

Um enfoque inovador: Metodologias ágeis para o dimensionamento de disjuntores de potência

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.004-005>

Paulo Roberto Duailibe Monteiro

PhD

Doutor em Engenharia Civil

Fluminense Federal University (UFF), Niteroi, RJ, Brazil

E-mail: pauloduailibe@id.uff.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7376-9115>

E-mail: thiagotrezza@id.uff.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4656-5667>

André Fernando Schiochet

MSc

Mestre em Engenharia Elétrica

Brazilian Petroleum Company (Petrobras), Rio de Janeiro, Brazil;

E-mail: eel.afs@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2062-1984>

Thiago Trezza Borges

PhD

Doutor em Engenharia Elétrica

Fluminense Federal University (UFF), Niteroi, RJ, Brazil

RESUMO

Em meio à crescente complexidade dos sistemas elétricos, a necessidade de métodos mais eficazes e acessíveis torna-se evidente, buscando equilibrar precisão técnica, praticidade operacional e segurança. Este artigo propõe um método inovador e simplificado para o dimensionamento de disjuntores de potência, visando otimizar a eficiência do processo de seleção desses equipamentos cruciais para a infraestrutura elétrica. A metodologia de dimensionamento visando a especificação das características principais dos disjuntores de potência oferece uma abordagem sistemática e abrangente, integrando considerações críticas garantindo o correto funcionamento desses equipamentos em diversos contextos elétricos. O processo é constituído de várias etapas, abordando desde a análise inicial até a seleção final do disjuntor adequado. O método das potências modificado é aplicado para a definição das características de curto-circuito e são introduzidos nos critérios de dimensionamento baseados na operação do sistema elétrico para a análise em regime normal de funcionamento do sistema. Um sistema teste de uma estação elevatória composto por uma subestação de 69 kV é estudado. A metodologia proposta atendeu aos seus objetivos apresentando precisão e eficácia podendo ser uma ferramenta bastante útil aos engenheiros de projetos na área da eletricidade.

Palavras-chave: Curto-circuito, Fluxo de potência, Disjuntores de potência, Dimensionamento de disjuntores, Especificação de disjuntores.

1 INTRODUÇÃO

No cenário da engenharia elétrica, os disjuntores de potência desempenham um papel crucial na manobra, proteção e controle de sistemas de energia elétrica (SEE). Em particular, os disjuntores de alta tensão representam uma peça fundamental na infraestrutura elétrica global, garantindo a confiabilidade e a segurança do fornecimento de energia em diversas aplicações industriais e comerciais.

Nos sistemas elétricos, os disjuntores são requeridos para desempenhar a função básica de controlar a potência elétrica transmitida pelos mesmos, seja conduzindo a corrente de carga dos circuitos, seja através da manobra de fechamento de circuitos ou ainda a retirada de serviços de circuitos sob comando nominal ou automático. Os disjuntores atuam normalmente na posição fechada, conduzindo a corrente de carga, ou na posição aberta na qual atuam exercendo isolamento. Somente em situações ocasionais os disjuntores são acionados para mudar de posição, isto é, passar de aberto para fechado ou de fechado para aberto e apenas em raras ocasiões são acionados para interromper as correntes de curto-circuito [1].

Estes equipamentos são projetados para interromper correntes de curto-circuito em curtíssimos intervalos de tempo, representando uma das tarefas mais desafiadoras confiadas aos equipamentos presentes em sistemas de potência. Devem também ser capazes de estabelecer correntes de falta, de estabelecer e interromper correntes de magnitudes muito menores e de isolar partes dos sistemas quando na posição aberta. A execução destas tarefas, de maneira absolutamente confiável, é imperativa para prevenir danos a outros componentes do sistema elétrico, posicionando os disjuntores entre os equipamentos de maior complexidade instalados nas subestações [2].

Os desafios associados aos disjuntores são multifacetados, desde a capacidade de interromper correntes de curto-circuito em intervalos mínimos até a necessidade de operar sob condições ambientais adversas por períodos prolongados [3]. A complexidade dessas demandas coloca os disjuntores entre os equipamentos mais intrincados e críticos nas subestações do sistema elétrico de potência (SEP).

Assim, a exigência imposta aos disjuntores de potência é a de uma confiabilidade total, sendo esta confiabilidade resultado de um projeto racional e de um controle de qualidade rigoroso. Este processo abrange desde a seleção criteriosa de matérias-primas até a etapa final dos ensaios, englobando a revisão de entrada, ensaios de materiais, controle minucioso dos processos de fabricação, testes em subconjuntos e, por fim, os ensaios finais. O comprometimento com cada fase desse ciclo de desenvolvimento é vital para assegurar não apenas a conformidade com as especificações técnicas, mas também a durabilidade e eficiência operacional necessárias em ambientes desafiadores. Essa abordagem integrada e abrangente reflete a busca incessante por excelência na engenharia de disjuntores de potência, fundamentada em práticas sólidas e intransigência na busca pela qualidade.

