



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

HIAGO RICHARD SANTA CRUZ MARTINS BARBOSA



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
DIMENSIONAMENTO DE MOV PARA PROTEÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES
SÉRIE



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

HIAGO RICHARD SANTA CRUZ MARTINS BARBOSA

DIMENSIONAMENTO DE MOV PARA BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2018

HIAGO RICHARD SANTA CRUZ MARTINS BARBOSA

DIMENSIONAMENTO DE MOV PARA BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

George Rossany Soares de Lira
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor Karcius Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico esse trabalho a meus pais e à minha irmã, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram. E à minha noiva, que sempre me acalmou e motivou em todos os momentos dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, que sempre me deu forças para que eu conseguisse vencer todos os desafios que essa jornada me impôs.

Agradeço também a meus pais, Jakelline e Ulisses, por tanto amor e me ensinarem o valor do conhecimento e se sacrificarem diariamente para que eu pudesse ter uma boa educação e tivesse esperança em dias melhores, além de me acolher e aconselhar nos momentos que busquei sua sabedoria.

À minha irmã, Laryssa, por sempre torcer por mim e ser inspiração de profissionalismo e carinho, ao mesmo tempo.

Agradeço à minha noiva, Maria Helena, por ser porto seguro em todos os momentos dessa caminhada, cuidando de mim e sendo materialização da minha vontade de me tornar uma pessoa melhor a cada dia. Obrigado por ser presença de Deus na minha vida e buscar os mesmos ideais que eu.

Agradeço também a toda minha família, que sempre me incentivou e me fez acreditar que tudo isso era possível, em especial à minha avó, Nilza Santa Cruz, por ser minha inspiração de inteligência e sagacidade.

Agradeço a meus tios Conceição Santa Cruz e João Batista, bem como seus filhos, por me acolherem em sua casa para que eu pudesse estudar e não fazerem distinção entre mim e os seus.

Aos meus amigos Felipe Barros, Glauber Almino e Matheus Dantas, com quem dividi noites de estudos, risadas e preocupações durante o curso.

Agradeço ao professor Karcus Dantas, por todos os conhecimentos passados e pela paciência em me ouvir e aconselhar para o melhor resultado desse trabalho. E também ao professor George Lira, que contribuiu para o resultado final desse trabalho com suas correções e sugestões.

Agradeço a CHESF, na pessoa dos engenheiros Fábio Nepomuceno e Dalton Guedes, pelas contribuições inestimáveis a esse trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“A mente que se abre à uma nova ideia
jamais volta ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho mostra o procedimento para dimensionar os MOVs (*Metal Oxide Varistors*) dos Bancos de Capacitores Série (BCS) 05C5 e 05C6 localizados na Subestação de São João do Piauí. São determinadas as energias absorvidas por cada MOV para que estes sejam dimensionados corretamente para suportar as solicitações advindas de curto-circuito no sistema elétrico. O *software ATP (Alternative Transient Program)* foi utilizado para simular o sistema elétrico no horizonte de 2022 bem como o esquema elétrico dos BCS e o sistema de controle da proteção, este último utilizando a linguagem TACS. Foram determinados o nível de corrente de curto-circuito e energia a que os MOVs podem ser submetidos e que servem como parâmetro para realizar ou não o *by-pass* do BCS. Para isso simulou-se diversas faltas no sistema de forma a ajustar a proteção para as condições mais severas e avaliou-se o desempenho do ajuste encontrado. Também foi comparado o ajuste proposto com o atual e verificou-se que o ajuste vigente ficará obsoleto para o sistema do horizonte citado. Os parâmetros de ativação do *Spark Gap* por corrente foram superados, os de energia permaneceram próximos aos atuais. A energia nominal de um dos MOV, na linha Boa Esperança – São João do Piauí encontrada foi cerca de duas vezes o valor anterior, enquanto que a energia do MOV localizado no circuito 1 da linha entre São João do Piauí e Sobradinho permaneceu próxima ao valor anterior.

Palavras-chave: Banco de Capacitores Série (BCS), Dimensionamento de MOV, Proteção de BCS, Sistema Interligado Nacional.

ABSTRACT

This work shows the procedure for dimensioning the Metal Oxide Varistors (MOVs) of the Series Capacitor Banks (BCS) 05C5 and 05C6 located in the São João do Piauí Substation. The energies absorbed by each MOV are determined so that they are correctly sized to withstand short-circuit requests in the electrical system. The ATP (Alternative Transient Program) software was used to simulate the electrical system in the 2022 horizon as well as the electric scheme of the BCS and the protection control system, the latter using the TACS language. The level of short-circuit current and energy to which the MOVs can be submitted and which serve as a parameter to carry out BCS by-pass or not is determined. For this, several faults were simulated in the system in order to adjust the protection for the most severe conditions and the performance of the found adjustment was evaluated. It was also compared the proposed adjustment with the current one and it was verified that the current adjustment will be obsolete for the system of the mentioned horizon. The parameters of activation of the Spark Gap by current were overcome, those of energy remained close to the current ones. The nominal energy of one of the MOVs in the Boa Esperança line - São João do Piauí found was about twice the previous value, while the MOV energy located in line 1 of the line between São João do Piauí and Sobradinho remained close to the value previous.

Keywords: Series Capacitor Bank (BCS), MOV Scaling, BCS Protection, National Interconnected System.

SUMÁRIO

Sumário	ix
Lista de Ilustrações	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
Lista de Símbolos	xiii
1 Introdução.....	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Motivação	15
2 Fundamentação Teórica.....	16
2.1 Compensação Série.....	16
2.1.1 Grau de Compensação	17
2.1.2 Frequência de Ressonância.....	17
2.2 Configuração dos BCS da SE SJI	18
2.3 Principais Componentes do BCS	19
2.3.1 Capacitores Série	19
2.3.2 <i>Metal Oxide Varistor (MOV)</i>	20
2.3.3 <i>Spark Gap</i>	22
2.3.4 Circuito de Amortecimento	23
2.3.5 Disjuntor de By-Pass	23
2.4 Modos de Operação	24
2.4.1 Sistema de Controle.....	27
3 Dimensionamento dos MOVs	29
3.1 Sistema Elétrico Utilizado	29
3.2 Critérios	30
3.3 Aplicação das Faltas	31
3.4 Cálculo de Energia.....	31
3.5 Ajuste da Proteção por Corrente	32
3.5.1 Adequação dos Ajustes.....	34
3.6 Ajuste da Proteção por Energia.....	36
3.7 Energia Nominal dos MOV	37
4 Análise do Desempenho da Proteção Após os ajustes.....	41
4.1 Comparação dos Parâmetros da Proteção e Energia nominal	42
4.2 Comparação de Desempenhos da Proteção.....	43
5 Conclusão	45
Referências	47
APÊNDICE A – Dados técnicos do SIN no horizonte 2022.....	48

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Linha de Transmissão Compensada.....	16
Figura 2 - Diagrama Unifilar do BCS de São João do Piauí	18
Figura 3 – Exemplo de unidades capacitivas em configuração H	20
Figura 4 – Curva característica de um MOV.....	21
Figura 5 – <i>Spark Gap</i> com duas seções.....	22
Figura 6 – BCS em modo de operação normal.....	24
Figura 7 – BCS operando sob condição de falta.....	25
Figura 8 – BCS com <i>by-pass</i> ativo.....	26
Figura 9 – BCS com disjuntor de <i>by-pass</i> fechado.....	26
Figura 10 – Fluxograma de Controle.....	28
Figura 11 – Diagrama unifilar do SIN no horizonte 2022	29
Figura 12 – Diagrama unifilar do SIN no horizonte 2008	30
Figura 13 – Corrente no MOV C1 – curto-circuito na barra BEA – <i>by-pass</i> desativado	33
Figura 14 – Corrente no MOV C2 – curto-circuito na barra SJI – <i>by-pass</i> desativado	34
Figura 15 – Corrente no MOV C1 – curto-circuito na barra BEA – <i>by-pass</i> ativado apenas por corrente.....	35
Figura 16 – Corrente no MOV C2 – curto-circuito no BCS do circuito 2 da LT SJI-SOB – <i>by-pass</i> ativado apenas por corrente.....	35
Figura 17 – Energia acumulada no MOV C1 – curto-circuito próximo à barra BEA – <i>by-pass</i> ativado apenas por corrente – utilizando ajuste final de corrente.....	37
Figura 18 – Energia acumulada no MOV C2 – curto-circuito próximo à barra USB – <i>by-pass</i> ativado apenas por corrente – utilizando ajuste final de corrente.....	38
Figura 19 – Energia acumulada no MOV C1 – curto-circuito localizado a 50 km da barra BEA – <i>by-pass</i> ativado por corrente ou energia	39
Figura 20 – Energia acumulada no MOV C2 – curto-circuito localizado a 100 km da barra USB – <i>by-pass</i> ativado por corrente ou energia	40
Figura 21 – Corrente no MOV C1 – curto-circuito na barra BEA – ajuste atual da proteção	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados técnicos dos BCS 05C5 e 05C6	19
Tabela 2 – Máximas corrente de curto-circuito nos MOV com <i>Gap</i> desativado.....	33
Tabela 3 – Máximas corrente de curto-circuito nos MOV para adequação do ajuste da proteção	35
Tabela 4 – Máximas corrente de curto-circuito nos MOV o novo ajuste da proteção.....	36
Tabela 5 – Máximas energias acumuladas nos MOV para ajuste da proteção por energia	37
Tabela 6 – Máximas energias acumuladas nos MOV para diferentes locais de falta	39
Tabela 7 – Resumo dos ajustes finais da proteção	41
Tabela 8 – Correntes de pico e energias acumuladas nos MOV com ajuste final da proteção	41
Tabela 9 – Comparação de parâmetros de ajuste da proteção	42
Tabela 10 – Correntes de pico e energias acumuladas nos MOV com ajuste atualmente instalado	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
BEA	Boa Esperança
LT	Linha de Transmissão
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SJI	São João do Piauí
SOB	Sobradinho
USB	Usina de Sobradinho

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{SET}	Máxima corrente esperada no MOV para uma falta externa
E_{SET}	Máxima energia permitida no MOV para uma falta externa
$E_{MOV C1}$	Energia nominal do MOV C1
$E_{MOV C2}$	Energia nominal do MOV C2
$I_{MOV C1}$	Corrente de pico no MOV C1
$I_{MOV C2}$	Corrente de pico no MOV C2
I_{EXT}	Pico de corrente no MOV para uma falta externa
E_{EXT}	Energia acumulada no MOV em uma falta externa
δa	Ângulo da tensão nos terminais de V_a
δb	Ângulo da tensão nos terminais de V_b
V_a	Magnitude de tensão terminais da linha
V_b	Magnitude de tensão terminais da linha
X_l	Reatância indutiva
X_c	Reatância capacitiva
$X_{cl\phi}$	Reatância capacitiva do BCS por fase
f_r	Frequência de ressonância
f	Frequência do sistema

1 INTRODUÇÃO

Devido à inevitabilidade de extensão do sistema elétrico para atender à todas as cargas, surgiu a necessidade de se construir Linhas de Transmissão (LT) com grandes comprimentos. Estes circuitos, apesar de atenderem o objetivo de levar energia para regiões distantes, trazem complicações físicas que, se não forem previstas em seus projetos, podem comprometer seriamente a capacidade de transmissão dessa energia.

De fato, as LTs são uma parte fundamental dos sistemas elétricos, uma vez que fazem a conexão entre dois pontos: unidade geradora e carga. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), até 2016, o SIN dispunha de uma rede de transmissão com cerca de 134.765 Km de extensão, com previsão de chegar em 154,748 Km em 2019. Desse total, 55.568 Km (41,23%) corresponde a linhas de 230 kV e 46.630 km (34,6%) são linhas de 500 kV, ambas em corrente alternada.

O projeto de transmissão de energia em corrente alternada exige que se contemplem as necessidades de manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites operacionais e do sincronismo entre todas as máquinas síncronas do sistema (MILLER, 1982). Dessa forma, garante-se a capacidade do sistema de manter o equilíbrio em condições normais e restabelecê-lo após perturbações no mesmo, isto é, assegura-se sua estabilidade.

Devido ao aumento contínuo de carga e as dificuldades para implantação de novas LTs, por restrições ambientais e custos elevados de concessões, o sistema passa a operar em níveis de carregamento próximos aos máximos permitidos, o que acarreta na diminuição da margem de estabilidade. Isto implica no aumento da probabilidade da perda de sincronismo dos equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP) e o inevitável colapso da rede. Nesse contexto, a compensação série se apresenta como uma solução vantajosa por majorar tanto a estabilidade quanto a capacidade de transmissão da linha, ganhando em aproveitamento da instalação e maior tempo entre manutenções.

