



EVANDRO MARCOS VACILOTO FILHO

**METODOLOGIAS PARA MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS NO
SISTEMA DE PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES DE MÉDIA
E ALTA TENSÃO**

ITAJUBÁ – MG

2020

EVANDRO MARCOS VACIOTO FILHO

**METODOLOGIAS PARA MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS NO SISTEMA DE
PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva
Orientador

Prof. Dr. Robson Bauwelz Gonzatti
Coorientador

**ITAJUBÁ - MG
2020**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por guiar meus caminhos e possibilitar a conclusão desta etapa de relevante importância em minha vida.

A minha família por me apoiar durante os momentos de dificuldades e estar sempre ao meu lado. Minha mãe Roselias Rabelo, meu pai Evandro Vaciloto (*in memoriam*) e meu irmão Efraim que sempre me incentivaram a continuar em busca dos meus sonhos.

Ao Professor Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva por aceitar mais este desafio, compartilhando seu conhecimento e sabedoria nas diversas prateleiras da biblioteca do saber.

Ao Professor Dr. Robson Bauwelz Gonzatti pela contribuição ímpar no desenvolvimento deste trabalho, sempre com disposição e humildade disseminando seus conhecimentos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Diversas são as topologias de proteção para banco de capacitores, como estrela simples, dupla estrela e ponte H. A queima de elementos capacitivos resulta na atuação da proteção, devido as alterações nas tensões e correntes de desequilíbrio previamente ajustadas no relé. No entanto, não apenas falhas internas podem resultar na sensibilização da proteção, interferências externas ao sistema ocasionam variações da impedância entre as fases do equipamento, resultando na falsa operação do sistema protetivo.

A capacitância das unidades capacitivas é uma característica intrínseca da geometria dos elementos que compõem o capacitor, mas apresenta variações devido a temperatura ambiente. Portanto, grandes bancos de capacitores quando expostos a sombreamentos heterogêneos apresentam variações significativas de capacitância e conseqüentemente variações relevantes nas tensões e correntes de desequilíbrio. O fenômeno do sombreamento pode ser observado principalmente nos *Static Var Compensation* (SVC) e *Fixed Series Compensators* (FSC), basicamente devido ao tamanho das colunas de capacitores que favorece o sombreamento parcial das unidades capacitivas.

Nesta dissertação são apresentados diversos aspectos sobre balanceamento de bancos de capacitores, bem como esclarecimentos sobre interferência dos fatores externos na detecção de falhas das unidades capacitivas. O simples posicionamento geográfico do banco de capacitores pode resultar em distúrbios operativos constantes e conseqüentemente elevado custo financeiro devido a indisponibilidade, deslocamento e mobilização de equipes e reparos desnecessários. Sendo assim, os resultados obtidos com este trabalho auxiliarão na detecção de interferências no sistema de proteção de bancos de capacitores, bem como alternativas para reduzir a influência externa no sistema de proteção e analisar os principais fatores de impactos no desequilíbrio natural dos bancos de capacitores, aumentando a confiabilidade e operacionalidade dos equipamentos de compensação reativa capacitiva.

Palavras-chave: Banco de capacitores; unidades capacitivas; corrente de desequilíbrio; balanceamento; proteção; interferência ambiental.

ABSTRACT

There are many types of protection for capacitor banks, like simple star, double star and H bridge. Burning of capacitive elements results in actuation of protection, due to variations in unbalance voltage and unbalance current previously set in the relay. But not only internal failures can cause sensibilization of protection, external system interferences cause variation of impedance between phases of equipment, resulting in false operation of protection system.

Capacitance of capacitor units is a characteristic intrinsically linked to geometry of elements that composes the capacitor, but it varies with ambient temperature. Therefore, large capacitor banks when exposed to non-uniform shading present variation of capacitance and, as consequence, variations in unbalance voltage and unbalance current. The phenomenon of non-uniform shading can be observed mainly in Static Var Compensation (SVC) and Fixed Series Compensators (FSC), basically because of the size of its capacitor columns that favors partial shading of capacitor units.