Neste contexto, a atuação precisa e eficiente dos disjuntores assume um papel estratégico na estabilidade e operação segura dos sistemas elétricos. Sua capacidade de transição entre estados, da condução à interrupção, reflete não apenas a complexidade de suas responsabilidades, mas também a necessidade de equilibrar de maneira sólida a confiabilidade operacional com a eficiência. Este cenário serve como pano de fundo para a importância crítica de avanços inovadores e no dimensionamento e aplicação desses dispositivos.

Este artigo propõe uma abordagem inovadora no dimensionamento de disjuntores de alta tensão, apresentando um método simplificado que visa otimizar o processo de seleção desses dispositivos. Compreender e aplicar procedimentos de dimensionamento é essencial para garantir que os disjuntores atendam aos requisitos específicos de cada sistema elétrico, equilibrando eficácia, custo e eficiência.

As áreas de conhecimento para formação do profissional de engenharia elétrica passam pelo estudo de equipamentos elétricos, dentre eles, os disjuntores. A necessidade de conhecer os equipamentos elétricos e experimentar seu funcionamento real é fundamental [4]. A simplificação do processo de dimensionamento não apenas agiliza a tomada de decisões, mas também promove uma compreensão mais acessível e rápida para profissionais da área. Este estudo visa contribuir significativamente para a eficiência operacional e o desenvolvimento contínuo de sistemas elétricos, ao oferecer uma metodologia inovadora para o dimensionamento de disjuntores de alta tensão.

Nas seções seguintes, exploram-se os fundamentos do dimensionamento de disjuntores, destacando a importância de considerar variáveis críticas, como a carga do sistema, características de curto-circuito e requisitos de coordenação. Em seguida, apresenta-se o método simplificado proposto, detalhando suas premissas, aplicabilidade e vantagens em comparação com abordagens tradicionais.

2 CARACTERÍSTICAS PARA ESPECIFICAÇÃO E DEFINIÇÕES

Os disjuntores de potência, são os principais equipamentos de segurança, bem como os mais eficientes equipamentos de manobra em uso nas redes elétricas. Possuem uma capacidade de fechamento e ruptura que deve atender a todos os pré-requisitos estabelecidos de manobra, sob todas as condições normais e anormais de operação [5]. A IEC 56-1 apud [3], define o disjuntor como “um dispositivo mecânico de manobra, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes nas condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir durante um tempo especificado e interromper correntes sob condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito”.

A principal função atribuída aos disjuntores consiste na interrupção de correntes de falta de maneira tão rápida quanto possível, visando minimizar os danos potenciais causados aos equipamentos por curtos-circuitos. Além de lidar com correntes de falta, é imperativo que o disjuntor seja capaz de

interromper correntes normais de carga, correntes de magnetização provenientes de transformadores e reatores, bem como correntes capacitivas associadas a bancos de capacitores e linhas em vazio [2].

Adicionalmente, o disjuntor deve possuir a capacidade de fechar circuitos elétricos não apenas durante condições normais de carga, mas também na presença de curtos-circuitos. As funções mais comuns desempenhadas pelos disjuntores incluem, em primeiro lugar, a condução de correntes de carga quando na posição fechada, seguida pela função de isolamento entre duas partes de um sistema elétrico [2].

Com relação a essa função, o disjuntor estando no estado aberto ou desligado, a distância de isolamento entre os contatos deve ser capaz de suportar não apenas a tensão de operação, mas também as sobretensões internas decorrentes de surtos de manobra ou descargas atmosféricas.

Enumeram-se a seguir as principais características aplicáveis a disjuntores, assim como as definições correspondentes, conforme [5].