A compensação série está embasada no princípio de compensar a reatância indutiva da LT através da instalação de capacitores em série com a mesma. Esse tipo de instalação favorece a diminuição das perdas reativas, aumentando a capacidade de transmissão.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo sobre o dimensionamento de MOV para proteção de BCS frente a diferentes situações de faltas.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Estudar a compensação reativa por meio de BCS;
- Estudar os fundamentos de MOV e seu emprego para proteção de BCS;
- Ajustar a proteção do BCS para que atue corretamente em caso de curto-circuitos;
- Encontrar o nível mínimo de energia que o MOV deve ser projetado para suportar todos os tipos de falta que este pode ser exposto.

1.2 MOTIVAÇÃO

A Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) possui a Subestação São João do Piauí 500 kV (SE SJI), que faz parte da interligação elétrica Norte/Nordeste. Esta SE possui 3 BCS instalados que fazem a compensação das duas linhas S. J. Piauí – Sobradinho 500kV (05C2 e 05C5), Boa Esperança – S. J. Piauí 500kV (05C6) e com previsão da instalação de mais um BCS na linha S. J. Piauí – Gilbués II 500kV.

Os BCS hoje instalados foram dimensionados conforme a configuração do sistema da época do planejamento de implantação. Entretanto, desde a instalação destes, a SE SJI recebeu novos circuitos de 500 kV, aumentando os níveis de curto-circuito da região. Portanto, se faz necessário o reajuste da proteção e o redimensionamento dos MOVs já instalados quanto à energia que devem dissipar sem serem avariados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

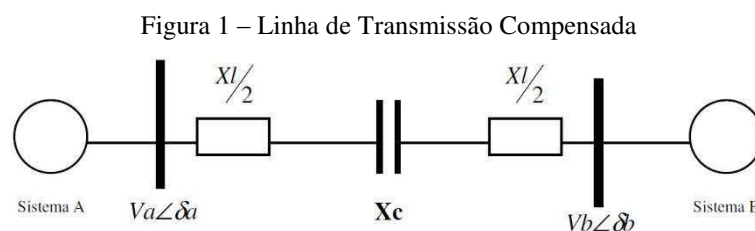
2.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE

As maiores quedas de tensão nas linhas são decorrentes dos parâmetros de impedância série da LT: reatância indutiva e resistência. Além disso, a reatância indutiva influencia na abertura angular do sistema, e, portanto, na sua estabilidade, tanto estática quanto dinâmica. Dessa forma, a compensação capacitiva série pode ser usada para diminuir os efeitos indutivos da linha.

A compensação série através de capacitores tem se mantido como uma solução recorrente por ter as vantagens de (JESUS, et al., 2003):

- Ser uma alternativa mais barata e igualmente eficiente face à outras propostas, trazendo o aumento da capacidade de transmissão das linhas através da redução da reatância indutiva;
- Melhorar o equilíbrio de energia reativa na linha, dessa forma, ocasionando uma redução na manutenção dos níveis de tensão da mesma. Ajuda a diminuir as oscilações de tensão e cintilações de tensão (*Flikers*);
- Ajustar a razão de impedâncias em circuitos paralelos, equilibrando a divisão de corrente no conjunto, minimizando as perdas e aumentando a capacidade de transmissão;
- Beneficiar a distribuição de carga e o perfil de tensão da LT, resultando no aumento do fator de potência e menores perdas globais.

Na Figura 1 temos uma representação de uma LT. A capacidade de transmissão de energia em uma LT compensada com BCS é dada pela Equação (1) (ALSTOM, 2011):



Fonte: Próprio autor.

$$P = \frac{V_a \cdot V_b}{X_l - X_c} \cdot \text{sen}(\delta_a - \delta_b), \quad (1)$$

em que P é a capacidade máxima de transferência de potência da linha [MW], V_a e V_b são as magnitudes de tensão terminais da linha [kV], δ_a e δ_b são os ângulos da tensão nos terminais V_a e V_b [°], respectivamente, X_l é a reatância indutiva da linha [Ω], e X_c é a reatância do BCS [Ω].

2.1.1 GRAU DE COMPENSAÇÃO

A taxa ou grau de compensação (GC) diz quanto da reatância indutiva da linha vai ser compensada com a inserção do capacitor em série com a LT. Nos projetos de BCS, esse parâmetro normalmente entre 0,25 e 0,7 (25% e 70%). Abaixo dessa faixa, o empreendimento torna-se inviável economicamente, enquanto que acima pode acarretar em transitórios de chaveamento, ressonância subsíncrona e estabilidade sub-harmônica (ALSTOM, 2011).

O GC é calculado como sendo a razão entre a impedância capacitiva ser inserida pelo BCS e a reatância indutiva da LT. Podemos ver essa representação na Equação (2):

$$GC = \frac{X_c}{X_l}. \quad (2)$$

2.1.2 FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

Uma vez inserida a capacitância série pelo BCS, a linha torna-se um circuito ressonante série. Desse conjunto é possível calcular a frequência de ressonância pela Equação (3) (ALSTOM, 2011):

$$f_r = f \cdot \sqrt{\frac{X_{c1\phi}}{X_l}}, \quad (3)$$

onde f_r é a frequência de ressonância do circuito [Hz], f a frequência do sistema [Hz], $X_{c1\phi}$ é o valor da reatância capacitiva do BCS por fase [Ω] e X_l representa a

reatância indutiva total da linha incluindo geradores e cargas conectadas ao final da linha [Ω].

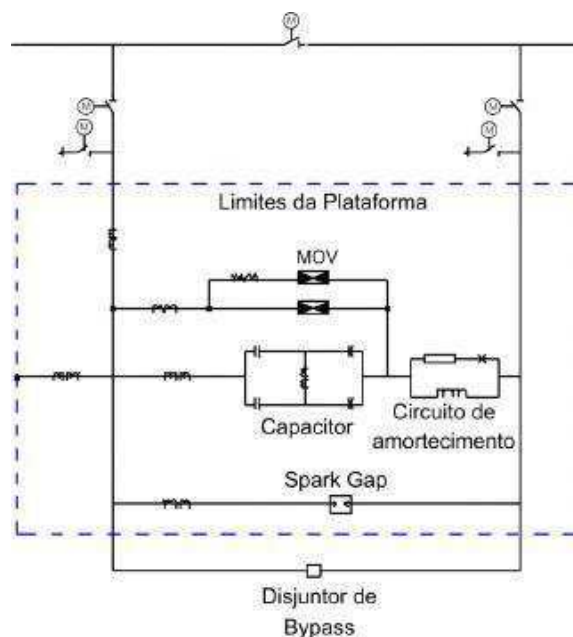
Geralmente o valor da frequência de ressonância é menor do que a frequência nominal do sistema, por isso, é denominada como ressonância subsíncrona. A ocorrência desse fenômeno é importante, pois dependendo da rede elétrica, de máquinas geradoras e do grau de compensação, podem acarretar oscilações subsíncronas consideráveis nas máquinas geradoras.

Esse tipo de perturbação deve ser previsto durante os estudos de dimensionamento da instalação a fim de verificar a possibilidade de seu surgimento não só em condições mais severas de falta como também para pequenos distúrbios.

2.2 CONFIGURAÇÃO DOS BCS DA SE SJI

Os BCS da SE SJI foram projetados segundo as determinações da IEC – 143 – 1 – 2004. Cada instalação é formada por um conjunto de três plataformas, distribuídas uma para cada fase. A proteção é feita pelo esquema de MOV e *Spark Gap*, uma vez que esse arranjo mostrou ser o mais eficiente tanto técnico quanto economicamente. Um diagrama unifilar mostrando os principais componentes dos BCS é mostrado na Figura 2:

Figura 2 - Diagrama Unifilar do BCS de São João do Piauí



Fonte: (LIMA, 2010).

Os BCS aqui analisados estão instalados na subestação desde 2004 e são denominados como 05C6 (BCS1) e 05C5 (BCS2). Os principais dados dos BCS estão dispostos na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Dados técnicos dos BCS 05C5 e 05C6

Descrição	Valores	
	BCS1	BCS2
Impedância do Banco	52,68 Ω	47,54 Ω
Capacitância	50,21 μF	47,69 μF
Tensão Nominal Sobre o Capacitor	8,4 kVrms	
Quantidade de Células Capacitivas	660	600
Indutância de Amortecimento	400 μH	
Resistor de Amortecimento	4 Ω	
Potência Reativa Nominal Total do BCS	484 Mvar	437 Mvar
Tensão Nominal de Operação	500 kV	
Corrente Nominal do BCS	1750 A	
Tensão Limite	2,17 pu	
Frequência Nominal	60 Hz	

Fonte: (CHESF, 2004).

2.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DO BCS

A determinação das características nominais dos componentes do BCS a serem dimensionados deve ser orientada pelas solicitações mais severas que estes possam ser submetidos. Estas solicitações devem ser determinadas através de simulações de faltas no sistema em que estejam inseridos.

É importante que o dimensionamento também contemple a máxima redução de custos, de forma que os parâmetros utilizados tragam um alto aproveitamento econômico ao projeto.

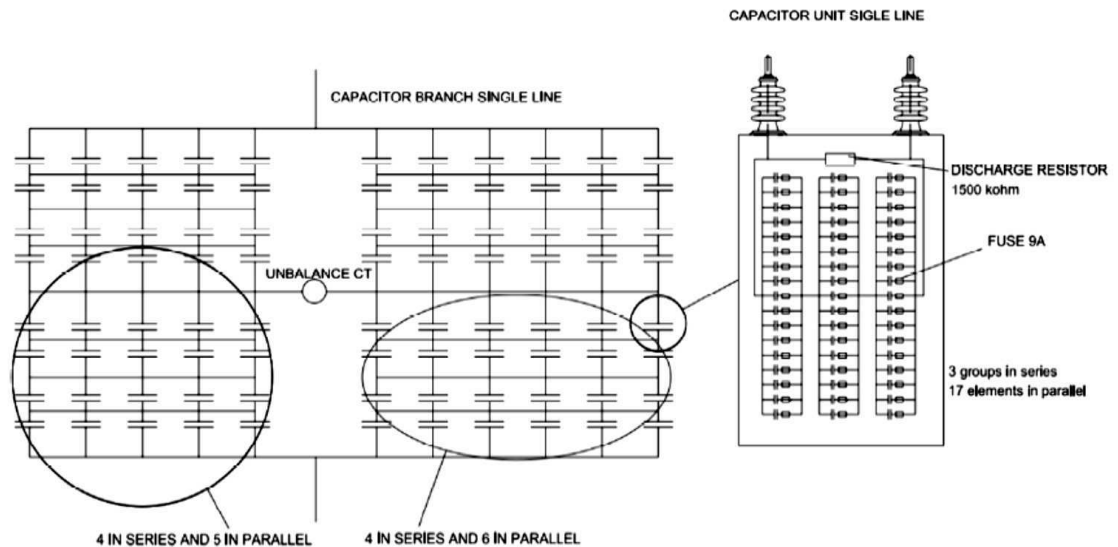
Assim, esse item irá falar dos componentes principais para o bom funcionamento de um BCS, levando em conta os BCS instalados na SE SJI.

2.3.1 CAPACITORES SÉRIE

Os capacitores estão organizados geralmente em configuração H, como é possível ver na Figura 3, composto por quatro colunas. Os bancos possuem um segmento por fase, formados por diversas células capacitivas com 733 kvar cada (LIMA, 2010). Cada segmento corresponde a uma plataforma montada. Possuem

reatâncias capacitivas de $52,68 \Omega$ (BCS1) e $47,54 \Omega$ (BCS2), o que equivale a $50,21 \mu\text{F}$ e $47,69 \mu\text{F}$, respectivamente.