This study presents several aspects of balancing of capacitor banks, as well as clarifications about interference of external factors in the detection of failures of capacitor units. The simple geographical position of the capacitor bank can result in constant operational disturbances and, as consequence, increase of financial cost linked to unavailability, team displacement/mobilization and unnecessary repairs. Therefore, the results obtained in this study will help detecting interferences in the protection system of the capacitor bank, as well as alternatives to reduce external influence in the protection system. It will also analyze the principal factors impacting in the natural unbalance if the capacitor bank, increasing equipment reliability and operability of the equipment of reactive power compensation.

Key-words: Capacitor bank; capacitor unit; unbalance current; balancing; protection; environment interference.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	1
2.1 Estrutura do trabalho.....	6
Capítulo 2 – Capacitor.....	8
2.1 Filme de polipropileno.....	16
2.2 Óleo Isolante	18
2.3 Folha de Alumínio	20
2.4 Fator de Espaçamento (SF).....	22
2.5 Verificação Experimental	24
Capítulo 3 – Banco de Capacitores e Balanceamento	28
3.1 Unidade Capacitiva com Fusível Externo (FE).....	28
3.2 Unidade Capacitiva sem fusível - <i>Fuseless</i> (FL).....	32
3.3 Unidade Capacitiva com Fusível Interno (FI)	33
3.4 Configuração dos bancos de capacitores	36
A. Dupla Estrela.....	36
B. Ponte H.....	42
3.5 Balanceamento de bancos de capacitores	45
3.6 Metodologia para Análise de Balanceamento - MAB.....	50
Capítulo 4 – Insolação heterogênea.....	56
Avaliação da disposição física do equipamento	60
Inserção da variável temperatura na curva de proteção	60
Proteção programada com alterações horárias.....	61
Conclusão	63
Referências	64

Capítulo 1 – Introdução

O aumento do consumo de energia elétrica no Brasil tem gerado desafios cada vez mais complexos para suprir a demanda de energia com qualidade. Visando atender os requisitos de qualidade de energia, o rigor da fiscalização torna-se cada vez mais intensificado através dos órgãos competentes, como Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Estes órgãos reguladores têm por objetivo garantir a operação adequada do Sistema Interligado Nacional (SIN), mostrado na Figura 1, assim como fiscalizar a correta aplicação dos requisitos normativos, técnicos e operacionais aplicando as devidas penalizações.