- Tensão Nominal: É a tensão máxima de operação do sistema para o qual o disjuntor foi previsto;
- Corrente nominal: É o valor eficaz da corrente de regime contínuo que o disjuntor deve ser capaz de conduzir indefinidamente, sem que a elevação de temperatura de suas diferentes partes exceda os valores especificados;
- Frequência nominal: É a frequência do sistema para a qual o disjuntor irá operar;
- Capacidade de interrupção nominal em curto-circuito: É o valor mais elevado da corrente de curto-circuito que o disjuntor é capaz de interromper, nas condições de uso e ensaio estabelecidas na norma IEC 62271-100. É caracterizada pela declaração dos valores das componentes periódica e aperiódica da corrente para a qual o disjuntor deve ser testado [2];
- Valor da componente periódica (kA, eficaz): É um valor escolhido entre os vários definidos nas normas técnicas, maior do que o valor eficaz da maior corrente de curto-circuito monofásico ou trifásico calculada para a subestação onde o disjuntor será instalado;
- Valor da componente aperiódica: A componente CC da corrente de falta, no instante de separação dos contatos do disjuntor, é especificada em percentagem do valor inicial I_{CC0} , sendo $I_{CC0} = I_{CA(\text{pico})}$. O valor percentual expressará a relação $\%I_{CC0} / I_{CA(\text{pico})} \times 100$. O menor tempo possível de abertura para a definição dessa componente, considerará um tempo de atuação da proteção de 0,5 ciclo. Assim, o valor da componente CC varia, ao longo do tempo, segundo a exponencial (1):

$$I_{CC}(\%) = e^{\frac{-t}{\tau}} \times 100 \quad (1)$$

Sendo a constante de tempo τ conforme (2):

$$\tau = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{X}{R} \cdot 1000 \text{ (ms)} \quad (2)$$

- Capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito (kA, crista): É o maior valor instantâneo de corrente que o disjuntor é capaz de estabelecer, isto é, fechar e grudar (close and latch) quando operando com tensão nominal. Seu valor pode ser calculado por (3):

$$I_{fmax} = I_{CAef} \times f \quad (3)$$

Sendo f o fator de assimetria, definido conforme (4):

$$f = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

O valor de pico está vinculado ao valor rms da corrente nominal de interrupção de curto-circuito, frequência e constante de tempo (τ). Os valores especificados segundo [6] são:

- 2,5 x corrente suportável de curta duração nominal a 50 Hz a $\tau = 45$ ms
- 2,6 x corrente suportável nominal de curta duração a 60 Hz a $\tau = 45$ ms
- 2,7 x corrente suportável nominal de curta duração a 50/60 Hz a $\tau > 45$ ms (*)

(*) *Para todos os casos especiais de constante de tempo*

- Nível de Isolamento Nominal: Define os valores suportáveis das tensões e sobretensões para os quais o disjuntor foi projetado. Deve ser escolhido entre os valores indicados nas tabelas da referência [7].
- Sequencia Nominal de Operação:

As sequencias nominais de operações padronizadas pela ABNT são as seguintes:

- Para disjuntores previstos para religamento rápido:

O-0,3s-CO-15s-CO ou O-0,3s-CO-3min-CO

- Para disjuntores não previstos para religamento rápido:

CO-15s-CO ou O-3min-CO-3min-CO

- Tempo de Interrupção Nominal:



Corresponde ao maior tempo que o disjuntor pode levar para interromper uma corrente de qualquer valor. Esse tempo varia de 2 a 5 ciclos. De acordo com [5], recomenda-se adotar nas especificações dos disjuntores, os seguintes tempos de interrupção de acordo com a classe de tensão:

- Classe de tensão 362, 460, 550 e 800 kV: 2 ciclos;
- Classe de tensão 72,5, 145 e 245 kV: 3 ciclos;
- Classe de tensão 15 kV: 5 ciclos.
- Tipo de disjuntor

Uma orientação para seleção do tipo de disjuntores de acordo a classe de tensão apresentada em [5] é descrita a seguir:

- Classe de tensão: 5kV a 38 kV

Disjuntores a vácuo ou SF₆. Sendo o vácuo preferido embora haja uma relativa equivalência entre eles, são competitivos.

- Classe de tensão: 72.5kV a 245 kV

Disjuntores a SF₆

- Classe de tensão: ≥ 365 kV

Ar comprimido e SF₆. Sendo o SF₆ preferido na maioria dos casos.

3 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO

Saber dimensionar equipamentos é fundamental para todo engenheiro electricista, especialmente para os engenheiros de equipamentos, porém, para dimensioná-los pode não ser uma tarefa fácil. A metodologia de dimensionamento visando a especificação das características principais dos disjuntores de potência necessariamente deve oferecer uma abordagem sistemática e abrangente, integrando considerações críticas para garantir o correto funcionamento desses equipamentos em diversos contextos elétricos. O processo é constituído de várias etapas, abordando desde a análise inicial até a seleção final do disjuntor adequado. A Tabela 1 apresenta as principais fases da metodologia de seleção dos disjuntores.

Tabela 1 Fases metodológicas do processo de dimensionamento e seleção.