Figura 3 – Exemplo de unidades capacitivas em configuração H



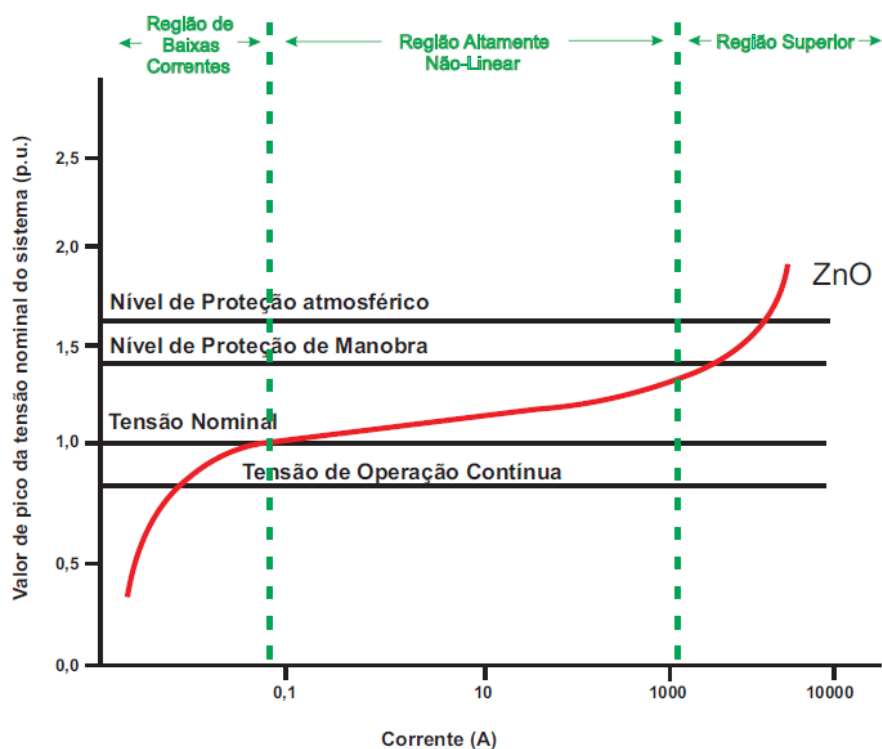
Fonte: (ALSTOM, 2011).

Cada unidade capacitiva é composta por várias células capacitivas associadas em série e paralelo a fim de se obter a capacitância projetada. Cada elemento interno possui fusíveis, o que garante que, em caso de qualquer falha, um fusível interno irá desconectar o elemento avariado. Como resultado, a tensão através dos elementos paralelos saudáveis irá aumentar.

2.3.2 METAL OXIDE VARISTOR (MOV)

Os MOVs protegem os capacitores contra sobretensões oferecendo um caminho alternativo de passagem da corrente em caso de faltas no sistema de transmissão. Estes equipamentos são formados por células de óxido de zinco (ZnO), colocadas em série, que conferem uma característica de resistência não linear ao mesmo. A curva característica de um MOV pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Curva característica de um MOV.



Fonte: (BATISTA, 2017).

Durante sua operação normal, o MOV está na Região de Baixas Correntes, isto é, funciona como uma alta resistência, onde a corrente passa totalmente pelos capacitores. Em caso de sobretensões, o MOV passa a operar na região de Superior, região de baixa resistência, diminuindo sua resistência e desviando a corrente que passaria pelos capacitores para ele próprio, protegendo-os dos efeitos destrutivos das altas correntes.

Os MOVs devem ser corretamente dimensionados, de forma que estes suportem a quantidade de energia que necessitem dissipar em caso de curtos-circuitos. Para isso, é importante que sejam feitas simulações de faltas utilizando diversas configurações onde sejam abrangidas as situações mais severas para a instalação.

Existem dois tipos de falta que devem ser considerados nos estudos para dimensionamento de energia dos MOVs, segundo descrito a seguir:

- Faltas Externas: São aquelas que ocorrem em linhas as quais não estejam instalados os BCS, delimitada pelos disjuntores de linha;
- Faltas Internas: Defeitos que ocorram na linha onde o BCS encontra-se instalado.

O MOV deve ser dimensionado de forma a não ser danificado durante a aplicação de faltas externas, uma vez que o *by-pass* dos capacitores série durante a

ocorrência não é permitido. Caso uma falta interna seja detectada, é permitido o *by-pass* do BCS através do *Spark Gap*. Este tipo de falta produz as mais severas solicitações sobre os capacitores e MOV em termos de sobretensão (LIMA, 2010).

2.3.3 SPARK GAP

Este equipamento destina-se a fazer o *by-pass* da instalação para proteger o MOV contra sobrecargas em caso de faltas internas. É composto por duas seções que ficam colocadas uma sobre a outra, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – *Spark Gap* com duas seções



Fonte: (LIMA, 2010).

O sistema de disparo principal localiza-se na parte inferior, enquanto que a seção superior é disparada a partir do disparo da inferior. O sistema de proteção efetua o disparo do *Spark Gap* nas seguintes situações (LIMA, 2010):

- A magnitude da corrente no MOV é superior ao valor de ajuste definido para a mais severa falta externa.
- A temperatura do MOV atinge seu valor limite, indicando que o limite de energia dissipada foi atingido.

2.3.4 CIRCUITO DE AMORTECIMENTO

Recebe esse nome por ter a função de amortecer os picos da corrente de descarga no BCS em caso de atuação do *Gap*. É formado por um reator em paralelo com uma resistência, ficando conectado em série com os capacitores.

Este arranjo permite que as chaves seccionadoras de *by-pass* sejam abertas com tensão nula quando ocorre o *by-pass* do BCS, mesmo que através do disjuntor de *by-pass* circule a corrente nominal da linha. Um reator de 400 μH foi escolhido para cada BCS, o que resulta numa corrente de descarga com frequência de 1100 Hz. Para que o grau de compensação de 70% seja atingido com exatidão, o valor de indutância de amortecimento deve ser considerado no dimensionamento do capacitor. A resistência foi definida como de 4 Ω para que o amortecimento desejado fosse obtido (LIMA, 2010).

Para evitar que uma corrente de regime permanente circule através do reator, o que elevaria as perdas do conjunto, um *Gap* auxiliar é conectado em série com o resistor, cujo disparo ocorre em sincronia com o *Gap* principal. Desta forma, o resistor é inserido apenas durante a operação de descarga e não é necessário dimensioná-lo para operação em regime permanente. O referido elemento é dimensionado para suportar um ciclo de trabalho de duas descargas consecutivas (LIMA, 2010).

2.3.5 DISJUNTOR DE BY-PASS

Este equipamento tem função de inserir ou desconectar o BCS do sistema. É projetado de forma a não danificar o sistema de compensação série, atendendo a requisitos como tempo máximo de fechamento e suportabilidade a correntes de descarga capacitivas.

O disjuntor é aberto ou fechado através de contatos existentes nos sistemas de proteção do BCS. Duas bobinas separadas de fechamento e duas bobinas de abertura são fornecidas e conectadas aos dois sistemas de proteção. Para comandos de abertura ou fechamento através do operador, o sistema de controle da planta pode enviar os respectivos comandos aos sistemas de proteção (BRITO, 2012).

Os disjuntores de *by-pass* da instalação em questão são de 550 kV com isolamento a SF₆. Composto por três unidades monofásicas com tensão nominal de 245 kV nos

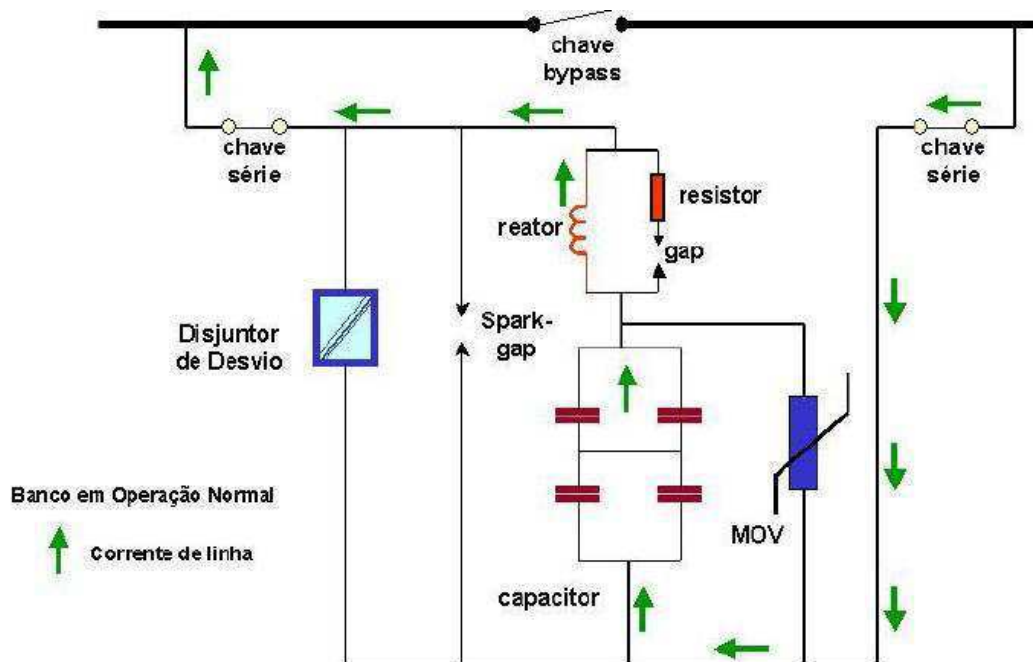
terminais e tempo de fechamento de 50 ms. Capacidade de corrente de curto-circuito de 40 kArms.

2.4 MODOS DE OPERAÇÃO

Os BCS têm sua operação totalmente automática, isto é, todas as decisões de retirada (*by-pass*) ou inserção da instalação é feita pelo sistema de controle, embora a reinserção possa ser feita de forma manual. Em caso de faltas monofásicas ou polifásicas, ou em condições de sobrecarga que excedam os limites de energia acumulado pelo MOV ou de corrente definidos em projeto para a operação do BCS, o banco será retirado e reinserido após a contingência ter sido eliminada. Entretanto, o *by-pass* só será feito em caso de faltas internas. Isto implica que, para faltas externas, o MOV deve ter capacidade de absorver toda a energia a que for submetido. Por isso, é importante simular as condições mais severas de falta para se dimensionar corretamente o para-raios.

Sob condições normais de operação, a corrente passa pelos capacitores, reator de amortecimento e segue para a linha, segundo pode ser visto na Figura 6.

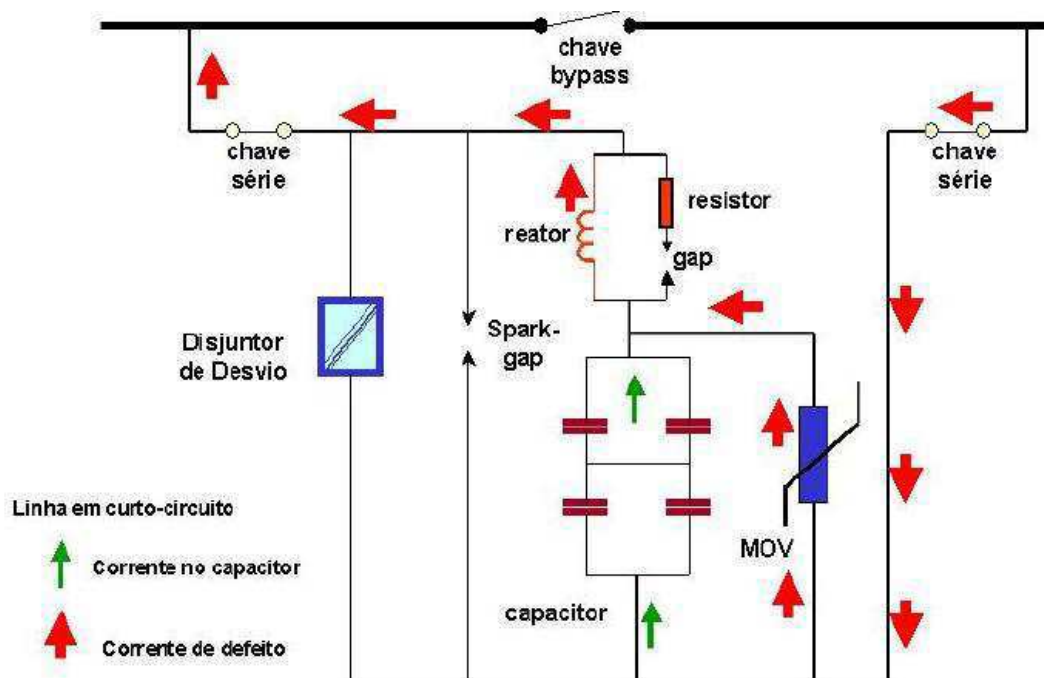
Figura 6 – BCS em modo de operação normal.



Fonte: (ALSTOM, 2011).