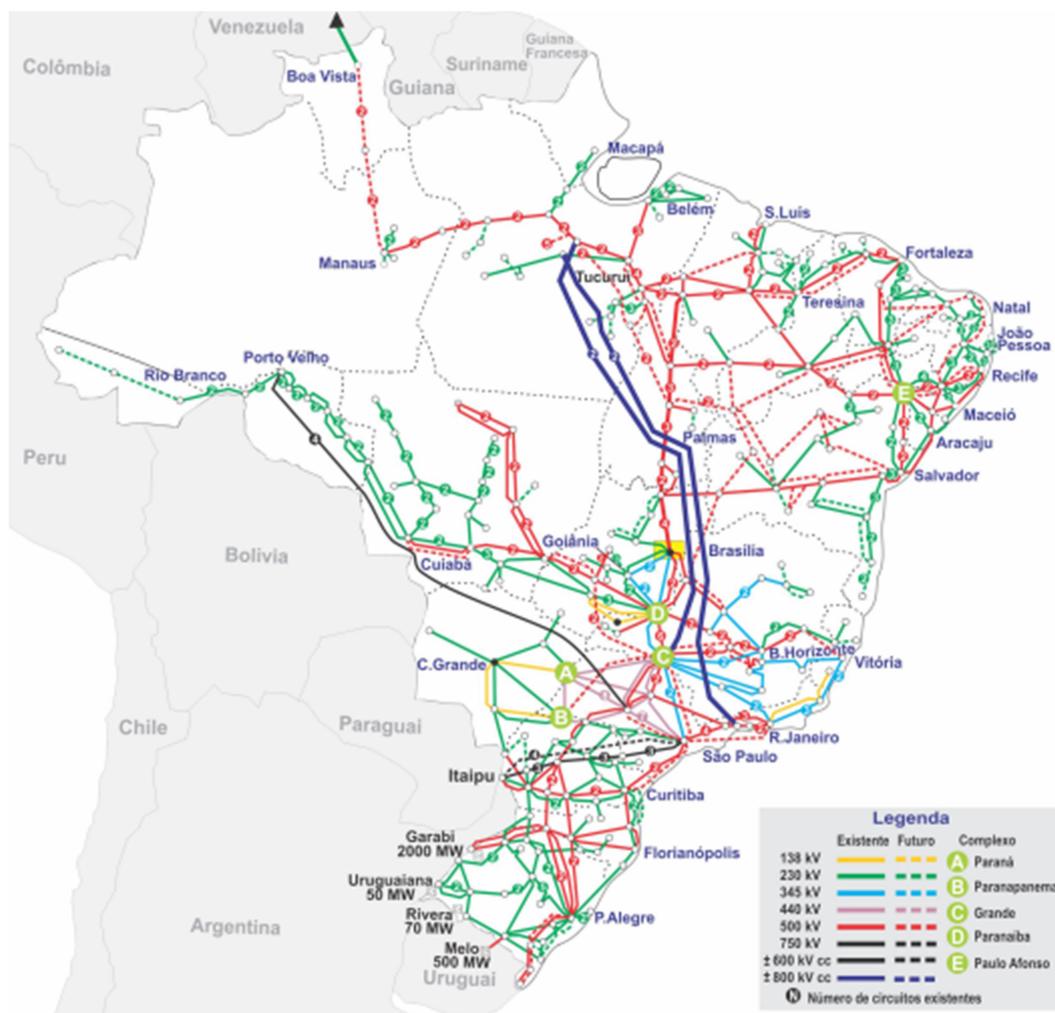


Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (Fonte: Site ONS)

Conforme mostrado na Figura 1, o sistema elétrico nacional apresenta proporção continental com grandes linhas de transmissão responsáveis pela transferência da energia gerada nos mais diversos cantos do país. A geração hidrelétrica é a principal matriz elétrica brasileira, no entanto, as maiores usinas geradoras de energia estão geograficamente afastadas

dos principais centros consumidores [1]. Portanto, uma transmissão eficiente e confiável se torna fator obrigatório neste sistema complexo e interligado, e os bancos de capacitores (BC) desempenham papel importante para garantir estas características.

A utilização de banco de capacitores pode proporcionar muitos benefícios para o sistema elétrico, com reflexos positivos na qualidade e no custo da energia elétrica disponibilizada aos consumidores. A utilização da compensação capacitiva pode resultar em grande economia, possibilitando a postergação de investimentos estruturais na rede, como construção de novas linhas de transmissão e subestações, resultando na otimização do sistema existente [2].

Alguns dos benefícios proporcionados pela utilização de banco de capacitores serão listados a seguir, podendo este ser aplicado no sistema de transmissão e distribuição de energia e sistemas industriais:

- Controle de tensão;
- Correção do fator de potência;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Redução das perdas;
- Filtragem de harmônicos, quando utilizados com reatores devidamente sintonizados (Filtros passivos).

Outra importante utilização do equipamento em discussão neste trabalho é a compensação série, muito utilizada em linhas de transmissão com grande extensão e de importância sistêmica elevada para o despacho de potência. Devido a relevante função desempenhada no sistema de potência, a indisponibilidade destes equipamentos pode resultar em grande perda, tanto em desempenho da rede quanto em valores monetários, uma vez que a ausência de compensação reativa pode gerar graves problemas de despacho de potência e controle de tensão das barras do SIN [3].

