694

Tabela 3- Dados dos transformadores
Fonte: Autor

4.3 Cabos

Os Cabos que interligam o barramento de 13,8 KV aos transformadores que reduzem a tensão para 0,44 KV e 0,22 KV são de cobre com isolamento de XLPE.

As características e o ponto de ligação dos condutores usados na simulação no ETAP estão apresentadas na tabela 4.

Destino	Vn (KV)	L (Km)	Bitola (mm ²)	C/f	R1 (ohm/km)	X1 (ohm/km)	R0 (ohm/km)	X0 (ohm/km)
T 2.1	15	0,7	50	3	0,494	0,137	0,78546	0,34798
T 2.2	15	0,7	25	3	0,927	0,151	1,47393	0,38354
T 2.3	15	0,5	35	3	0,668	0,143	1,06212	0,36322
T 2.4	15	0,5	35	3	0,668	0,143	1,06212	0,36322
T 2.5	15	0,3	25	3	0,927	0,151	1,47393	0,38354
T 2.6	15	0,5	35	3	0,668	0,143	1,06212	0,36322
T 2.7	15	0,3	25	3	0,927	0,151	1,47393	0,38354
T 2.8	15	0,5	25	3	0,927	0,151	1,47393	0,38354

*Origem de todos os cabos é no barramento de 13,8 KV.

Tabela 4- Dados dos cabos do subsistema de 13.8 KV

Fonte: Autor

4.4 Disjuntores

Nesse estudo de caso, será analisada a superação dos disjuntores pela corrente de interrupção e pela corrente de pico. A constatação da superação de tensão de restabelecimento transitório será feita através da energia térmica dissipada pelo arco elétrico gerado no instante da abertura dos contatos do disjuntor. Quanto maior a corrente de curto-circuito que o disjuntor interrompe, menos suportabilidade a tensão de restabelecimento transitório o equipamento tem, fazendo com que o nível de energia térmica que o disjuntor suporta seja superado. Os disjuntores analisados nesse estudo de caso são do modelo pequeno volume de óleo, onde os seus parâmetros são apresentados na tabela 5.

Dispositivo	In (KA)	Ib (KA)	Ip (KA)	Vn (KV)
D 1.1	12,5	50	120	36
D 1.2	12,5	50	120	36
D 1.3	2,5	31,5	40	7,2
D 2.1	12,5	12,5	22	15
D 2.2	12,5	12,5	22	15
D 2.3	12,5	12,5	22	15
D 2.4	12,5	12,5	22	15
D 2.5	12,5	12,5	22	15
D 2.6	12,5	12,5	22	15
D 2.7	12,5	12,5	22	15
D 2.8	12,5	12,5	22	15

Tabela 5- Especificação dos disjuntores

Fonte: Autor

4.5 Estudo de curto-circuito monofásico

O estudo de curto-circuito monofásico é utilizado na parametrização das proteções de neutro, sendo que uma das medidas adotadas para redução da intensidade da corrente de curto-circuito monofásica é a configuração de ligação dos equipamentos do sistema. Geralmente os sistemas de média tensão possuem os transformadores conectados na configuração de estrela aterrada, onde é conectado ao neutro do transformador uma impedância que causa uma alteração no circuito de sequência zero e limita a corrente de curto-circuito monofásica a um valor pré definido. Esse método não tem nenhuma eficácia para redução dos valores de curto-circuito trifásico.

Os transformadores que realizam a redução da tensão de 34,5 KV para 13,8 KV nesse estudo de caso estão conectados com uma ligação delta no primário e uma ligação delta no secundário. Essa ligação resulta em uma impedância máxima para corrente de curto-circuito monofásica.

Em instalações onde a corrente de curto-circuito monofásica atinge valores superiores a corrente de curto-circuito trifásica, pode ser feita a mudança da rede de sequência zero. Essa mudança evita que o disjuntor seja superado primeiro pela corrente de curto-circuito monofásica.

Se no caso alguma carga que necessite de neutro fosse ligada ao barramento de 13,8 KV, por exemplo, esses transformadores teriam que ser conectados na configuração primário em delta e secundário em estrela. Para essa situação proposta no exemplo, foi feita uma simulação no software ATPDRAW onde o secundário do transformador não se encontra aterrado, sendo assim a corrente de curto-circuito monofásica apresentou um valor de 4,2 KA como mostra a figura 30.