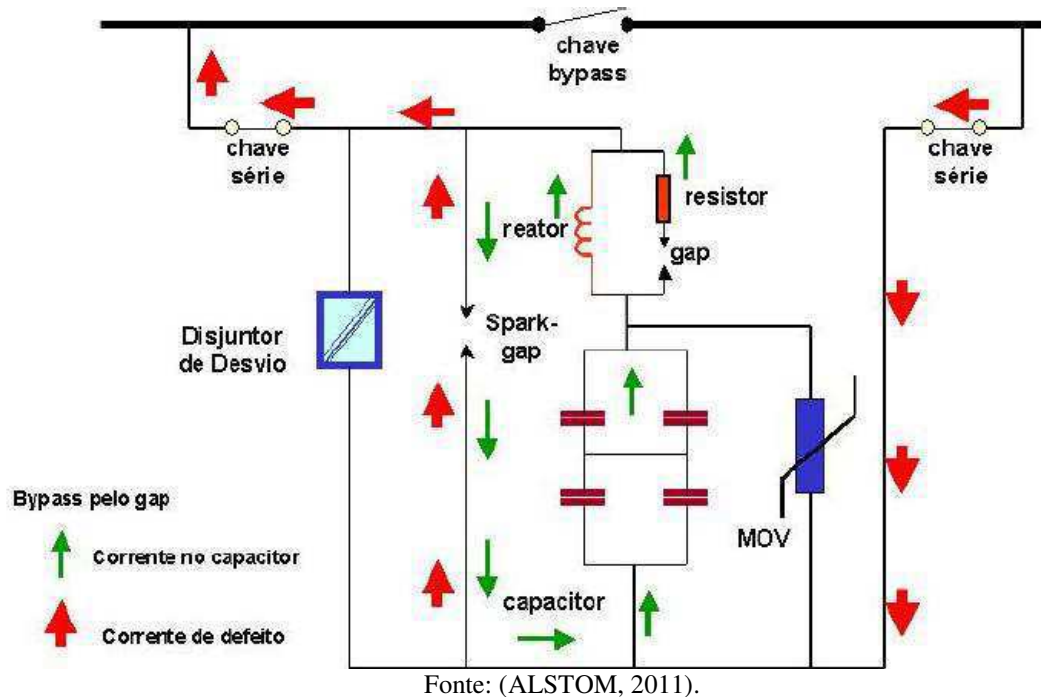
Em caso de curto-circuito, o varistor terá sua impedância diminuída, de forma que a corrente seja desviada para o mesmo, aliviando os capacitores. A corrente continuará passando pelo reator de amortecimento, mas a resistência de amortecimento ainda não está inserida, conforme é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – BCS operando sob condição de falta.

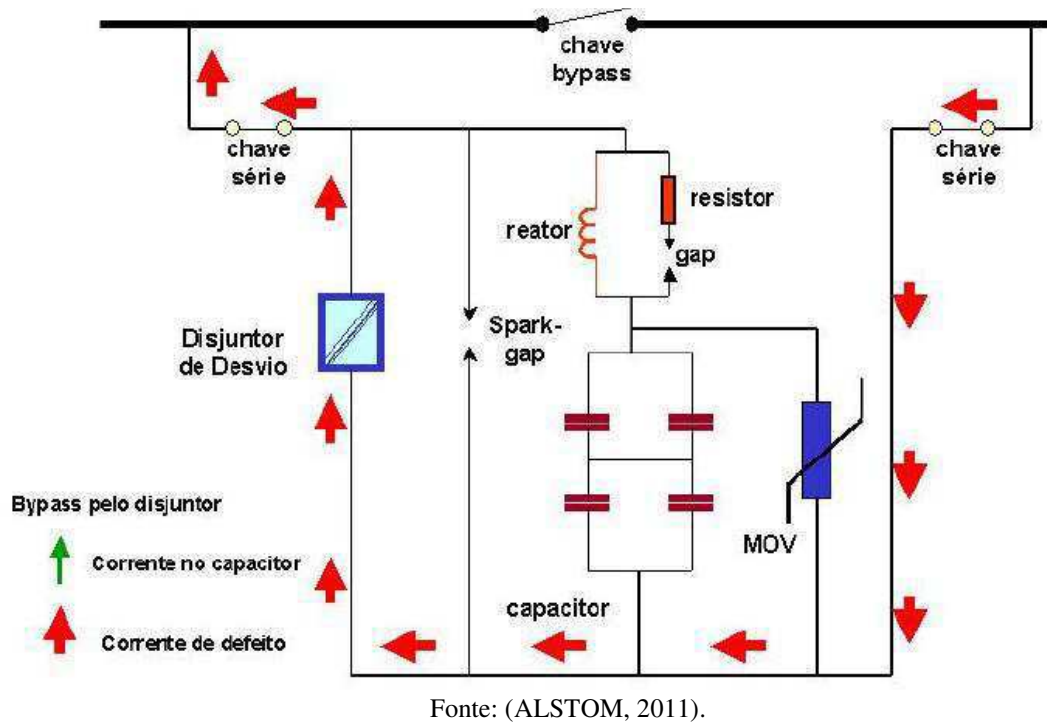


Fonte: (ALSTOM, 2011).

Caso a corrente ou a energia do MOV atinja o nível limite determinado no projeto, acontecerá o disparo forçado do *Spark Gap* e, em conjunto, do centelhador do circuito de amortecimento. Isso equivale ao *by-pass* do banco. Nesse instante, a corrente de falta irá passar também pelo *Spark Gap* e pelo circuito de amortecimento plenamente, isto é, reator e resistor de amortecimento, segundo ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – BCS com *by-pass* ativo.

Em seguida, o disjuntor de *by-pass* será fechado e irá conduzir toda a corrente. O banco permanecerá desviado aguardando a reinserção. Essa fase de operação pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 – BCS com disjuntor de *by-pass* fechado.

2.4.1 SISTEMA DE CONTROLE

A tomada de decisão de realizar o *by-pass* do BCS passa por algumas etapas interpretadas pelo sistema de controle que monitora os dois BCS. Na Figura 10 é mostrado o diagrama de blocos simplificado do sistema de controle onde se ilustra a filosofia de atuação desse controle.

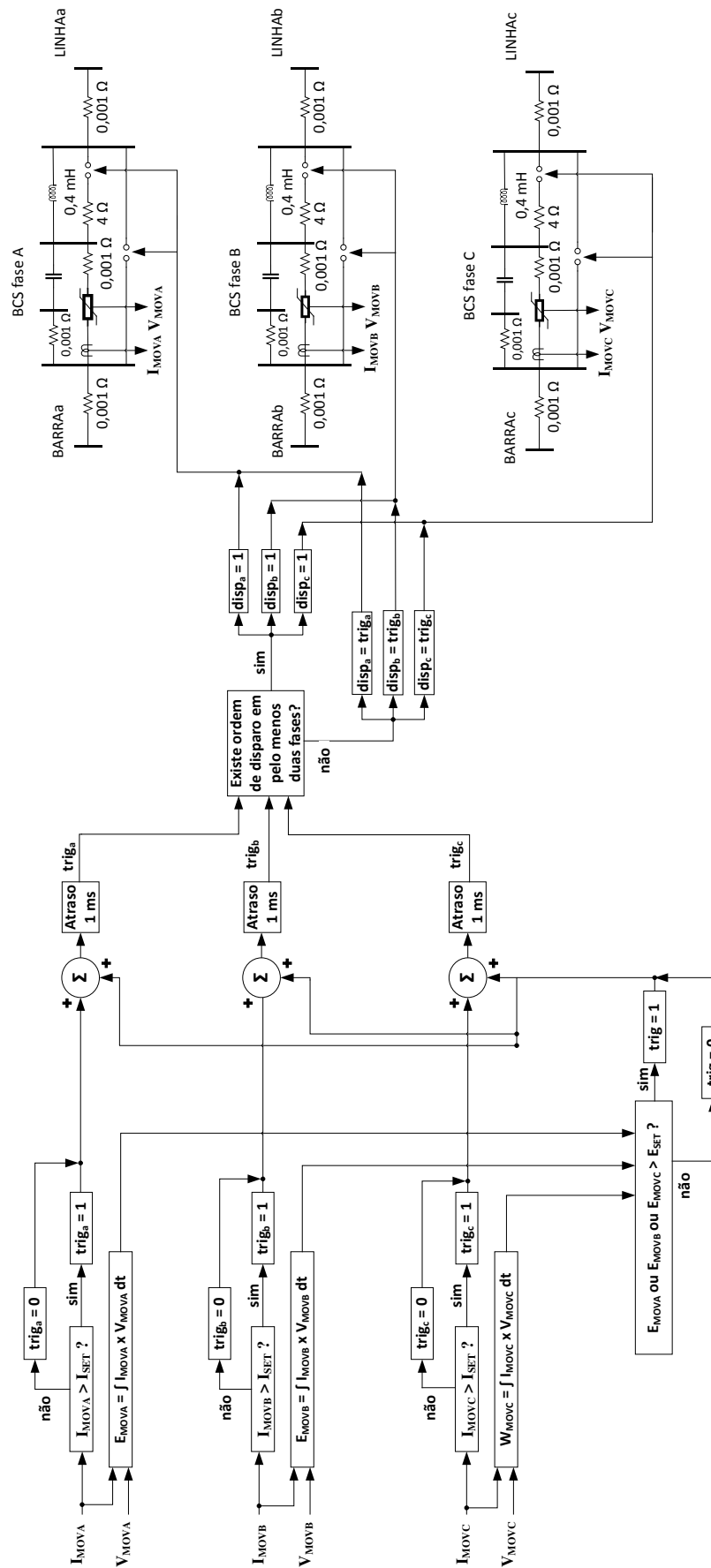
Constantemente, as correntes de cada fase (I_{MOVA} , $I_{MOV B}$ e $I_{MOV C}$) são medidas e comparadas com a corrente máxima esperada pelo MOV para uma falta externa (I_{SET}). Caso o valor medido seja maior que o permitido, é emitido um sinal de disparo do *Gap* a fim de proteger o banco de capacitores de danos físicos causadas pela alta corrente. ($trig_a$, $trig_b$, $trig_c$). As ordens de disparo são dadas de forma independentes para cada fase.

Simultaneamente, as energias a serem dissipadas por cada MOV são calculadas (E_{MOVA} , $E_{MOV B}$ e $E_{MOV C}$). A decisão de ativar o *Gap* acontece caso qualquer uma das energias obtidas supere o valor máximo esperado para uma falta externa (E_{SET}). Nessa situação, é emitido um sinal de ativação do *Spark Gap* ($trig$) para que o MOV não sobreaqueça e seja avariado.

Caso algum desses sinais de disparo seja emitido, o sinal sofre um atraso de 1 ms e é analisado por um bloco lógico se o disparo foi ordenado por uma ou mais fases. O atraso é para simular o tempo de realizar a medição pelos sensores. Caso sejam sinais oriundos de duas ou três fases, o *Spark Gap* é ativado nas três fases. Caso o sinal seja oriundo de apenas uma fase, apenas essa fase receberá o comando de *by-pass*.

É importante notar que o mesmo sinal de *by-pass* é recebido pelo *Spark Gap* principal e pelo *Gap* do circuito de amortecimento.

Figura 10 – Fluxograma de Controle



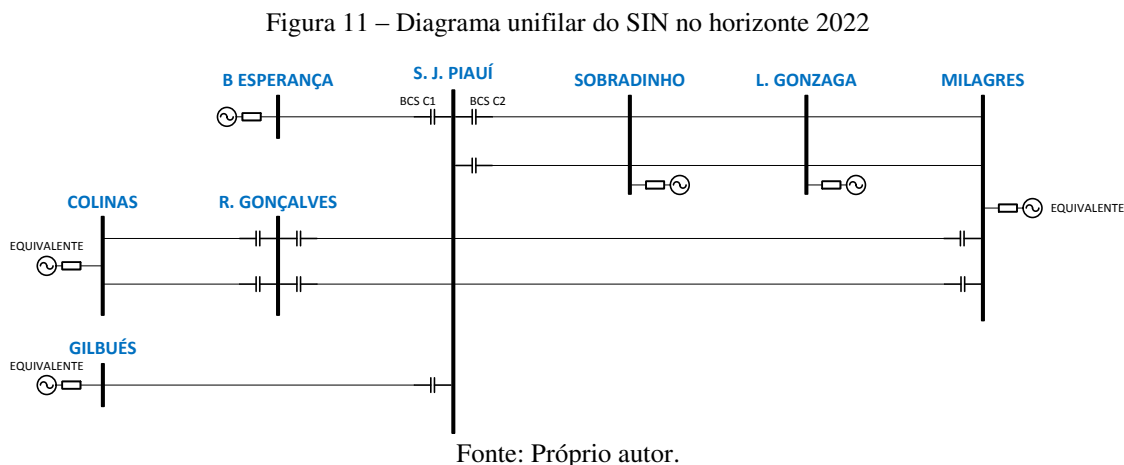
Fonte: (CHESF, 2002).

3 DIMENSIONAMENTO DOS MOVs

Aqui será apresentada a metodologia utilizada para dimensionar a proteção dos bancos de capacitores série. O procedimento consiste em encontrar o ajuste ideal para ativação do *Gap* pelo critério de corrente (I_{SETC1} e I_{SETC2}) e depois determinar os critérios de energia para cada MOV (E_{SETC1} e E_{SETC2}). Por fim, determina-se a energia nominal de cada MOV (E_{MOV1} e E_{MOV2}).