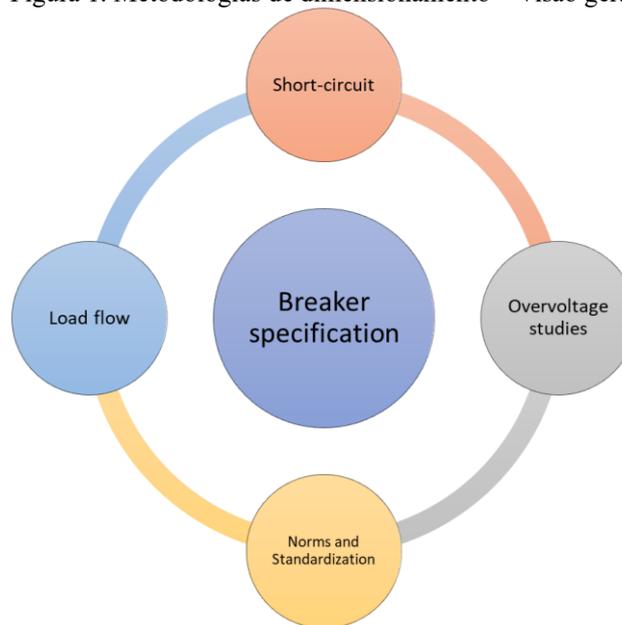
Fases do Processo	Objetivo
1-Análise do Sistema Elétrico	Avaliação da configuração e características do sistema elétrico, incluindo carga, curto-circuito, e requisitos de coordenação.
2- Identificação de Parâmetros	Levantamento e identificação de parâmetros críticos, como corrente nominal, corrente de curto-circuito, características de operação, e outros fatores específicos do sistema.
3- Análise de Fluxo de Potencia	Realização de análise para determinar a capacidade do disjuntor em lidar com as correntes de carga previstas, garantindo que a elevação de temperatura esteja dentro dos limites especificados
4- Análise de Curto-Circuito	Avaliação da capacidade do disjuntor de suportar e interromper correntes de curto-circuito, levando em consideração tempos de interrupção, níveis de curto-circuito, etc.
5- Seleção do Tipo de Disjuntor	Escolha adequada entre os tipos de disjuntores, considerando as características específicas do sistema e as condições ambientais
6- Documentação e Relatório	Elaboração de documentação detalhada, incluindo especificações técnicas, cálculos, e justificativas para a seleção final do disjuntor.

Dentro do processo metodológico apresentado, destacam-se como de fundamental importância os estudos elétricos. Basicamente os estudos necessários para a especificação das características elétricas dos disjuntores, são: estudo de fluxo de potência para a determinação da corrente nominal; estudo de curto circuito para determinação da suportabilidade ao curto-circuito e da capacidade de interrupção; estudo de sobretensões para determinação dos níveis de isolamento e TRT (Tensão de restabelecimento transitória) [8].

Para a realização desses estudos normalmente se utiliza de recursos computacionais. Os programas computacionais desempenham um papel fundamental fornecendo ferramentas poderosas para análise de sistemas elétricos complexos. Existem diversas plataformas amplamente reconhecidas para análise e simulação de sistemas de energia elétrica que incluem ferramentas avançadas e recursos robustos para cálculos de fluxo de potência e curto-circuito, bem como estudos de estabilidade e planejamento de rede.

Frente ao exposto, o desafio que se impõe é dimensionar e especificar disjuntores de potência sem recurso computacional. Assim, a metodologia proposta para o dimensionamento de disjuntores visa oferecer uma abordagem sistemática e abrangente, porém simplificada de aplicação direta e objetiva, considerando premissas que permitem atalhos na execução dos cálculos. A Figura 1 apresenta as linhas gerais das metodologias de dimensionamento.

Figura 1. Metodologias de dimensionamento – Visão geral



Os métodos convencionais para o cálculo de curto-circuito envolvem muitas formulas aumentando a complexidade e demandando muito tempo. Conforme demonstrado em [9], o método das potências se mostrou bastante simples e eficaz em termos de velocidade, precisão e economia para resolver problemas de curto-circuito em sistemas elétricos industriais. Assim, a metodologia proposta para o dimensionamento dos disjuntores se baseia no método das potências modificado para o cálculo de curto-circuito. As equações utilizadas no cálculo de curto-circuito são conforme [5] e estão apresentadas a seguir.