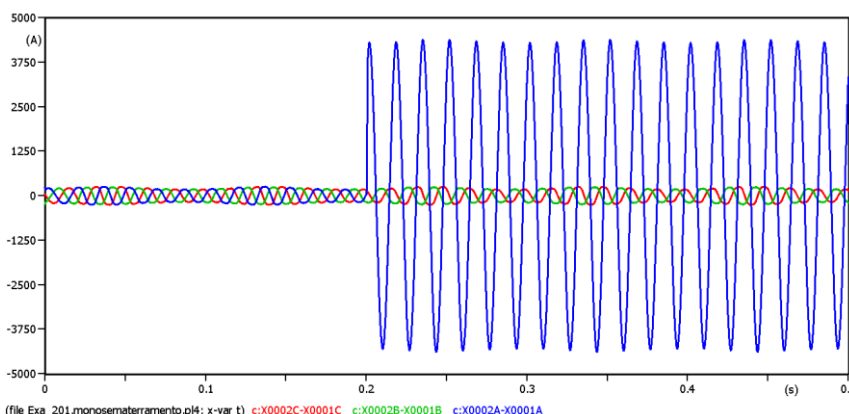


Figura 30- Corrente de curto-circuito monofásica com transformador sem o neutro aterrado.
Fonte: Autor

A figura 31 mostra a tensão das três fases do circuito no momento em que ocorre a falta monofásica, para o caso em que o transformador não se encontra com neutro aterrado.

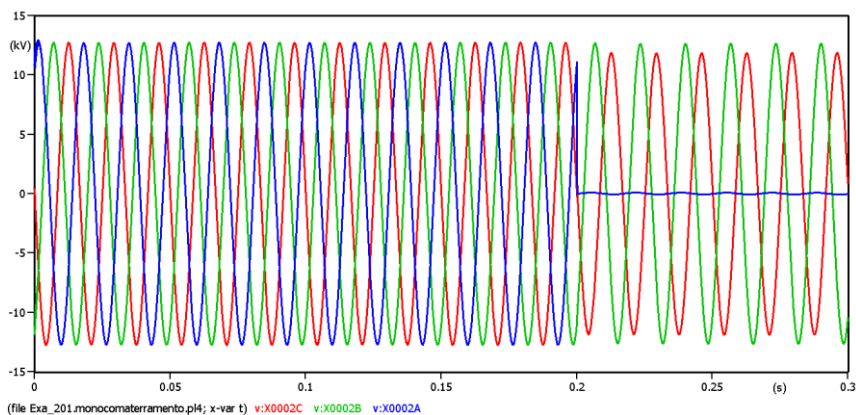


Figura 31- Tensão de curto-circuito monofásico com transformador sem o neutro aterrado.
Fonte: Autor

Para reduzir a intensidade da corrente de curto-circuito monofásica apresentada na figura 30, o secundário do transformador foi conectado na configuração estrela com neutro aterrado, sendo conectado ao neutro um resistor de 30 ohms. Como pode ser visto na figura 32, no caso de ocorrer uma falta monofásica a corrente de curto-circuito monofásica será limitada em 700 A.

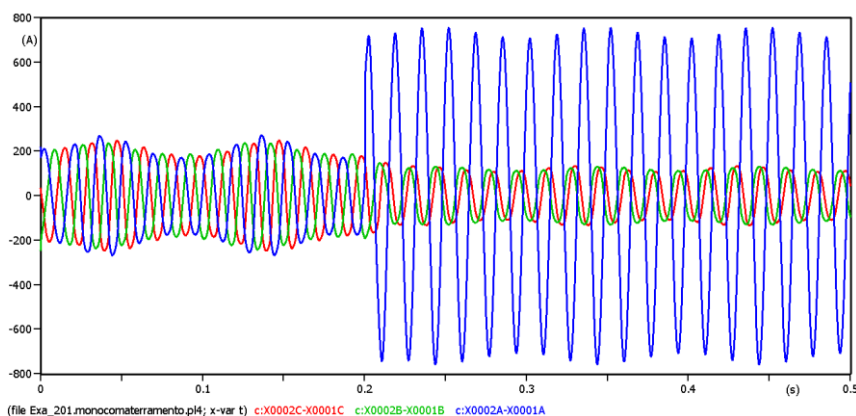


Figura 32- Corrente de curto-circuito monofásico com transformador com o neutro aterrado.
Fonte: Autor

A conexão dos transformadores com secundário em estrela aterrado, foi eficaz para diminuição da intensidade da corrente de curto-circuito monofásica. Mas essa configuração faz com que o nível tensão das duas fases que não participam do curto-circuito se eleve como é apresentado na figura 33.