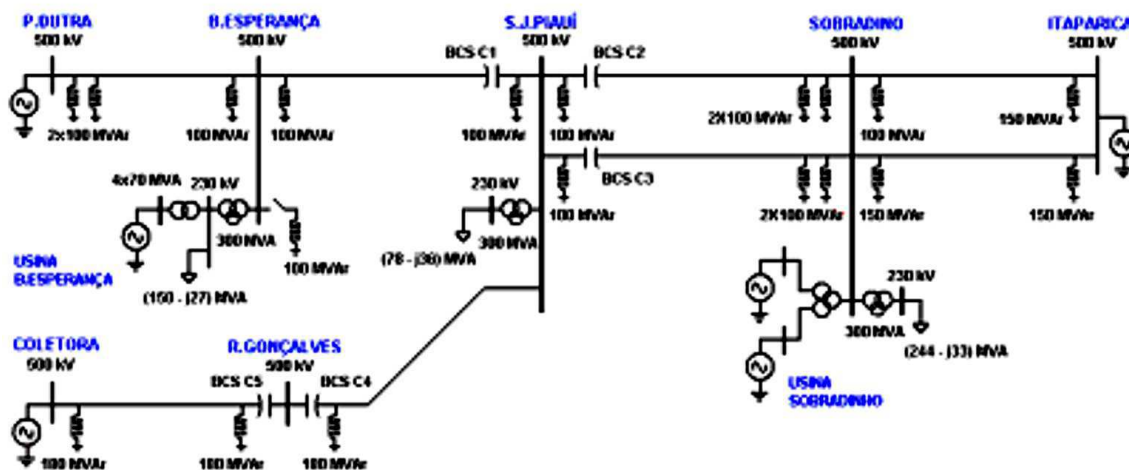
3.1 SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO

Para se obter os resultados buscados, foi utilizado o Sistema Interligado Nacional (SIN) para o horizonte 2022 simulado no *software* ATP. O BCS foi modelado no mesmo ambiente, seguindo os diagramas elétricos e de controle mostrados na Figura 10, onde seu sistema de controle foi modelado na linguagem TACS do ATP. Na Figura 11, é possível ver o diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado nas simulações, mostrando apenas as barras e linhas de 500 kV.



A configuração do SIN utilizado para o último ajuste é mostrada na Figura 12 abaixo:

Figura 12 – Diagrama unifilar do SIN no horizonte 2008



Fonte: (LIMA, 2010).

Comparando as duas configurações, é possível notar a entrada de operação dos seguintes circuitos:

- Circuito duplo entre São João do Piauí e Milagres;
- Adição de uma LT entre São João do Piauí e Ribeiro Gonçalves;
- Acréscimo de um circuito entre Ribeiro Gonçalves e Colinas;
- LT entre São João do Piauí e Gilbués.

3.2 CRITÉRIOS

Para o dimensionamento da proteção do BCS, considera-se os seguintes critérios:

- É permitida a atuação do *Gap* da proteção apenas para ocorrências de faltas internas;
- O MOV de cada instalação deve estar dimensionado para suportar a absorção de energia tanto para faltas internas quanto externas;
- Considera-se o seguinte ciclo de abertura e religamento dos disjuntores de proteção da linha onde estão instalados os BCS:

1. Abertura tripolar dos disjuntores de linha 100 ms após a aplicação da falta;

2. Religamento sem sucesso após 500 ms da abertura dos disjuntores. A manobra de religamento inicia-se próximo a barra onde está instalado o capacitor série;
3. Abertura final tripolar dos disjuntores 100 ms após a tentativa de religamento.

Assim, no processo de dimensionamento, o MOV conduz uma corrente de falta por um período total de 200 ms. Nas faltas aplicadas em barras, o defeito é retirado após 100 ms sem tentativa de religamento automático.

3.3 APLICAÇÃO DAS FALTAS

A energia a ser dissipada pelo MOV depende do tipo de falta a que este seja submetido. Entretanto, as faltas trifásicas à terra mostram-se como a condição de maior severidade para o MOV, uma vez que acarreta em correntes de falta maiores e, assim, uma maior energia a ser dissipada pelo mesmo. Dessa forma, nesse estudo, serão aplicados curtos-circuitos como o citado, utilizando uma impedância de falta como sendo 1 m Ω , afim de que o dimensionamento englobe a condição mais severa possível.

3.4 CÁLCULO DE ENERGIA

O procedimento aqui descrito foi baseado na experiência da CHESF, segundo descrito no trabalho de 2002 desta empresa, citado nas referências.

O cálculo da energia máxima a ser dissipada no MOV passa pela seguinte metodologia:

- Para a condição de faltas externas, são coletados os dados de energia e corrente máxima no MOV, E_{EXT} e I_{EXT} , respectivamente. Esses valores servem para definir os ajustes da proteção utilizando as equações (4) e (5):

$$E_{SET} = E_{EXT} \times 1,05, \quad (4)$$

$$I_{SET} = I_{EXT} \times 1,15, \quad (5)$$

onde E_{SET} é a máxima energia permitida no MOV para uma falta externa [MJ]; E_{EXT} é a energia acumulada no MOV em uma falta externa [MJ]; I_{SET} é corrente máxima esperada pelo MOV para uma falta externa [kA] e I_{EXT} é o pico de corrente no MOV para uma falta externa [kA].

Os fatores multiplicativos de 5% e 15% para energia e corrente, respectivamente, são margens de segurança com que a proteção deve atuar.

- Após o ajuste da proteção utilizando E_{SET} e I_{SET} que foram determinados, é calculada a máxima energia no MOV para uma falta interna. Para isso, considera-se as seguintes situações:
 - Aplicação de uma falta próxima ao BCS em análise, com o *Gap* sendo ativado por corrente;
 - Aplicação de uma falta interna remota, isto é, na linha onde está instalado o BCS em análise, mas distante do mesmo, com o *Gap* sendo ativo por energia.

A intenção de se aplicar uma falta interna remota é que a corrente não seja suficiente para ativar o *by-pass* por este critério, e sim pelo de energia (E_{SET}), de forma a identificar o quanto de energia o MOV irá acumular até que receba a ordem de disparo do *Gap* por superação da energia.

Define-se como energia nominal do MOV a ser dissipado como a maior energia dissipada nas duas situações descritas, acrescidas de uma margem de segurança de 15%.

3.5 AJUSTE DA PROTEÇÃO POR CORRENTE

Utilizando o processo descrito no item anterior, aplicou-se faltas externas para cada um dos BCS. Para tanto, com os *Gaps* desativados, simulou-se uma falta nos terminais do lado da linha do BCS C1 e outra falta nos terminais do lado da linha do BCS C2. Dessa forma, a falta aplicada no BCS C1 é externa ao BCS C2 e vice-versa. Além disso, foram simuladas faltas próximas às barras de Boa Esperança 500 kV, Usina de Sobradinho 500 kV, São João do Piauí 500 kV e no capacitor série localizado no circuito 2 da linha entre São João do Piauí (SJI) e a Usina de Sobradinho (SOB), afim

de aplicar faltas que sejam externas a ambos os bancos em análise. Os valores de máxima corrente encontrados podem ser vistos na Tabela 2:

Tabela 2 – Máximas corrente de curto-circuito nos MOV com *Gap* desativado

Local da Falta	I _{MOV1} (kA pico)	I _{MOV2} (kA pico)
Terminais de BCS C1	33,89	5,60
Terminais de BCS C2	2,55	31,18
Barra SJI	5,09	7,41
Barra BEA	8,31	0,00
Barra USB	0,00	1,45
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	0,24	5,60

Fonte: Próprio autor.

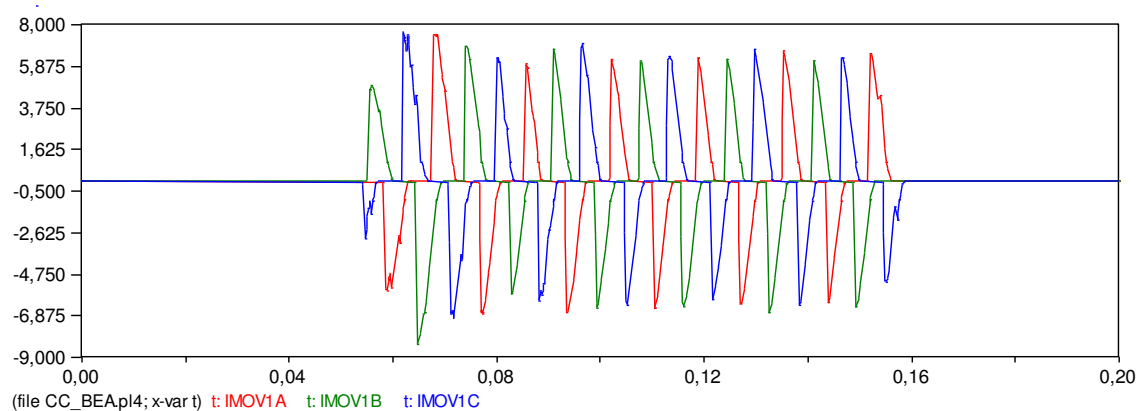
Pelos resultados encontrados pode-se ver que as maiores correntes de falta nos MOVs para faltas externas foram 8,31 kA no MOV C1 e 7,41 kA no MOV C2. Assim, utilizando as equações (4) e (5), tem-se o ajuste inicial dos parâmetros de corrente definidos como:

$$I_{SETC1} = 8,31 \times 1,15 = 9,55 \text{ kA}, \quad (6)$$

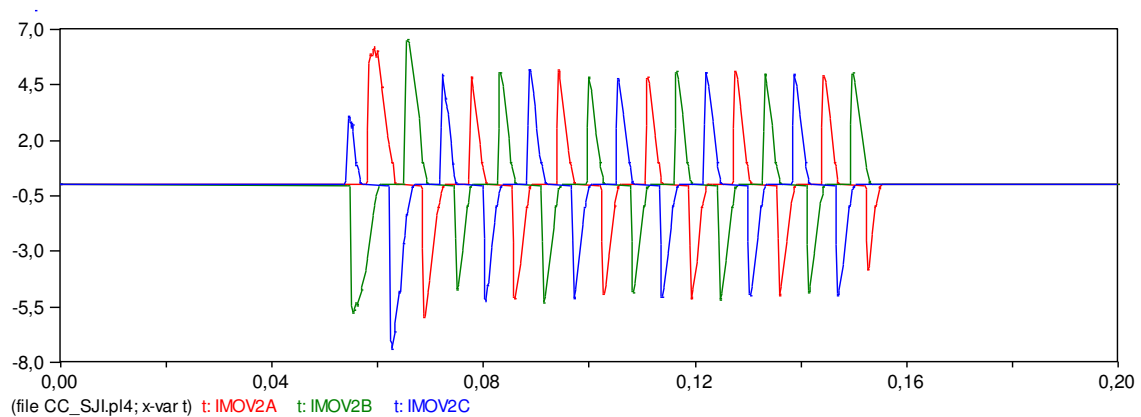
$$I_{SETC2} = 7,41 \times 1,15 = 8,53 \text{ kA}. \quad (7)$$

As correntes desenvolvidas em cada MOV podem ser vistas nas Figuras 13 e 14 abaixo:

Figura 13 – Corrente no MOV C1 – curto-circuito na barra BEA – *by-pass* desativado



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 – Corrente no MOV C2 – curto-circuito na barra SJI – *by-pass* desativado

Fonte: Próprio autor.

Feito esse ajuste inicial, é importante notar que, para uma falta externa, não ocorreria o *by-pass* dos BCS C1 e C2. Porém, para faltas internas, os valores das correntes no MOV superam os valores dos ajustes, ocorrendo, assim, a atuação da proteção. Isso indica uma que a proteção atuaria corretamente, permitindo o *by-pass* dos BCS apenas para faltas internas.