Os bancos de capacitores são equipamentos formados pelo agrupamento série e paralelo de unidades capacitivas (UC) com dados nominais muito inferiores aos valores do sistema no qual serão empregadas, que ao serem conectadas em conjunto resultam na potência e tensão do barramento, conforme ilustrado na Figura 2. A disposição das células capacitivas deve ser realizada de forma ordenada, visando sempre garantir a correta distribuição das capacitâncias e permitindo a correta operação durante todo o tempo de trabalho, evitando a sobrecarga contínua e conseqüentemente a redução da vida útil do equipamento.

As unidades capacitivas utilizadas na composição dos BCs são compostas por elementos capacitivos (EC) conectados em série e paralelo, assim demonstrado na Figura 2. Existem três tipos de tecnologias para a proteção das UCs, sendo elas: Fusível interno, fusível externo e fuseless [5].

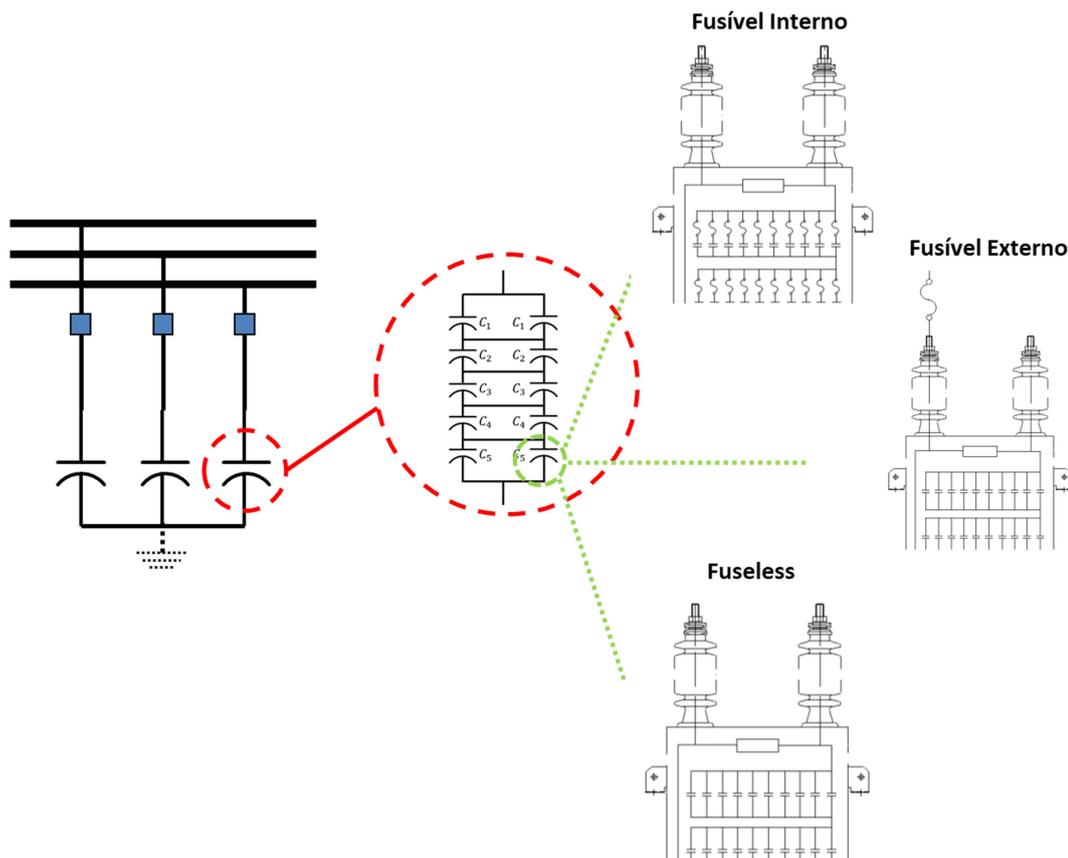


Figura 2 - Composição do banco de capacitores

Diversos são os tipos de conexões e metodologias de proteção utilizadas nos bancos de capacitores, objetivando a maior confiabilidade e previsibilidade no funcionamento. Como exemplo, podem ser citadas as configurações estrela simples, dupla estrela e ponte H, podendo ser aterradas ou isoladas [4], conforme apresentado na Figura 3. Os tipos de ligação mencionados visam monitorar o desequilíbrio de capacitância entre as unidades capacitivas que compõe os BC.