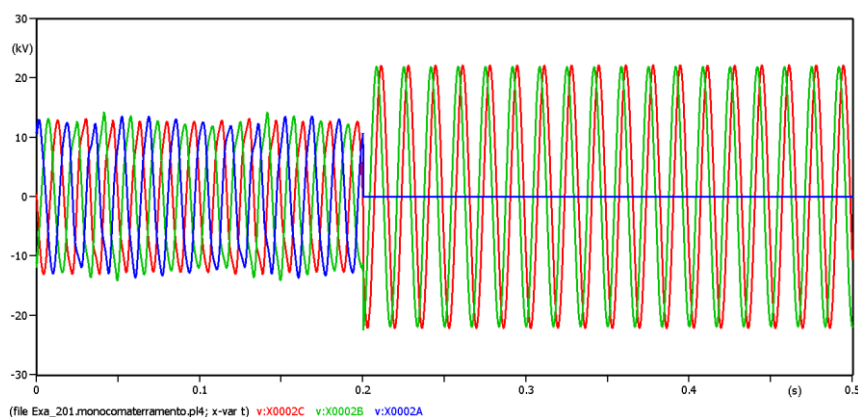


Figura 33- Tensão de curto-circuito monofásico com transformador com o neutro aterrado.
Fonte: Autor

4.6 Estudo de curto-circuito e análise de superação de disjuntores

Para a análise de superação de equipamentos é utilizado o estudo de curto-circuito trifásico, pois em muitas instalações esse se trata do pior caso. Foram analisados dois cenários através da simulação no software ETAP para o desenvolvimento do estudo de curto-circuito trifásico e análise de disjuntores superados. A tabela 6 apresenta os resultados obtidos para o nível de curto-circuito trifásico presente em cada barra do circuito nas seguintes condições de funcionamento: alimentador e gerador conectados ao circuito e alimentador sem a presença do gerador.

Nível de curto-circuito trifásico		
Condição	Nível de curto-circuito presente na barra de 34,5 (KV)	Nível de curto-circuito presente na barra de 13,8 (KV)
Alimentador com gerador desconectado do circuito	34,138 KA	13,648 KA
Alimentador e gerador conectado ao circuito	34,689 KA	15,411 KA

Tabela 6- Nível de curto-circuito trifásico
Fonte: Autor

Como foi mostrado na Tabela 6 tabela dos níveis de curto-circuito trifásico, o elemento do circuito que contribui para o aumento do nível de curto-circuito é o gerador distribuído. Se houver o desligamento do gerador na hora que uma falta for constatada, a contribuição do gerador durante a falta passa ser nula, fazendo com

que o nível de curto-circuito diminua, já que a falta está recebendo apenas a contribuição do alimentador.

Devido à proximidade do gerador da subestação em que está conectado, em caso de uma falta a variação dos valores da corrente de curto-circuito no barramento da subestação atingirão valores máximos. Essa variação diminui conforme a distância da fonte e do gerador aumenta. O tamanho do gerador também é algo que influencia muito no aumento das correntes de curto-circuito.

Comparando as simulações do curto-circuito trifásico, é possível verificar que o pior caso que se pode ter no circuito, é de uma falta trifásica onde o alimentador e gerador estão conectados ao barramento.

4.7 Superação de equipamentos

4.7.1 Sistema conectado apenas pelo alimentador sem a presença de geração distribuída.

Na análise do caso 1, o gerador não será conectado ao circuito sendo toda demanda do circuito suprida pelo alimentador da concessionária como pode ser visto na figura 34. Como foi mostrado na tabela 6 o nível de curto-circuito no barramento de 13.8 KV para essa configuração do sistema é de 13,648 KA.

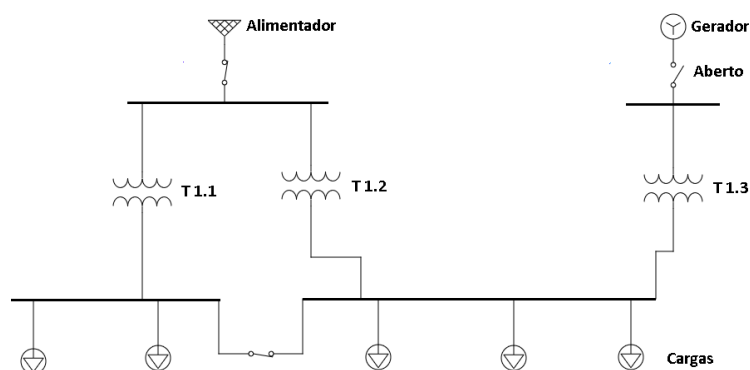


Figura 34- Sistema conectado ao alimentador e gerador desconectado (Circuito simplificado)
Fonte: Autor

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos no cálculo de curto-circuito para verificar a superação dos disjuntores. A corrente I_p é a corrente de pico máxima e a corrente de I_b é a corrente de interrupção do disjuntor. As células com coloração vermelha na tabela mostram que o disjuntor está superado para aquele cenário

simulado, e as células em azul mostram que o disjuntor está próximo de atingir a superação.