$$S_{cc_{conc}} = \sqrt{3} \cdot kV_{nominal} \cdot I_{cc_{conc}} \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

$$X_{th} = \frac{S_b}{S_{cc}} \quad (\text{pu}) \quad (7)$$

$$X_{pu} = X_{pu} \frac{S_b}{S_{Equip}} \quad (\text{pu}) \quad (8)$$

$$S_{k(3)} = \frac{S_b}{X_{pu}} \quad (\text{MVA}) \quad (9)$$

$$I_{k(3)} = \frac{S_{k(3)}}{\sqrt{3} V} \quad (\text{kA}) \quad (10)$$

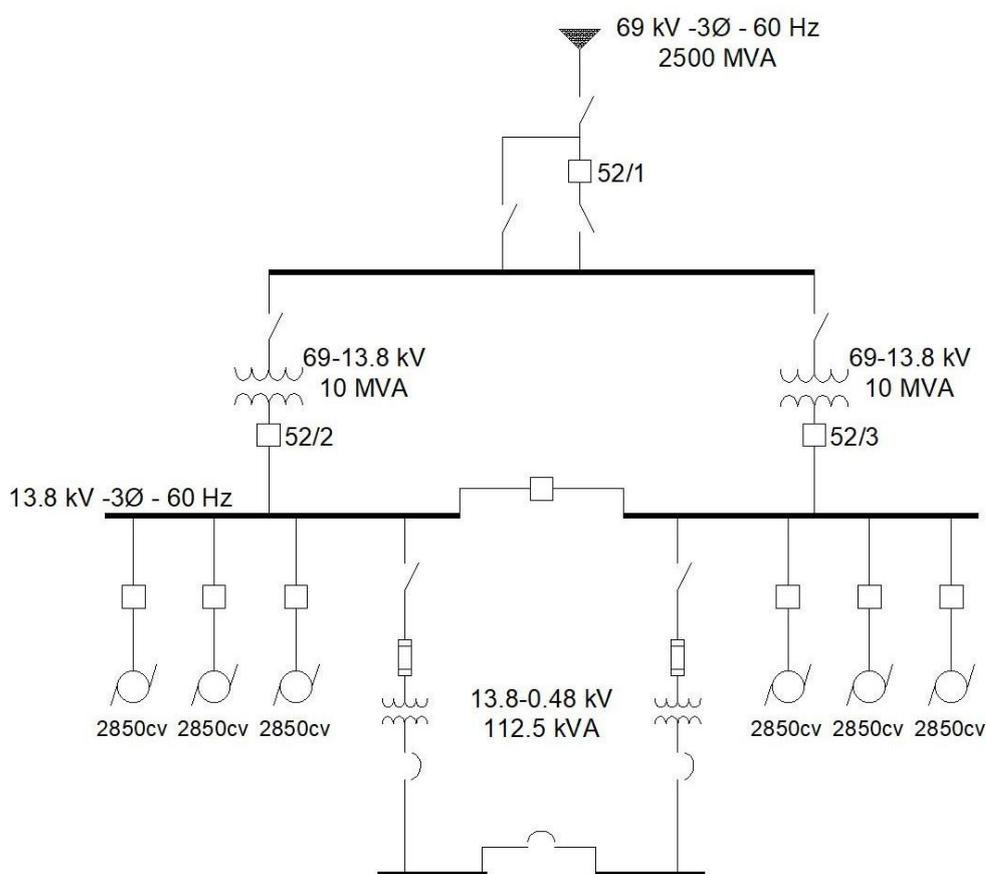
Com relação a definição da corrente nominal do disjuntor deve ser considerado que ela tem que ser superior a máxima corrente que circula no trecho onde o disjuntor vai ser instalado. Normalmente se obtém as correntes que circula nos trechos através do estudo do fluxo de potência com auxílio de computadores. Porém, a definição da máxima corrente que pode circular num determinado trecho do sistema elétrico para dimensionamento de equipamentos, deve obedecer a critérios de

dimensionamento baseados na operação do sistema, tais como contingenciamento, liberação fluxo da capacidade integral dos transformadores, no caso do ramal sob seu domínio entre outros.

4 TEST SYSTEM

O sistema elétrico de uma estação de bombeamento de água é composto por uma subestação (SE) de 69 kV com arranjo radial e secundário seletivo contendo dois transformadores de 10 MVA que abaixa a tensão para 13.8 kV para alimentar seis conjuntos motobombas de 1850 CV. No barramento de 13.8 kV estão conectados dois transformadores de 112.5 kVA destinados à alimentação dos serviços auxiliares da estação, conforme diagrama unifilar apresentado na Figura 2.

Figura 2. Diagrama unifilar simplificado



A potência de curto-circuito considerada na entrada da SE para o horizonte do projeto foi de 2500 MVA. Foi considerada uma impedância de 6% para os transformadores de força de 10 MVA (TF). Os motores (M) são de indução, trifásicos com rendimento de 95%, fator de potência de 85% e impedância subtransitória de 17%. A impedância dos transformadores de serviços auxiliares (TSA) foi considerada de 4.5%. O sistema não tem restrição operacional, podendo operar tanto em “L” como em “H”, ou seja, é permitido operar os transformadores em paralelo.