O sistema de proteção dos bancos de capacitores tem como principal função monitorar o desequilíbrio de capacitância das unidades capacitivas que compõem a solução de compensação reativa capacitiva, assim como equilibrar os diversos ramos paralelos de capacitores, garantindo assim que, em regime permanente, todas as UCs estarão submetidas a correntes e tensões semelhantes, não havendo sobrecarga pontual devido ao desequilíbrio natural do BC. Assim como nos BCs, alguns fabricantes se preocupam com o balanceamento dos elementos capacitivos que irão compor uma unidade capacitiva, os motivos são os mesmos já mencionados anteriormente, ou seja, garantir maior confiabilidade e robustez ao equipamento.

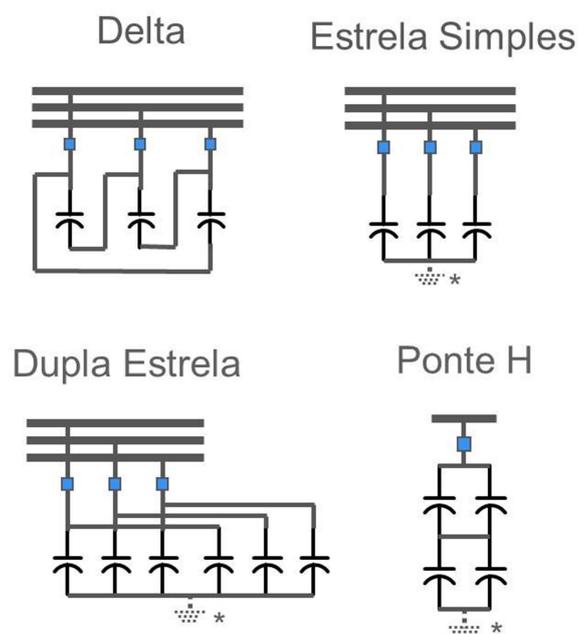


Figura 3 - Tipos de ligação dos bancos de capacitores

Assim como Elmo [6], muitos são os artigos que estudam os bancos de capacitores e as diversas topologias de proteção utilizadas, no entanto o tema balanceamento de banco de capacitores e de unidades capacitivas são temas secundários e com pouca discussão, ficando restrito ao conhecimento dos fabricantes. A correta determinação do posicionamento das unidades capacitivas resulta em ganhos consideráveis na vida útil do BC, conforme já mencionado anteriormente, as UC estarão expostas de maneira homogênea as tensões e correntes. No entanto, o balanceamento mal dimensionado resultará em falha precoce e problema crônico, ocasionando falhas na proteção e redução da vida útil das UC que compõe a solução de compensação reativa.

Toda proteção de desequilíbrio de um BC consiste na comparação de impedâncias entre os diversos ramos série e paralelo. Conforme já mencionado, o balanceamento das impedâncias das unidades capacitivas que compõem a solução deve ser realizado previamente para garantir uma correta distribuição de correntes e tensões. No entanto, qualquer impedância parasita no circuito resulta em interferência no valor visualizado pelo sistema de proteção, sendo as impedâncias parasitas: Cabos com diferentes comprimentos entre um ramo paralelo e outro, resistência de contato dos conectores, torque de aperto dos terminais das unidades capacitivas e comprimento de barramentos. Na prática, o valor da corrente de desequilíbrio natural calculada dificilmente é a mesma obtida em campo, devido as interferências mencionadas anteriormente.