Análise de superação de disjuntores com gerador desconectado					
Dispositivo	Valor do catálogo		Valor calculado no ETAP		
	I _b (KA)	I _p (KA)	I _b (KA)	I _p (KA)	Energia térmica (kJ)
D 1.1	40	100	34,10952	81,48461	3522,104
D 1.2	40	100	34,10952	81,48461	3522,104
D 1.3 (Gerador)	31,5	40	-----	-----	-----
D 2.1	12,5	22	10,61337	18,67087	296,7118
D 2.2	12,5	22	8,811204	13,79173	211,3106
D 2.3	12,5	22	10,94095	19,64237	319,1821
D 2.4	12,5	22	10,9102	19,5338	318,0916
D 2.5	12,5	22	11,48754	21,13151	352,1329
D 2.6	12,5	22	10,85672	19,19637	314,4647
D 2.7	12,5	22	11,59562	21,05254	351,3504
D 2.8	12,5	22	10,14981	16,68566	273,4738

Tabela 7- Análise de superação de disjuntores com gerador desconectado e tie fechado
Fonte: Autor

Nesse caso em que o alimentador está sem a presença do gerador no circuito, nenhum disjuntor do circuito se encontra superado por corrente. Mas esse cenário apresenta os disjuntores 2.5 e 2.7 próximos da superação pela corrente de pico. Na análise da energia térmica que é dissipada pelo arco elétrico durante a abertura dos contatos do disjuntor os disjuntores 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 se mostram superados, sendo que os disjuntores 2.5 e 2.7 que já se encontravam próximos de atingir a superação pela corrente de pico, e são esses os disjuntores que apresentaram os valores mais elevados de energia térmica dissipada durante a abertura dos contatos do disjuntor.

Os disjuntores 1.1 e 1.2 apresentam um valor elevado de energia térmica, mas nenhum dos dois se encontra superado. Por serem disjuntores capazes de interromper uma corrente de até 50 kA e suportarem uma corrente de pico de 120 kA, e esses disjuntores estarem interrompendo uma corrente de apenas 68,4 % da corrente especificada pelo fabricante, faz com que a suportabilidade a tensão de restabelecimento transitório seja maior do que para casos onde o disjuntor está interrompendo correntes acima de 80% da corrente de curto circuito especificada pelo fabricante.

4.7.2 Sistema conectado ao alimentador e ao gerador

Como apresentado na tabela 6 do nível de curto-circuito o caso onde o alimentador e o gerador estão conectados ao circuito, esse se trata do caso mais crítico de operação. A conexão do gerador distribuído ao barramento de 13.8 KV eleva o nível de curto-circuito da barra de 13,648 KA para 15,411 KA. A figura 35 ilustra o alimentador e gerador conectados ao sistema.

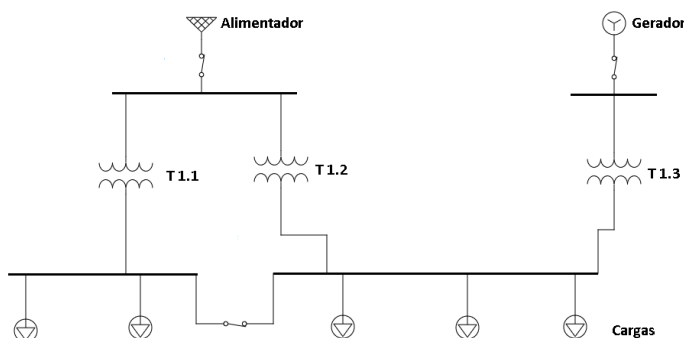


Figura 35- Sistema conectado ao alimentador e ao gerador (Circuito simplificado)
Fonte: Autor