3.5.1 ADEQUAÇÃO DOS AJUSTES

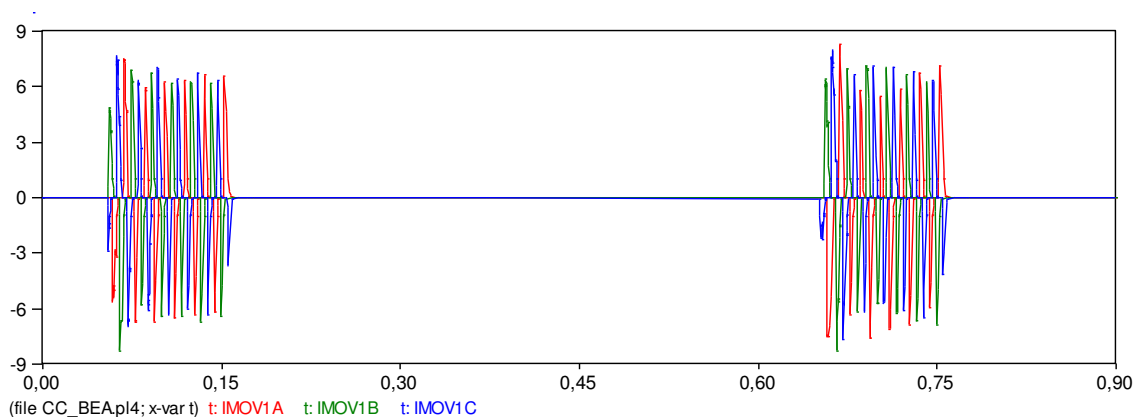
Realizado o *by-pass* do BCS, a configuração do sistema muda, uma vez que esse evento altera a impedância da linha a qual o banco foi retirado de operação pela proteção. Assim, é necessário avaliar o ajuste encontrado no item anterior, considerando agora tanto a ação de *by-pass* quanto o religamento sem sucesso da linha, de forma a identificar se a proteção continua atuando corretamente face essa nova configuração. Para isso, foram simuladas faltas nos mesmos locais do item anterior, porém, considerando agora a atuação da proteção, mas apenas pelo critério da corrente. Os valores de pico de corrente nos MOVs considerando a situação descrita acima encontram-se na Tabela 3:

Tabela 3 – Máximas corrente de curto-circuito nos MOV para adequação do ajuste da proteção

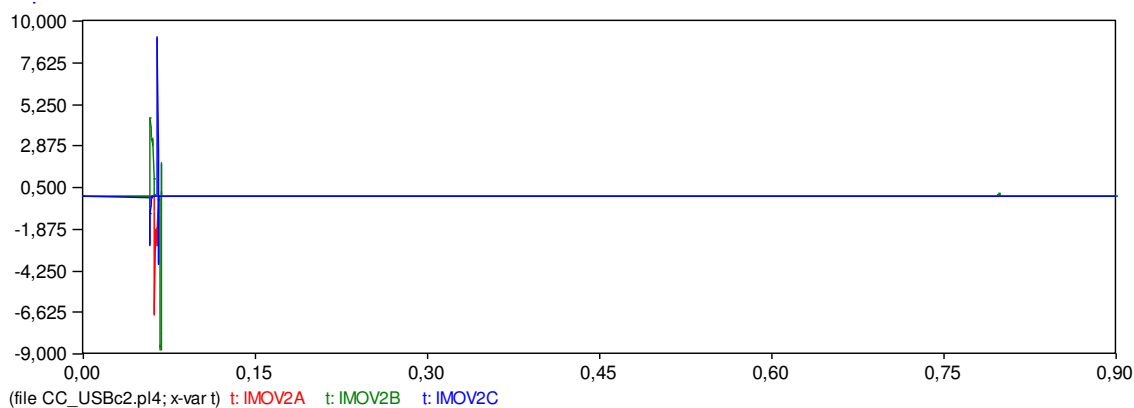
Local da Falta	I_{MOV1} (kA pico)	I_{MOV2} (kA pico)
Terminais de BCS C1	<i>by-pass</i>	7,67
Terminais de BCS C2	6,36	<i>by-pass</i>
Barra SJI	5,09	7,41
Barra BEA	8,31	0,00
Barra USB	0,00	1,45
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	6,34	9,10

Fonte: Próprio autor.

Conforme os resultados, percebe-se que, para uma falta externa, a maior corrente no MOV C1 ocorreu com a falta aplicada em BEA, mas não foi suficiente para superar o ajuste da proteção, isto é, permaneceu abaixo de 9,55 kA. Porém, com a falta aplicada nos terminais do BCS no circuito 2 da LT SJI – SOB, a corrente máxima no MOV C2 superou o ajuste, atingindo 9,10 kA. Os gráficos com as correntes para esse local de falta podem ser vistos na Figura 15 e na Figura 16:

Figura 15 – Corrente no MOV C1 – curto-circuito na barra BEA – *by-pass* ativado apenas por corrente

Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Corrente no MOV C2 – curto-circuito no BCS do circuito 2 da LT SJI-SOB – *by-pass* ativado apenas por corrente

Fonte: Próprio autor.

É importante notar que, para a falta aplicada no BCS do circuito 2 da LT SJI – SOB o valor de corrente no MOV C2 foi maior do que o ajuste estabelecido, logo, ocorreu a atuação da proteção de forma indevida, uma vez que esse é uma situação de falta externa aos BCS C1 e C2, o que descumpr o critério de atuação apenas para falta interna. Com esse novo incremento, os ajustes passam a ser:

$$I_{SETC1} = 9,55 \text{ kA}, \quad (8)$$

$$I_{SETC2} = 9,10 \times 1,15 = 10,47 \text{ kA}. \quad (9)$$

Por fim, utilizando o ajuste encontrado nas equações (8) e (9), foram simuladas faltas para as mesmas condições da Tabela 3, afim de verificar se, após os ajustes, a proteção está atuando corretamente. Os valores de corrente de pico nos MOV resultantes podem ser vistos na Tabela 4:

Tabela 4 – Máximas corrente de curto-circuito nos MOV o novo ajuste da proteção

Local da Falta	I_{MOV1} (kA pico)	I_{MOV2} (kA pico)
Terminais de BCS C1	<i>by-pass</i>	7,67
Terminais de BCS C2	6,17	<i>by-pass</i>
Barra SJI	5,09	7,41
Barra BEA	8,31	0,00
Barra USB	0,00	1,45
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	5,85	9,10

Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados das simulações, obtêm-se que, para faltas externas, todos os valores de corrente foram menores do que os ajustes aplicados. A ordem de *by-pass* só aconteceu para os locais de falta interna. Dessa forma, com os valores de I_{SETC1} e I_{SETC2} utilizados das equações (8) e (9), a proteção comportou-se da forma correta, atendendo os critérios do item 3.2.

3.6 AJUSTE DA PROTEÇÃO POR ENERGIA

O objetivo das simulações é obter as máximas energias acumuladas nos MOV durante uma falta externa. Os valores encontrados servem como parâmetro para determinar se uma falta é interna ou externa.

A Tabela 5 traz as energias acumuladas nos MOV durante as simulações com o ajuste final do critério de corrente, mostrado na Tabela 4.

Tabela 5 – Máximas energias acumuladas nos MOV para ajuste da proteção por energia

Local da Falta	E_{MOV1} (MJ)	E_{MOV2} (MJ)
Terminais de BCS C1	9,07	56,99
Terminais de BCS C2	9,82	13,30
Barra SJI	5,67	29,98
Barra BEA	99,44	0,00
Barra USB	0,00	78,05
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	4,88	30,80

Fonte: Próprio autor.

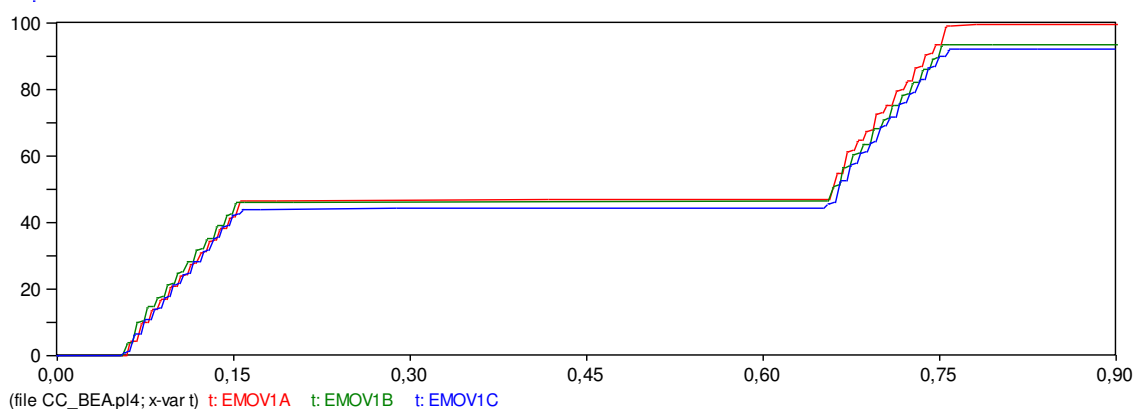
Os resultados mostrados na tabela acima apontam que a maior energia no MOV de C1 foi 99,44 MJ, enquanto que no MOV de C2 foi de 78,05 MJ. Assim, utilizando a equação (4), os ajustes definitivos do critério de energia são calculados como:

$$E_{SETC1} = 99,44 \times 1,05 = 104,41 \text{ MJ} , \quad (10)$$

$$E_{SETC2} = 78,05 \times 1,05 = 81,95 \text{ MJ} . \quad (11)$$

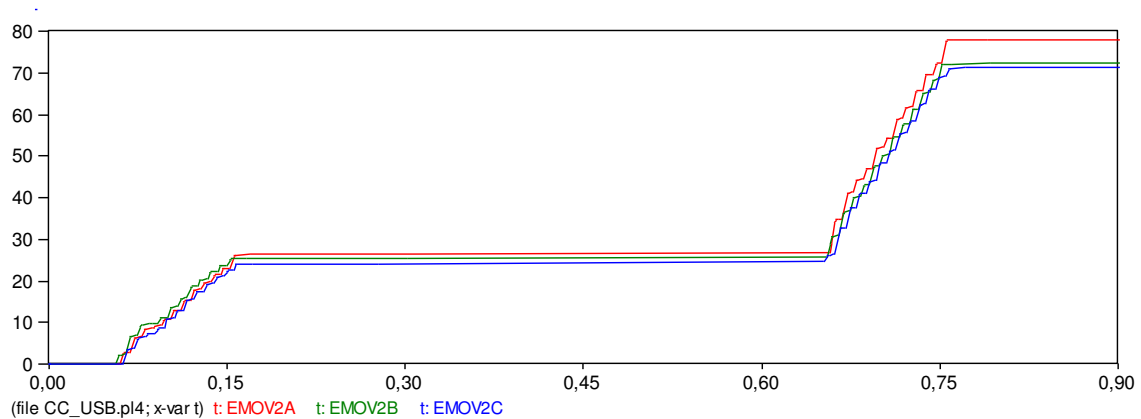
As energias acumuladas podem ser vistas nas Figuras 17 e 18 abaixo:

Figura 17 – Energia acumulada no MOV C1 – curto-circuito próximo à barra BEA – *by-pass* ativado apenas por corrente – utilizando ajuste final de corrente



Fonte: Próprio autor.

Figura 18 – Energia acumulada no MOV C2 – curto-circuito próximo à barra USB – *by-pass* ativado apenas por corrente – utilizando ajuste final de corrente



Fonte: Próprio autor.

3.7 ENERGIA NOMINAL DOS MOV

Utilizando as duas condições descritas no item 3.4 e os valores definitivos de ajuste da proteção, foram simuladas faltas internas nos terminais dos bancos, faltas internas remotas e faltas externas para se analisar o desempenho da proteção utilizando a proteção funcionando plenamente, isto é, com o *Spark Gap* ativo por corrente e energia. Os locais 25% da LT SJI-BEA e 25% da LT SJI-USB circuito 1 são locais de falta que estão em 25% do comprimento da respectiva LT, partindo de São João do Piauí. Já os locais 100 km de BEA e 50 km de BEA, bem como 100 km de USB e 50 km de USB indicam que o defeito foi inserido distante 100 km e 50 km, nesta ordem, da respectiva barra. Os valores de energia em cada MOV de cada BCS podem ser vistos na Tabela 6:

Tabela 6 – Máximas energias acumuladas nos MOV para diferentes locais de falta

Local da Falta	E_{MOV1} (MJ)	E_{MOV2} (MJ)
Terminais de BCS C1	9,07	56,99
25% da LT SJI-BEA	15,35	7,65
100 km de BEA	18,16	1,08
50 km de BEA	82,10	0,00
Terminais de BCS C2	9,82	13,30
25% da LT SJI-USB circ1	0,00	20,20
100 km de USB circ1	0,00	83,60
50 km de USB	0,00	83,18
Barra BEA	99,44	0,00
Barra SJI	5,67	29,98
Barra USB	0,00	78,05
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	4,88	30,80

Fonte: Próprio autor.