Neste trabalho, será apresentado uma metodologia de ensaio que permite ao usuário avaliar o real valor da corrente de desequilíbrio do banco de capacitores sem a necessidade de energizar o equipamento. Desta forma, ajustes no posicionamento das unidades capacitivas podem ser realizados previamente, garantindo que o equipamento quando energizado

apresente valores mínimos de corrente de desequilíbrio, conseqüentemente condição operativa real equilibrada e nas condições nominais conforme projetado.

Outros problemas relacionados com as filosofias de proteções para banco de capacitores podem resultar em falhas na operação, resultando em gastos elevados para realizar a reparação em períodos não programados. Neste trabalho serão discutidos pontos operativos inadequado das filosofias de proteção mais utilizadas para banco de capacitores, todos impactando no balanceamento das impedâncias devido a fatores externos e condições de operação que resultam na alteração da corrente de desequilíbrio, mascarando a real situação das UCs.

Considerando que toda a proteção é realizada avaliando a variação de impedância da unidade capacitiva, não se pode ignorar o fato de que todo capacitor tem o seu valor de capacitância alterado devido a temperatura do dielétrico [7]. Desta forma, a temperatura ambiente, incidência solar, cor da lata do capacitor e o sombreamento são fatores externos que tem ação direta na variação de impedância. A capacitância varia diretamente com a temperatura do dielétrico e toda fonte de calor externa resulta no aquecimento do líquido isolante, ocasionando variações dielétricas e impactando nos materiais que compõe a unidade capacitiva.

Na literatura, documentos que relacionam os tipos de ligação e formas de proteção são facilmente encontrados, no entanto artigos e documentos técnicos que discutem o balanceamento de banco de capacitores e os fatores que interferem na corrente de desequilíbrio são escassos. O equipamento, banco de capacitores, normalmente já é fornecido com o mapa de capacitâncias previamente definido pelo fabricante não tendo a preocupação por parte do usuário sobre a metodologia utilizada para o cálculo do mesmo, tão pouco os fatores que podem interferir neste balanceamento.

Conforme Elmo [6], a proteção de banco de capacitores pode ser realizada de diversas maneiras, tendo cada uma seus pontos positivos e negativos, mas todas têm como principal fundamento o desequilíbrio das capacitâncias da fase. Segundo o autor, existem condições operativas que podem resultar em falhas catastróficas, como por exemplo, o fenômeno da compensação de desequilíbrio e desbalanços secundários. Neste trabalho serão analisadas condições operativas que impactam no correto funcionamento da proteção dos BCs, como por exemplo, a compensação do desequilíbrio devido a queima simétrica de elementos capacitivos e a influência do sombreamento heterogêneo nos bancos de capacitores.

Assim como Elmo, Roy Molex [8] menciona em seu trabalho, de forma superficial, que a capacitância final produzida é diferente do valor nominal calculado, devido ao processo produtivo, influenciando muito no momento do balanceamento do equipamento, assim como a alteração devido a temperatura ambiente e incidência solar no valor da corrente de desequilíbrio. Conforme apresentado pelo autor, a variação de temperatura resulta em alterações físicas nos materiais que compõe o interior das unidades capacitivas, resultando em variações nas capacitâncias. Outro tema relevante abordado está relacionado com a sensibilidade da proteção através da utilização de transformadores de corrente ou

transformadores de tensão nas configurações dupla estrela e ponte H, comparando a sensibilidade e funcionamento de ambas as filosofias protetivas.

No trabalho de Smith [9] é apresentado sistema de proteção para banco de capacitores com tecnologia fuseless e configuração estrela aterrada. Assim como os diversos trabalhos encontrados a análise da proteção considera apenas os efeitos de queima de elementos sem maiores detalhes quanto a influência do sol nas correntes e tensões de desequilíbrio.

A variação do balanceamento intrínseco ao BC em operação apresenta impactos relevantes na parametrização dos relés, assim como na atuação correta do sistema de proteção considerando os valores pré-ajustados no comissionamento, conforme estudado por Horton [10].