Analisando a tabela 8 que apresenta os dados da simulação do sistema com o gerador conectado, foi constatado que ocorreu a superação dos disjuntores 2.5 e 2.7 pela corrente de interrupção, pela corrente de pico e que também houve a superação por energia térmica. Como houve um aumento da intensidade das correntes de pico e de interrupção quando se comparadas à intensidade das correntes onde o sistema se encontrava com a geração distribuída desconectada, a intensidade da energia térmica que é liberada no instante da abertura dos contatos do disjuntor também se elevou. Os disjuntores 2.1 e 2.8 não apresentaram superação por corrente, mas ao interromper as correntes que estão submetidos ambos apresentaram um nível de energia térmica elevada. Antes da conexão do gerador distribuído os disjuntores 2.3 e 2.4 já tinham atingido o nível de superação por energia térmica, mas a conexão do gerador distribuído fez com que os disjuntores quase atingissem a superação por corrente. Como foi apresentado no capítulo 3, uma maneira de reduzir a energia térmica dissipada durante a abertura dos contatos do disjuntor é realizar redução da corrente de curto-circuito que o equipamento tem que interromper. Sendo assim, para que não seja preciso realizar a substituição dos disjuntores para um modelo que suporte o valor de curto-circuito

presente na barra, será necessário realizar medidas que reduzam a corrente de curto-circuito da barra para valores que os equipamentos suportem.

Análise de superação de disjuntores no circuito com gerador conectado					
Dispositivo	Valor do catálogo		Valor calculado no ETAP		
	I _b (KA)	I _p (KA)	I _b (KA)	I _p (KA)	Energia térmica (kJ)
D 1.1	40	100	34,59315	82,83225	3624,497
D 1.2	40	100	34,59315	82,83225	3624,497
D 1.3 (Gerador)	31,5	40	13,98709	38,87733	702,8679
D 2.1	12,5	22	11,56304	19,97515	359,2355
D 2.2	12,5	22	9,389866	14,48583	269,8875
D 2.3	12,5	22	11,94482	21,05191	388,8135
D 2.4	12,5	22	11,91138	20,93781	387,4766
D 2.5	12,5	22	12,61878	22,80946	435,348
D 2.6	12,5	22	11,85302	20,58305	383,0348
D 2.7	12,5	22	12,74788	22,72567	434,3686
D 2.8	12,5	22	10,96996	17,71303	325,3521

Tabela 8- Análise de superação de disjuntores com gerador conectado
Fonte: Auto

Como foi visto, está ocorrendo uma superação dos equipamentos devido a elevação do nível de curto-circuito. A solução mais simples é a troca dos equipamentos por outro de maior capacidade de interrupção. Como o número de equipamentos a serem substituídos é elevado, e podendo até mesmo ser de difícil implementação por limitações operativas, essa medida acaba apresentando um custo alto para ser realizada. Dessa forma é necessário aplicar medidas que possuam um custo menor, para reduzir o nível de curto-circuito a valores que os equipamentos suportem.

Como para esse caso ocorreu a superação de um número considerável de equipamentos, e que os disjuntores 2.5 e 2.7 estão superados tanto por corrente quanto por energia térmica, uma medida que não envolve custo e que faz com que os dois disjuntores apresentem níveis menores de corrente de interrupção e de corrente de pico é o seccionamento da barra de 13.8 KV. Essa medida faz com que os disjuntores só sejam submetidos a corrente de interrupção e de pico provenientes de apenas um ramo do alimentador.

4.7.3 Seccionamento do barramento de 13,8 KV

No caso onde o gerador e o alimentador se encontram conectados ao circuito e até mesmo somente quando o alimentador está suprindo a demanda do circuito,

muitos disjuntores apresentaram superação. Como forma de reduzir o número de equipamentos superados será realizado nessa análise o seccionamento da barra de 13.8 KV, como pode ser visto na figura 36.

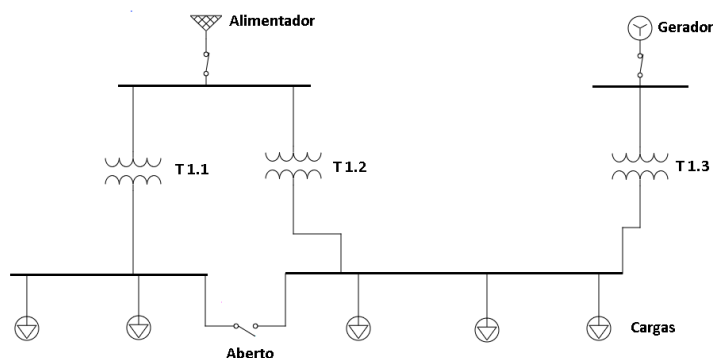


Figura 36- Seccionamento do barramento de 13.8 kV.
Fonte: Autor

A tabela 9 mostra o nível de curto circuito presente no barramento de 13,8 KV, com o barramento seccionado.