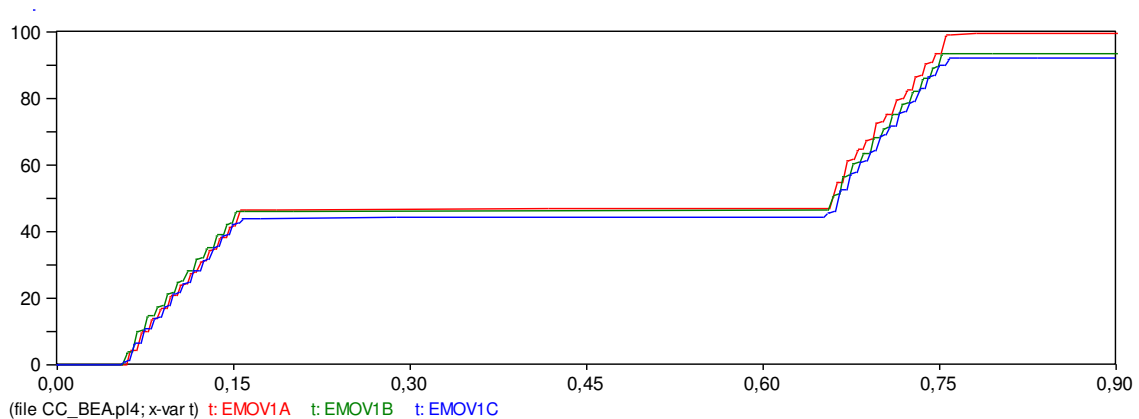
Os maiores valores de energia são 99,44 MJ e 83,60 MJ para E_{MOV1} e E_{MOV2} , respectivamente. Esses valores são os maiores montantes de energia acumulados para os locais de falta citados. Assim, seguindo o item 3.4, as energias nominais dos MOV ficam definidas pelas equações (12) e (13):

$$E_{MOV1} = 99,44 \times 1,15 = 114,36 \text{ MJ} , \quad (12)$$

$$E_{MOV2} = 83,60 \times 1,15 = 96,14 \text{ MJ} . \quad (13)$$

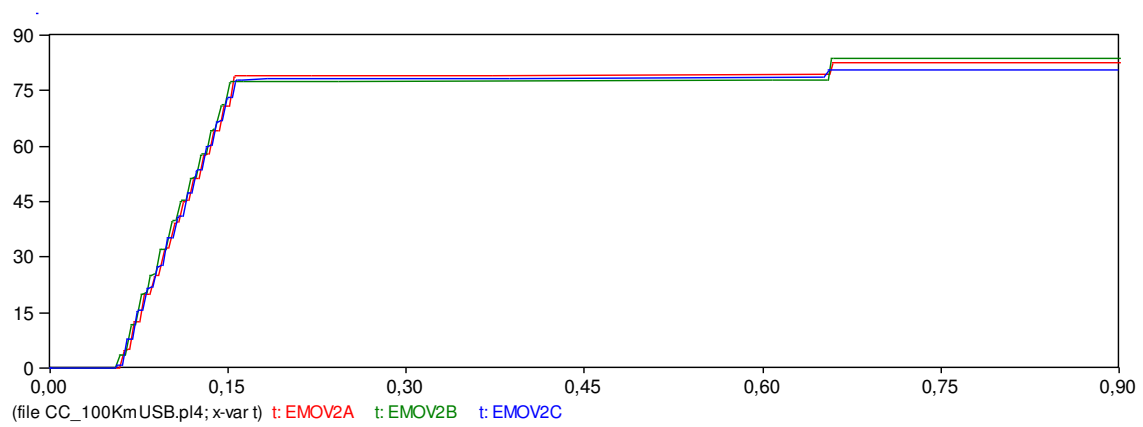
Os gráficos que justificam as energias nominais podem ser vistos na Figura 19 e na Figura 20 :

Figura 19 – Energia acumulada no MOV C1 – curto-circuito localizado a 50 km da barra BEA – *by-pass* ativado por corrente ou energia



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Energia acumulada no MOV C2 – curto-circuito localizado a 100 km da barra USB – *by-pass* ativado por corrente ou energia



Fonte: Próprio autor.

4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO APÓS OS AJUSTES

Os valores finais da proteção ficam determinados segundo mostrado na Tabela 7:

Tabela 7 – Resumo dos ajustes finais da proteção

Ajuste	BCS C1	BCS C2
I_{SET} (kA pico)	9,55	10,47
E_{SET} (MJ)	104,41	81,95

Fonte: Próprio autor.

De forma complementar à Tabela 6, é apresentada a Tabela 8 que contém não apenas as energias máximas acumuladas, como também as correntes de pico nos MOV para cada BCS em diferentes locais de falta utilizando os parâmetros finais de ajuste da proteção.

Tabela 8 – Correntes de pico e energias acumuladas nos MOV com ajuste final da proteção

Local da Falta	I_{MOV1} (kA pico)	I_{MOV2} (kA pico)	E_{MOV1} (MJ)	E_{MOV2} (MJ)
Terminais de BCS C1	15,42	7,67	9,07	56,99
25% da LT SJI-BEA	15,03	4,91	15,35	7,65
100 km de BEA	12,46	1,72	18,16	1,08
50 km de BEA	9,96	0,00	82,10	0,00
Terminais de BCS C2	6,17	21,53	9,82	13,30
25% da LT SJI-USB circ1	0,00	15,74	0,00	20,20
100 km de USB circ1	0,00	10,36	0,00	83,60
50 km de USB	0,00	10,17	0,00	83,18
Barra BEA	8,31	0,00	99,44	0,00
Barra SJI	5,09	7,41	5,67	29,98
Barra USB	0,00	8,61	0,00	78,05
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	5,85	9,10	4,88	30,80

Fonte: Próprio autor.

Analisando esses resultados, é possível notar que, para as faltas internas ao BCS C1, isto é, terminais de BCS C1, 25% da LT SJI-BEA, a 100 km de BEA e a 50 km de BEA, o *by-pass* aconteceu por corrente em todas as situações. Já para as faltas internas ao BCS C2, isto é, terminais de BCS C2, 25% da LT SJI-USB circuito 1, a 100 km de

USB circuito 1 e a 50 km de USB circuito 1, o disparo do *by-pass* foi permitido por corrente nas duas primeiras posições de falta, e por energia nas duas últimas. Entretanto, para as faltas externas tanto para BCS C1 e BCS C2, isto é, barras BEA, SJI e USB e nos terminais do BCS na LT SJI-SOB circuito 2, o *by-pass* não aconteceu por corrente nem energia.

Portanto, é possível ver que a proteção atuou apenas para os locais de falta interna, seja por corrente ou por energia. Esse comportamento atende aos critérios estabelecidos no item 3.2.

4.1 COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PROTEÇÃO E ENERGIA NOMINAL

Os parâmetros de ajuste da proteção que estão atualmente em operação bem como os valores definidos nesse estudo podem ser vistos na Tabela 9:

Tabela 9 – Comparação de parâmetros de ajuste da proteção

Ajuste	I_{SET1} (kA pico)	I_{SETC2} (kA pico)	E_{SETC1} (MJ)	E_{SETC2} (MJ)
Atual	7,00	10,80	60,48	62,40
Novo	9,55	10,47	104,41	81,95

Fonte: Próprio autor.

Já os as energias máximas acumuladas pelos MOV para faltas internas próximas aos BCS e faltas internas remotas determinadas foram 30,70 MJ e 68,10 MJ, para BCS C1 e BCS C2, respectivamente (LIMA, 2010).

Comparando os valores aqui determinados e os atuais, pode-se notar que o valor de I_{SETC1} foi superado, enquanto que I_{SETC2} permaneceu bastante próximo ao valor atual, sinalizando o aumento dos níveis de curto-circuito da região, como previsto. E_{SETC1} e E_{SETC2} , por sua vez, também foram superados. Esse resultado indica que o ajuste da proteção para a energia foi mais afetado pela entrada dos novos circuitos, uma vez que, o nível das correntes de curto-circuito mantendo-se parecido com encontrado no último dimensionamento, o acréscimo no ajuste da proteção por energia cobre os efeitos dessa variação, deixando o sistema seguro.

Por fim, comparando as energias que os MOV devem suportar para as diferentes situações de falta, vê-se que E_{MOV1} teve um incremento considerável, de 35,31 MJ para 114,36 MJ, mais do que o triplo do valor anterior, sendo necessária a substituição do mesmo. Enquanto que E_{MOV2} foi um também maior, porém em menor escala, de 78,32 MJ para 83,60 MJ. Ambos valores considerando a margem de 15% aplicada para a determinação da energia nominal, segundo descrito no item 3.4.

4.2 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHOS DA PROTEÇÃO

Dado que o objetivo deste trabalho passa por atualizar os parâmetros de ativação do *by-pass* para o sistema instalado, é feita a análise do desempenho da proteção utilizando os valores hoje implementados inseridos no sistema do horizonte de 2022. Ou seja, deseja-se saber se o ajuste hoje instalado atuaria corretamente para o sistema no horizonte citado e se os MOVs possuem capacidade de absorver as novas energias ou não nesta nova configuração do sistema.

Abaixo é apresentada a Tabela 10, onde são mostrados os níveis de corrente de curto-circuito e energia acumulada nos MOVs para os mesmos locais da Tabela 8. Porém, o ajuste da proteção está colocado segundo o ajuste atual da Tabela 9.

Tabela 10 – Correntes de pico e energias acumuladas nos MOV com ajuste atualmente instalado

Local da Falta	I_{MOV1} (kA pico)	I_{MOV2} (kA pico)	E_{MOV1} (MJ)	E_{MOV2} (MJ)
Terminais de BCS C1	12,00	7,21	7,32	57,68
25% da LT SJI-BEA	11,05	4,29	7,89	5,67
100 km de BEA	12,46	1,87	11,01	1,20
50 km de BEA	10,63	0,04	14,62	0,10
Terminais de BCS C2	5,99	21,53	9,84	14,21
25% da LT SJI-USB circ1	0,00	15,74	0,00	20,23
100 km de USB circ1	0,00	10,36	0,00	65,21
50 km de USB	0,00	10,17	0,00	63,76
Barra BEA	9,00	0,00	6,31	0,00
Barra SJI	5,09	7,41	5,67	29,98
Barra USB	0,00	1,45	0,00	0,74
Terminais do BCS na LT SJI-SOB circ2	5,85	9,10	4,88	30,80

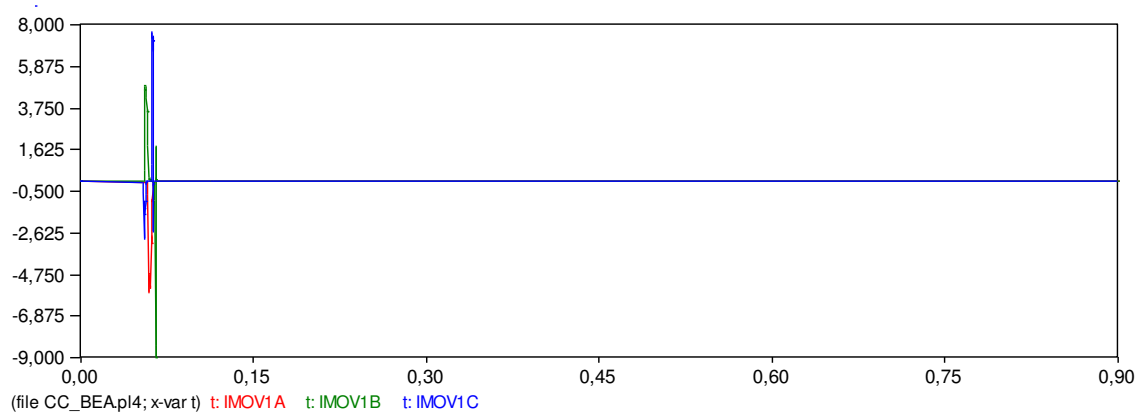
Fonte: Próprio autor.

Pode-se perceber que, para os locais de falta internas ao BCS C1, o *by-pass* foi ativado pelo critério de corrente nas quatro situações.

Já para as faltas internas a BCS C2, é possível identificar que a proteção atuou pelo critério de corrente nos dois primeiros locais e por energia nos dois últimos.

Para o curto-circuito simulado na barra de Boa Esperança 500 kV vê-se que a corrente I_{MOV1C} superou o ajuste I_{SETC1} de 7 kA. Essa situação está destacada em vermelho na Tabela 10. Essa é uma situação de atuação incorreta da proteção, pois a falta é externa ao BCS C1. Este transitório pode ser visto na Figura 21:

Figura 21 – Corrente no MOV C1 – curto-circuito na barra BEA – ajuste atual da proteção



Fonte: Próprio autor.

Esse comparativo mostra que, se os parâmetros da proteção não forem atualizados esta poderá atuar de forma incorreta, o que torna o ajuste não confiável.