5 SHORT-CIRCUIT STUDY

Este t3pico apresenta o estudo que serve de base para a defini33o das correntes de curto-circuito que s3o utilizadas para a especifica33o dos disjuntores da SE. Inicialmente deve-se escolher a pot3ncia base e referir todas as imped3ncias consideradas no sistema estudado 3 base escolhida.

Com o intuito de simplifica33o com redu33o dos c3lculos, escolheu-se a pot3ncia do TF como base. Assim, aplicando-se a equa33o (7) obt3m-se a reat3ncia da fonte de suprimento (FS) da SE em pu na base escolhida. A reat3ncia do TF j3 est3 na base do sistema que 3 a pr3pria pot3ncia do transformador e n3o precisando efetuar a mudan3a de base. Com rela33o ao motor de indu33o (M) 3 necess3rio calcular a pot3ncia em kVA aplicando a equa33o (11)

$$S_M = \frac{CV \times 0.736}{\eta \times \cos \varphi} \quad (11)$$

Substituindo os valores tem-se:

$$S_M = \frac{2850 \times 0.736}{0.95 \times 0.85} = 2598 \text{ kVA} \quad (12)$$

Aplicando a pot3ncia do motor de indu33o em kVA e a sua imped3ncia de 0.17 pu na equa33o (8) obt3m-se a reat3ncia do motor na base adotada. A mesma equa33o (8) 3 utilizada para passar para a base nova a reat3ncia 0.045 pu do transformador de servi3os auxiliares. Assim, 3 apresentado na tabela 1 a reat3ncias calculadas.

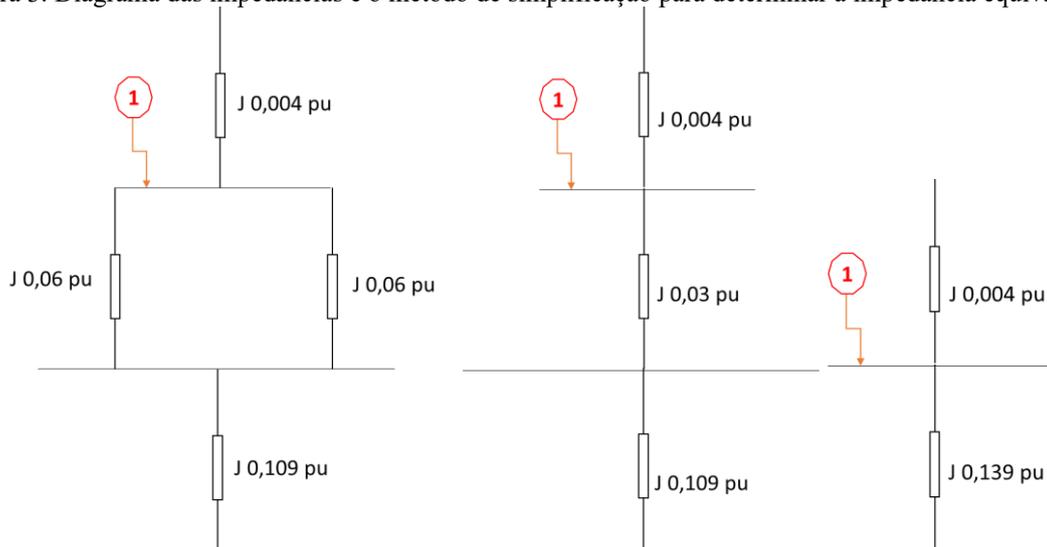
Tabela 1 Reat3ncias em pu na base de 10 MVA

FS X _C	TF (10MVA) X _{TF}	Motor X _d	X equivalente (6 M em paralelo) X _{d eq}	TSA X _{TSA}	X equival3ncia (2 TSA em paralelo) X _{TSAeq}
J 0.004 pu	J 0.06 pu	J 0.654 pu	J 0.109 pu	J 4 pu	J 2 pu

5.1 C3LCULO DA CORRENTE SUBTRANSIT3RIA DE CURTO-CIRCUITO NO PONTO 1

Para calcular a corrente subtransit3ria de curto-circuito no ponto 1, 3 necess3rio transformar o diagrama unifilar da figura 2, no diagrama das imped3ncias correspondente para curto-circuito trif3sico, conforme figura 3.