Nível de curto-circuito trifásico com barramento de 13.8 kV seccionado		
Condição	Nível de curto-circuito presente na barra de 13,8 (KV)	Nível de curto-circuito presente na barra de 13,8 (KV) (Lado do gerador).
Alimentador e gerador conectado ao circuito	7,427 KA	8,898 KA

Tabela 9- Nível de curto-circuito trifásico com barramento de 13.8 kV seccionado.
Fonte: Autor

A tabela 10 mostra que o seccionamento do barramento de 13,8 kV é uma medida eficiente, e que reduziu a corrente de interrupção dos disjuntores 2.3 e 2.4 que antes recebiam a contribuição dos dois ramos provenientes do alimentador. Agora com o seccionamento da barra, o lado sem a geração distribuída está recebendo a contribuição de apenas um ramo. O seccionamento também evitou a superação por corrente dos disjuntores 2.5 e 2.7, que antes se apresentavam superados, no cenário em que o alimentador e o gerador se encontravam conectados no circuito. A redução do nível de curto-circuito no barramento de 13.8 KV fez com que a intensidade das correntes de pico e de interrupção diminuísse, consequentemente a suportabilidade a tensão de restabelecimento transitório dos disjuntores se elevou, reduzindo o nível de energia térmica dissipada no instante da abertura dos contatos do disjuntor.

Análise de superação de disjuntores no circuito com gerador conectado e com barramento de 13,8 kV seccionado					
Dispositivo	Valor do catálogo		Valor calculado no ETAP		
	I _b (KA)	I _p (kA)	I _b (KA)	I _p (kA)	Energia térmica (kJ)
D 1.1	40	100	34,5639	82,73737	3617,935
D 1.2	40	100	34,5639	82,73737	3617,935
D 1.3 (Gerador)	31,5	40	11,92834	33,89237	341,1604
D 2.1	12,5	22	6,50857	12,76757	109,2963
D 2.2	12,5	22	5,907845	10,3134	93,22481
D 2.3	12,5	22	6,593231	13,32115	114,7447
D 2.4	12,5	22	6,575261	13,24191	114,3614
D 2.5	12,5	22	7,935898	16,27646	177,7256
D 2.6	12,5	22	7,668218	15,08429	164,9144
D 2.7	12,5	22	8,037914	16,21316	177,3296
D 2.8	12,5	22	7,447509	13,52655	152,4445

Tabela 10- Análise de superação de disjuntores no circuito com gerador conectado e com barramento de 13,8 KV seccionado

Fonte: Autor

4.7.4 Inserção do reator de núcleo de ar no circuito

Outra medida que pode ser adotada para redução da intensidade da corrente de curto-circuito desse estudo de caso, será o uso de reatores com núcleo de ar. Os reatores serão conectados em série com o alimentador e com o gerador, como pode ser visto na figura 37. Dessa forma ocorrerá uma limitação da contribuição do alimentador tanto quanto do gerador para o sistema em caso de falta.

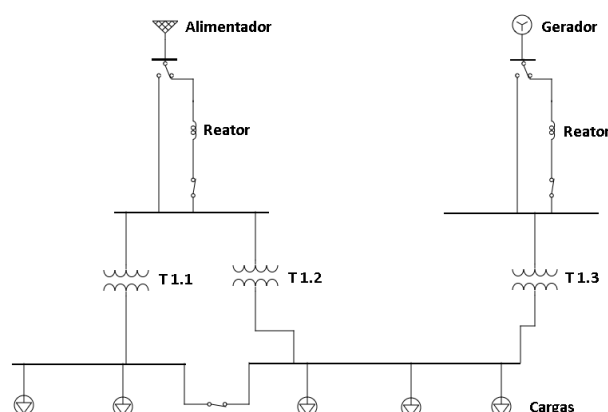


Figura 37- Inserção do reator de núcleo de ar no circuito

Fonte: Autor

Os parâmetros dos reatores que serão adicionados em série com o alimentador e com o gerador são apresentados na tabela 11.

Condição	In(A)	Vn (KV)	Z (Ohms) Seq. Positiva	Z (Ohms) Seq. positiva
Reator conectado ao alimentador.	400	34,5	6	3
Reator conectado ao gerador.	1000	6	3	2

Tabela 11- Dados dos Reatores limitadores
Fonte: Autor

Como pode ser visto na tabela 12 a corrente de curto-circuito apresentou uma redução de valor significativa depois da inclusão dos reatores no circuito.