5 CONCLUSÃO

O estudo aqui desenvolvido possibilitou a atualização do ajuste da proteção dos BCS para uma correta atuação no sistema elétrico do horizonte de 2022. Além disso, os valores das energias nominais dos MOV de cada BCS foram determinados para que estes não corram risco de serem avariados para as condições mais severas de falta.

O parâmetro I_{SETC1} foi superado e I_{SETC2} permaneceu praticamente o mesmo, ambos face aos valores hoje implementados. Isto é coerente, dada a motivação do trabalho, que sinaliza o aumento dos níveis de curto-circuito desde o último ajuste da proteção.

E_{SETC1} e E_{SETC2} , por sua vez, sofreram aumentos consideráveis, evidenciando a necessidade do ajuste para que a proteção continue a atender os critérios estabelecidos. Além disso, analisando o novo ajuste da proteção por corrente, vê-se que o ajuste da proteção por energia foi mais afetado, sendo ele o que garante a proteção do sistema apesar dos novos circuitos que entraram em operação.

As energias nominais encontradas para cada MOV, E_{MOV1} e E_{MOV2} , acompanham a variação do ajuste de energia, tendo em vista que o primeiro valor, assim como E_{SETC1} , teve o maior aumento em relação ao parâmetro atual, e o segundo teve uma variação menor, de forma análoga a E_{SETC2} .

Feita a comparação do desempenho da proteção para as duas condições de ajuste da proteção, verificou-se que, para o sistema do horizonte de 2022, o ajuste atual torna-se inválido, tendo em vista que acarretou em atuações incorretas, segundo foi evidenciado na Tabela 10. Além disso, as energias nominais do MOV C1 e do MOV C2 encontradas foram maiores do que valor atual, com destaque para E_{SETC2} que teve um valor final mais que 3 vezes maior que o valor atual. Essa condição alerta que, se os equipamentos não forem adequados, podem vir a sofrer avarias permanentes caso sejam submetidos a um curto-circuito muito severo.

O uso do ATP para simular as faltas se mostrou como um recurso fundamental para esse estudo, pois permitiu obter todos os dados numéricos e gráficos necessários para seguir a metodologia descrita. A modelagem do SIN para o horizonte de 2022 bem como dos BCS e o sistema de controle na linguagem TACS permitiu avaliar o desempenho da proteção para diferentes condições de falta e parâmetros da proteção.

Dado que o SIN está em constante expansão, é necessário que o processo aqui descrito seja executado periodicamente, de forma a manter o sistema de proteção desses BCS sempre com a atuação correta e os MOV preparados para as condições de falta mais severas.

REFERÊNCIAS

- ALSTOM. (2011). *Manual de Treinamento Banco de Capacitores Série*. Rev: 00/11 - MM.
- ANDERSON, P. M., & FARMER, R. G. (1996). *Series Compensator of Power Systems*. Califórnia, USA: PBLSH!
- BATISTA, S. L. (2017). *Sistema de Monitoramento Remoto de Para-Raios de Óxido de Zinco Baseado na Medição de Corrente de Fuga Total*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Brasil; Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. (2013). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. Brasília: MME/EPE.
- BRITO, A. L. (2012). *Análise de Ocorrência em Linha Compensada de 500 kV*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- CHESF. (2002). *SE SÃO JOÃO DO PIAUÍ - Análise de dimensionamento da proteção dos bancos de capacitores série*. RE - 06-05-10/2002.
- CHESF. (2004). *Modelo de bancos de capacitores série para estudos de transitórios eletromagnéticos*. RT-004.04.03/2004.
- CONCEIÇÃO, J. B. (2015). *Análise de Transitórios em Linhas de Transmissão com Compensação Série*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- IEC. (2004). *Series capacitors for power systems*. IEC.
- JESUS, N. C., ORTIZ, A. L., NETO, J. A., OLIVEIRA, H. R., FIGUEIREDO, C. E., LÍBANO, F. B., & BRAGA, R. A. (17 a 20 de Agosto de 2003). Considerações Sobre Aplicação de Compensação Série em Sistemas de Distribuição Visando Melhorias na Qualidade de Energia. *V SBSE*, p. 6.
- LIMA, M. C. (10 a 20 de Maio de 2010). Considerações de Projeto e Benefícios Introduzidos Por Bancos de Capacitores Série em Sistemas de Transmissão em Alta Tensão. *III SBSE*, p. 6.
- MILLER, T. J. (1994). *Systems, Reactive Power Control in Electric*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- OLIVEIRA, A. L. (2007). *Avaliação do Comportamento da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série Fixa através de Simulação Digital em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

APÊNDICE A – DADOS TÉCNICOS DO SIN NO

HORIZONTE 2022

Tabela A. 1 – Linhas de transmissão 500 kV - parâmetros elétricos

Linha de Transmissão	Sequencia positiva			Sequencia zero			Comp. (Km)
	R ₁ (Ω/Km)	X ₁ (Ω/Km)	Y ₁ (μΩ/Km)	R ₀ (Ω/Km)	X ₀ (Ω/Km)	Y ₀ (μΩ/Km)	
LT B. Esperança – S. J. Piauí	0,025	0,322	5,120	0,376	1,411	3,064	233,8
LT S. J. Piauí – Sobradinho C1	0,025	0,322	5,124	0,376	1,411	3,092	211,0
LT S. J. Piauí – Sobradinho C2	0,025	0,322	5,124	0,376	1,411	3,092	211,0
LT S. J. Piauí – Milagres II C1	0,019	0,268	6,159	0,357	1,503	2,730	388,0
LT S. J. Piauí – Milagres II C2	0,019	0,268	6,159	0,357	1,503	2,730	388,0
LT Milagres II – L. Gonzaga C1	0,024	0,282	5,895	0,242	0,858	3,421	229,2
LT Milagres II – L. Gonzaga C2	0,024	0,282	5,895	0,242	0,858	3,421	229,2
LT Fortaleza II – Quixadá	0,026	0,282	5,877	0,223	0,900	3,410	140,0
LT Quixadá – Milagres	0,025	0,282	5,881	0,242	0,872	3,448	268,7
LT Camaçari II – Sapeçu	0,026	0,318	5,185	0,368	1,371	3,205	104,5
LT Camaçari IV – Sapeçu	0,026	0,318	5,185	0,368	1,371	3,205	104,5
LT Jardim – Camaçari IV	0,024	0,322	5,128	0,301	1,303	3,039	248,9
LT Olindina – Camaçari II C1	0,033	0,316	5,201	0,256	0,886	3,173	147,2
LT Olindina – Camaçari II C2	0,025	0,320	5,137	0,242	0,956	2,934	146,9
LT P. Afonso IV – Olindina	0,025	0,320	5,115	0,265	0,993	2,724	212,8
LT L. Gonzaga – Olindina	0,032	0,317	5,177	0,256	0,894	3,021	248,5
LT Xingó – Jardim	0,024	0,311	5,321	0,267	1,349	3,059	159,7
LT Xingó – Messias	0,025	0,322	5,078	0,320	1,298	2,718	219,0
LT P. Afonso IV – Xingó	0,025	0,321	5,085	0,194	0,871	2,779	53,0
LT Messias – SUAPE II	0,025	0,315	5,212	0,208	1,041	2,924	175,3
LT Recife II – SUAPE II C1	0,025	0,315	5,212	0,208	1,041	2,924	42,5
LT Recife II – SUAPE II C1	0,025	0,315	5,212	0,208	1,041	2,924	42,5
LT P. Afonso IV – Angelim II	0,025	0,320	5,118	0,322	0,935	2,788	221,0
LT Angelim II – Pau Ferro	0,033	0,317	5,203	0,400	0,992	3,084	245,0
LT Pau Ferro – Recife II	0,033	0,317	5,203	0,400	0,992	3,084	105,0
LT Angelim II – Recife II	0,025	0,319	5,126	0,338	0,940	2,784	170,0
LT P. Afonso IV – L. Gonzaga C1	0,025	0,322	5,087	0,219	1,031	2,775	36,5
LT P. Afonso IV – L. Gonzaga C2	0,025	0,322	5,087	0,219	1,031	2,775	36,5
LT L. Gonzaga – Garanhuns II	0,032	0,317	5,200	0,333	0,862	3,136	223,0
LT L. Gonzaga – Garanhuns	0,017	0,268	6,325	0,325	1,335	3,647	223,0
LT Garanhuns – Angelim II	0,032	0,317	5,200	0,333	0,862	3,136	12,7
LT Garanhuns – Pau Ferro	0,017	0,268	6,235	0,352	1,335	3,647	235,0
LT Sobradinho – Juazeiro III	0,024	0,322	5,088	0,322	1,353	2,782	42,0
LT L. Gonzaga – Sobradinho	0,024	0,322	5,087	0,324	1,358	2,781	319,0
LT Milagres II – Açú III	0,017	0,269	6,202	0,225	0,944	3,592	330,0
LT Xingó – Angelim II	0,026	0,319	5,210	0,362	1,394	3,389	192,0
LT Garanhuns – C. Grande III	0,017	0,269	6,203	0,225	0,944	3,592	199,0

LT C. Grande III – Ceará Mirim C1	0,017	0,269	6,203	0,225	0,944	3,592	201,0
LT C. Grande III – Ceará Mirim C2	0,017	0,269	6,203	0,225	0,944	3,592	201,0
LT Gilbués – S. J. Piauí	0,015	0,220	7,551	0,372	1,161	3,102	394,0
LT R. Gonçalves – S. J. Piauí C1	0,019	0,267	6,124	0,493	1,339	2,890	353,0
LT R. Gonçalves – S. J. Piauí C2	0,019	0,267	6,124	0,493	1,339	2,890	353,0

Tabela A. 2 – Curva VxI dos MOV

BCS C1 LT BEA-SJI		BCS C2 LT SJI-SOB Circ1	
I	V	I	V
(Apico)	(kVpico)	(Apico)	(kVpico)
0,1	209,38	0,1	189,19
0,5	221,87	0,5	204,96
1,0	231,25	1,0	214,41
10,0	238,75	10,0	223,87
50,0	243,75	50,0	227,66
100,0	248,75	100,0	233,33
1000,0	259,37	1000,0	242,79
10000,0	276,87	10000,0	258,56
100000,0	309,37	100000,0	286,94

Tabela A. 3 – Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores de linha

Linha de Transmissão	Subestação	V _{base} (kV)	Potência (MVA)	X ₀ /X ₁
LT S. J. Piauí – Gilbués II	S. J. Piauí	500	270	-
LT S. J. Piauí – Sobradinho C1	S. J. Piauí	500	100	1,67
LT S. J. Piauí – Sobradinho C2	S. J. Piauí	500	100	1,67
LT S. J. Piauí – R. Gonçalves C1	S. J. Piauí	500	180	-
LT S. J. Piauí – R. Gonçalves C2	S. J. Piauí	500	180	-
LT S. J. Piauí – B. Esperança	S. J. Piauí	500	180	1,70
LT Sobradinho – S. J. Piauí C1	Sobradinho	500	200	1,66
LT Sobradinho – S. J. Piauí C2	Sobradinho	500	200	1,66
LT Sobradinho – L. Gonzaga C1	Sobradinho	500	150	1,66
LT Sobradinho – L. Gonzaga C2	Sobradinho	500	100	1,66
LT L. Gonzaga – Milagres II C1	L. Gonzaga	500	120	-
LT L. Gonzaga – Milagres II C2	L. Gonzaga	500	120	-
LT L. Gonzaga – Sobradinho C1	L. Gonzaga	500	150	1,63
LT L. Gonzaga – Sobradinho C2	L. Gonzaga	500	150	1,68
LT Milagres – Quixadá	Milagres	500	150	-
LT Milagres – L. Gonzaga C1	Milagres	500	100	-
LT Milagres II – Açú III	Milagres II	500	155	1,68
LT Milagres II – L. Gonzaga C1	Milagres II	500	100	-
LT R. Gonçalves – S. J. Piauí C1	R. Gonçalves	500	180	-
LT R. Gonçalves – S. J. Piauí C2	R. Gonçalves	500	180	-
LT Gilbués II – S. J. Piauí	Gilbués II	500	270	-
LT B. Esperança – S. J. Piauí	B. Esperança	500	100	1,73
LT Quixadá – Milagres	Quixadá	500	300	-
LT Milagres – Quixadá	Milagres	500	300	-
LT Quixadá – Fortaleza II	Fortaleza II	500	150	-

Tabela A. 4 – Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores de barra

Subestação	V_{base} (kV)	Potência (MVA)	X_0/X_1
S. J. Piauí	500	280	1,00
Milagres	230	20	1,00
Milagres	500	100	1,00
Milagres II	500	100	1,00
R. Gonçalves	500	720	1,00
Gilbués II	500	400	1,00
B. Esperança	500	100	1,00