Figura 3. Diagrama das impedâncias e o método de simplificação para determinar a impedância equivalente



As duas impedâncias do diagrama simplificado da Figura 3 estão em paralelo para o curto-circuito no ponto 1. A resultante desse cálculo é a impedância equivalente subtransitória no ponto 1, mostrada em (13).

$$x_{eq}'' = j0,0039 pu \quad (13)$$

Utilizando as equações (9) e (10) obtém-se a potência e a corrente subtransitória no ponto 1 respectivamente.

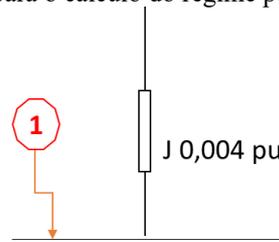
$$S_{k3}'' = \frac{10000}{0,0039} = 2564 MVA \quad (14)$$

$$I_{k3}'' = \frac{2564 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 69} = 21.5 kA \quad (15)$$

5.2 CÁLCULO DA CORRENTE APÓS O ESTABELECIMENTO DO REGIME PERMANENTE DE CURTO-CIRCUITO NO PONTO 1

O diagrama de impedância para o cálculo da corrente do regime permanente de curto-circuito no ponto 1 encontra-se apresentado na figura 4.

Figura 4. Diagrama de impedância para o cálculo do regime permanente de curto-circuito no ponto 1.



$$S_{k3} = 2500 \text{ MVA} \quad (16)$$

$$I_{k3} = \frac{2500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 69} = 20.9 \text{ kA} \quad (17)$$

6 MAXIMUM LOAD FLOW

Para o dimensionamento da corrente nominal do disjuntor é necessário calcular a maior corrente que circula no trecho onde ele deve ser instalado. Conforme diagrama unifilar da figura 2, o cálculo da maior corrente que circula no trecho do disjuntor de entrada de 69 kV é determinada pelo somatório de todas as cargas do sistema elétrico, ou seja, a soma de todos os motores e das cargas de serviços auxiliares.

Entretanto, há de se observar que, os dois transformadores de força foram dimensionados para atender a demanda de todas as cargas e logicamente a potência nominal deles é superior ao somatório de todas as cargas da estação elevatória suprida pela subestação. Assim, ao se dimensionar a corrente nominal do disjuntor pela soma da potência nominal dos transformadores de força, além de uniformizar a capacidade dos equipamentos da subestação, libera-se toda a capacidade em transformadores para fluir pelo sistema, podendo eventualmente suprir um determinado aumento de carga. Dessa forma, a máxima corrente que circula no trecho a ser considerada no dimensionamento da nominal do disjuntor é calculada pela equação (18).

$$I = \frac{2 \times 10000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 69} = 167.35 \text{ A} \quad (18)$$

7 DIMENSIONAMENTO DO DISJUNTOR DE 69 kV (52/1)

Os cálculos envolvidos para o dimensionamento do disjuntor são os constantes da figura 1. Com relação aos estudos referentes à coordenação de isolamento e TRT, a referência [10] apresenta metodologia para esses estudos.

A partir dos valores calculados de 167.3 A para a máxima corrente que circula no trecho em regime normal de operação e do valor da corrente do regime permanente de curto-circuito 20.9 kA,

pode ser determinado a corrente nominal do disjuntor e a corrente de interrupção nominal utilizando a tabela 2 ou qualquer tabela de coordenação dos valores nominais de corrente fornecida pelos fabricantes de disjuntores.

Tabela 2 Coordenação dos valores nominais dos disjuntores

Tensão nominal kV (eficaz)	Capacidade de interrupção nominal em curto-circuito kA (eficaz)	Corrente nominal A (eficaz)					
		3	4	5	6	7	8
1	2						
72,5	12.5			800	1200		
	16			800	1200		
	20				1200	1600	2000
	31.5				1200	1600	2000
145	12.5	800	1200				
	20		1200	1600	2000	2500	
	25		1200	1600	2000	2500	
	31.5		1200	1600	2000	2500	3000
	40			1600	2000	2500	3000
	50				2000	2500	3000

A corrente nominal a ser adotada assim como a corrente de interrupção nominal devem ser maiores que os valores calculados da máxima corrente em regime normal de operação e da corrente do regime permanente de curto-circuito. Assim, utilizando-se a tabela 2 para a tensão nominal de 72.5 kV, o valor da capacidade de interrupção nominal imediatamente superior ao valor eficaz da componente periódica (i_{ca}) calculada (I_{k3}) é 31.5 kA e a corrente nominal coordenada com esse valor é de 1200 A que atende com folga a máxima corrente que circula no trecho em regime normal de operação.