Nível de curto-circuito trifásico com reator no sistema		
Condição	Nível de curto-circuito presente na barra de 34,5 (KV)	Nível de curto-circuito presente na barra de 13,8 (KV)
Alimentador e gerador conectado ao circuito	4,222 KA	7,545 KA

Tabela 12- Nível de curto-circuito com reator no sistema
Fonte: Autor

Os reatores que foram conectados ao circuito fizeram com que a impedância do circuito aumentasse, resultando em uma diminuição da contribuição do alimentador tanto quanto do gerador na corrente de curto-circuito. Os valores das correntes de interrupção e das correntes de pico apresentadas na tabela 13, mostram que o disjuntor 2.5 que antes se encontrava superado por corrente, agora se encontra submetido a uma corrente de pico de apenas 53,7% da sua capacidade de corrente de interrupção e 64% da corrente de pico. Já o disjuntor 2.7 está submetido a uma corrente de apenas 54% sua da capacidade de interrupção e 63% da corrente de pico. Comparando a coluna de energia térmica da tabela 13 com a coluna de energia térmica da tabela 10, é possível constatar que a inserção do reator de núcleo de ar foi mais eficiente na redução da dissipação de energia térmica dos disjuntores do que o seccionamento do barramento, mas ambas as medidas foram eficazes na redução da corrente de curto-circuito. Dessa forma, com a inserção dos reatores no sistema todos os disjuntores suportam os valores de corrente de interrupção e de corrente de pico máxima do circuito, não sendo necessária a sua substituição.

A análise de superação dos disjuntores com reator conectado ao gerador circuito se encontra na tabela 13.

Análise de superação de disjuntores com gerador e reatores conectados ao circuito com tie fechado					
Dispositivo	Valor do catálogo		Valor calculado no ETAP		
	I _b (KA)	I _p (KA)	I _b (KA)	I _p (KA)	Energia térmica (kJ)
D 1.1	40	100	4,19667	10,60307	44,59846
D 1.2	40	100	4,19667	10,60307	44,59846
D 1.3 (Gerador)	31,5	40	8,291559	21,02393	182,0576
D 2.1	12,5	22	6,541147	12,91312	101,199
D 2.2	12,5	22	5,897888	10,4046	87,12722
D 2.3	12,5	22	6,57317	13,47641	106,0248
D 2.4	12,5	22	6,555385	13,39616	105,688
D 2.5	12,5	22	6,718222	14,05908	110,8493
D 2.6	12,5	22	6,527282	13,14706	104,5627
D 2.7	12,5	22	6,871782	14,00292	110,6243
D 2.8	12,5	22	6,439095	11,96117	98,75567

Tabela 13- Análise de superação de disjuntores com gerador e reatores conectados ao circuito com tie fechado.
Fonte: Autor

Além da perda de energia constante que o reator provoca quando se encontra inserido no sistema, os reatores também prejudicam a partida de motores. Nesse estudo de caso a presença do reator no circuito não é prejudicial à partida dos motores que se encontram no circuito, já que as cargas rotativas fazem uso de inversores de frequência. Dessa forma, quando o sistema estiver com tie aberto o reator pode ser desconectado do circuito, devido não haver a superação dos disjuntores quando a demanda das cargas está sendo suprida pelo alimentador e pelo gerador com o tie aberto.

4.8 Análise de energia incidente

Como foi constatada a superação dos disjuntores presente no circuito antes da inserção dos reatores, também foi analisado o nível de energia incidente presente nos barramentos quando o gerador está conectado ao circuito. A tabela 14 apresenta os valores de energia incidente nos barramentos antes e depois dos reatores terem sido conectados ao sistema.

Condição	Nível de energia incidente no barramento de 13,8 KV em (cal/cm ²)
Alimentador com gerador desconectado do circuito.	4
Alimentador e gerador conectados ao circuito.	31.17
Alimentador e gerador conectados ao circuito (barramento seccionando, lado oposto ao gerador).	2,09
Alimentador e gerador conectados ao circuito (barramento seccionando, lado do gerador).	17,37
Alimentador e gerador conectados ao circuito (com reator no sistema).	14,9

Tabela 14- Nível de energia incidente no barramento de 13.8 KV
Fonte: Autor

De acordo com a tabela 14 o barramento o de 13.8 kV apresenta níveis altos de energia incidente quando o gerador se encontra conectado ao circuito, tornando perigoso realizar operações no sistema. Para reduzir o nível de energia incidente é preciso reduzir o nível de curto-circuito da instalação, pois a corrente de curto-circuito tem relação direta com o nível de energia incidente do barramento.