Dessa forma, adota-se os seguintes valores nominais:

- Capacidade de interrupção nominal em curto-circuito (I_N): 31.5 kA (eficaz);
- Corrente nominal (I_N): 1200 A (eficaz).

Para a determinação da capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito se faz necessário o conhecimento do fator de assimetria (f) que pode ser calculado pela equação (4). Considerando a constante de tempo (τ) de 45 ms o valor de f calculado pela equação (4) é de 2.6, conforme também estabelecido nas referências [6] e [11].

Assim, aplicando-se f e a corrente subtransitória de curto-circuito calculada para o ponto 1 na equação (3), obtém-se o valor calculado da corrente para a determinação da capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito do disjuntor.

$$I_{fmax} = 2.6 \times 21.5 \text{ kA} = 55,9 \text{ kA (crista)} \quad (19)$$

Ocorre que I_{IN} padronizado adotado para o disjuntor foi de 31.5 kA. Assim capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito normalizada deve ser o valor conforme (20).

$$I_{Cap Est Nom cc} = 2.6 \times 31.5 \text{ kA} = 81,9 \text{ kA (crista)} \quad (20)$$

A seguir apresenta-se a especificação do disjuntor (52/1) de entrada da subestação;

- Tensão nominal: 69 kV;
- Tensão nominal máxima: 72.5 kV;
- Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (TSNIA): 350 kV;
- Tensão suportável nominal a frequência industrial (TSNFI): 140 kV;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Corrente nominal: 1200 A;
- Corrente de interrupção nominal em curto circuito: 31.5 kA (eficaz);
- Capacidade de estabelecimento nominal em curto circuito: 81.9 kA (crista);
- Tipo: Disjuntor a SF₆;
- Disjuntor tanque vivo;
- Tipo de acionamento: Tripolar;
- Mecanismo de acionamento: Mola carregada automaticamente por motor elétrico e acionamento manual;
- Sequencia Nominal de Operação: O 0,3s CO 3min CO (religamento rápido);
- Tempo de Interrupção Nominal: 3 ciclos;
- Instalação: Ao tempo.

8 CONCLUSÃO

Uma abordagem inovadora no dimensionamento de disjuntores de potência, apresentando um método simplificado é proposta para otimizar o processo de seleção desses equipamentos. Para a determinação das características de curto-circuito o método das potências modificado é utilizado e são introduzidos critérios de dimensionamento baseados na operação do sistema elétrico para a definição da máxima corrente no ramal desejado para o estudo.

Um sistema teste de uma estação de bombeamento de água composto por uma SE de 69 kV com arranjo radial e secundário seletivo é estudado. Conclui-se que a metodologia proposta representa uma ferramenta bastante útil aos engenheiros eletricitistas, auxiliando-os na seleção de disjuntores de potência.



Uma estrutura metodológica semelhante à usada no artigo pode ser adotada para a o dimensionamento de outros equipamentos elétricos de manobra. O estudo também pode ser estendido para dimensionar equipamentos em média e baixa tensão.



REFERÊNCIAS

[JUNIOR, C.V. *Disjuntores de Corrente Alternada: Especificação e Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão*. Notas de Aula, Universidade Federal Fluminense, UFF, 1988.

FRONTIN, Sergio O. et al. Equipamentos de alta tensão—prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. *Brasília: Teixeira*, v. 2000, p. 934, 2013.

COLOMBO, Roberto. *Disjuntores de alta tensão*. São Paulo: Livraria Nobel S. A, 1986.

LIMA, G. R., Borges, T. T., Baptista, J. M., Monteiro, P. R., & Lima, L. (2018, May). Virtual reality as a tool for electrical substations teaching. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)* (pp. 1-6). IEEE.

MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe. *Introdução à subestação e seus principais equipamentos*. Seven Editora, 2023.

ABB Power Technologies. *Interruptores tipo tanque vivo — Guía del usuario* Edición 3, 2005-09.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR IEC 62271-1, Manobra e comando de alta tensão – Parte 1: Especificações comuns para equipamentos de manobra e comando em corrente alternada. Rio de Janeiro, 2020.

D’Ajuz, A., et al: *Equipamentos Elétricos –Especificação e Aplicação em Subestações de Corrente Alternada*. Furnas/UFF, 300 p. Rio de Janeiro, 1985.

YUEN, Moon H. Short Circuit ABC--Learn It in an Hour, Use It Anywhere, Memorize No Formula. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1974, 2: 261-272.

MONTEIRO, Paulo R. Duailibe, et al. Power system stress analysis for main grid substations in Brazil. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2016, 24.3: 377-391.

Norma IEC 62271-100 Edicao 2.1 (2012-09). *High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: Alternating-current Circuit Breakers*.