A redução da corrente de curto-circuito fez com que o nível de energia incidente também diminuísse, proporcionando maior segurança na realização das operações. Portanto, o seccionamento do barramento, tanto quanto, a conexão de reatores em série com as fontes alimentadoras proporcionou a redução da corrente de curto-circuito, e conseqüentemente também reduziu o nível de energia incidente do barramento.

5 Conclusão

O crescimento do sistema elétrico brasileiro e os impactos que esse crescimento gera, sempre foram preocupantes para as concessionárias de energia, já que a elevação do nível de curto-circuito acarreta a superação da capacidade dos equipamentos instalados na rede.

Através das simulações foi possível compreender a contribuição do gerador na corrente de curto-circuito e na energia incidente no barramento, assim foram identificados alguns disjuntores que se apresentavam superados quando a demanda do circuito estava sendo suprida apenas pelo alimentador, e quando estava sendo suprida pelo alimentador e pelo gerador ao mesmo tempo. Para minimizar os efeitos da inserção do gerador a rede, foi adotado o seccionamento do barramento de 13,8 kV e o uso de reatores limitadores de corrente que nesse trabalho se mostraram como elementos eficazes na redução da corrente de curto-circuito e consequentemente reduzindo o nível de energia incidente. O uso dos reatores limitadores de energia também acaba tendo um custo inferior à troca de equipamentos, já que seria necessária a troca de um grande número de equipamentos. Mesmo dissipando energia o reator se mostrou a melhor solução para esse estudo de caso, já que os reatores são inseridos ao sistema com o barramento de 13.8 kV com a chave fechada, proporcionando uma confiabilidade maior ao sistema do que o cenário 3 que o sistema opera com o barramento de 13.8 Kv seccionando.

O curto-circuito monofásico é a falta que mais acontece nos sistemas de distribuição. Mas comparando a sua intensidade de corrente com a corrente do curto-circuito trifásico, as correntes de falta monofásica tem valores limitados quando os transformadores do setor em que ocorre a falta estão conectados em estrela com neutro conectado a uma impedância.

Os riscos associados às correntes de falta devem ser mitigados de forma a proteger não só a instalação e também as pessoas, com isso reduzindo os acidentes e mortes relacionados as correntes de curto-circuito. A correta especificação do EPI também é muito importante para as energias que superem 1,2 cal/cm².

6 Referências bibliográficas

- [1] FILHO, João Mamede. Instalações Elétricas industriais. 16.ed. LTC,2016.
- [2] FUJIO, Sato. FREITAS, Walmir. Análise de curto-circuito e princípios de proteção. 1.ed. Elsevier,2015.
- [3] GLOVER, J. SARMA, M., OVERBYE, T. Power System Analysis & Design, SI Version. Cengage Learning, 2012.
- [4] DIAS, Thiago Carvalho. APLICAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO PIROTÉCNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS. 2016. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajuba, 2016.
- [5] SALGADO, Danilo Augusto. UMA ABORDAGEM PARAMÉTRICA DO IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOBRE AS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E NA PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- [6] ANEEL. Resolução Normativa nº 482 de 17 de Abril, 2012.
- [7] MONTICELLI, A.J. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. "Editora Edgard Blucher Ltda", 1983.
- [8] GRAINGER, J. J., WILLIAM D. STENVENSON, J. Power System Analysis. McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [9] COSTA, Luiz Felipe de Oliveira. O USO DE CONJUNTOS DE MANOBRA E CONTROLE DE POTÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajuba, 2014.

[10] Chesf. Especificações técnicas de vestimentas resistentes a Arco, 2016.

[11] ONS. Procedimento de Rede - Módulo – Sub. módulo 4.3. Metodologia para Elaboração das Propostas de Ampliações e Reforços. , 2016.

[12] DE OLIVEIRA FRONTIN, S. Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Goya Editora LTDA., 2013.

[13] FRONTIN, Sergio O. (org.). EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Goya, 2013. 940 p.

[14] TRINDADE, Pedro Guimarães. Medidas para redução de níveis de curto-circuito: Estudo de caso área Rio. 2019. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Unversidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

[15] CARVALHO, Antônio Carlos (org). DISJUNTORES E CHAVES: aplicação em sistemas de potência. Niterói: UFF, 1995. 352p.

[16] SIT. Manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico, 2014.