Conforme apresentado, os trabalhos analisados demonstram a importância do balanceamento para o correto funcionamento da proteção dos bancos de capacitores, assim como a grande relevância no entendimento dos fenômenos que podem interferir no desequilíbrio dos BCs. Todos os estudos citados, assim como o objetivo deste trabalho, é evitar possíveis atuações errôneas da proteção, interferindo na confiabilidade, disponibilidade, vida útil e receita do empreendimento.

Finalmente, durante o levantamento na literatura sobre artigos técnicos referentes a proteção de banco de capacitores, o problema das influências externas no balanceamento e a compensação da corrente de desequilíbrio não são evidenciados. Sendo assim, o presente trabalho tem como resultados, analisar e verificar as possíveis soluções para os temas identificados:

- a) Garantir o balanceamento ideal para o banco de capacitores;
- b) Identificação do fenômeno de compensação da corrente de desequilíbrio, assim como a solução deste efeito muito prejudicial à “saúde” das células capacitivas;
- c) Identificação dos “falsos” desbalanços, provocados devido a interferência externa;
- d) Solução dos problemas de “falso” desbalanceamento, quando identificado.

2.1 Estrutura do trabalho

O trabalho aqui apresentado é formatado em 5 capítulos, sendo eles:

Capítulo 1 – Introdução

Descrição sobre a utilização dos bancos de capacitores no sistema elétrico de potência, assim como sua importância para a operação e estabilidade do Sistema Interligado Nacional. Também explica rapidamente a composição dos BCs, assim como as tecnologias de proteção existente.

Capítulo 2 – Capacitor

Devido à grande importância do tema, este capítulo é dedicado ao entendimento da unidade capacitiva e da capacitância, bem como suas variações. Quais parâmetros produtivos têm influência direta no valor da capacitância da unidade capacitiva produzida. Outro ponto interessante desta etapa do trabalho é a explicação sobre a influência da temperatura nos componentes internos e o impacto na alteração da capacitância.

Capítulo 3 – Banco de Capacitores e balanceamento

Detalhamento sobre a composição dos BCs, demonstrando o princípio de funcionamento dos principais tipos de ligação no tocante da proteção, assim como maior explanação sobre os tipos de proteção das unidades capacitivas e seus impactos no funcionamento da solução de compensação reativa. Neste capítulo é possível entender a importância do balanceamento e as possíveis influências no sistema de proteção.

Capítulo 4 – Insolação heterogênea

Sendo o tema principal, o sombreamento heterogêneo é analisado de forma completa e objetiva, assim como apresentando soluções para minimizar os impactos deste fenômeno sobre o balanceamento de grandes bancos de capacitores.

Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros

Finalmente são apresentadas as conclusões obtidas com os estudos realizados nesta dissertação, os ganhos alcançados e temas para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Capacitor

Um banco de capacitores nada mais é que a combinação de diversos elementos capacitivos que estão agrupados em unidades capacitivas. Elemento capacitivo é formado por dois eletrodos isolados por material dielétrico, sendo os eletrodos folhas de alumínio com micrometros de espessura cortados a laser e margem dobrada. Isso reduz os níveis de descargas parciais devido a concentração de campo elétrico na região do corte.

O material dielétrico historicamente era composto apenas por papel, até os anos 60, quando as unidades apresentavam potência na ordem de 100 kvar. Com o avanço tecnológico iniciou-se a utilização de filmes de polipropileno e os capacitores passaram a ser construídos com dielétrico misto, papel e filme, com potência na ordem de 250kvar. Nos anos 80 iniciaram a fabricação de capacitores *all-film*, possibilitando atingir potências na ordem de 1000 kvar dentro de uma única lata, graças a alta permissividade e rigidez dielétrica, assim como o baixo fator de perda [11].

Como forma de exemplificar a evolução tecnológica ocorrida com o material isolante, a Figura 4 demonstra a composição do isolamento interno das unidades capacitivas com o decorrer dos anos.

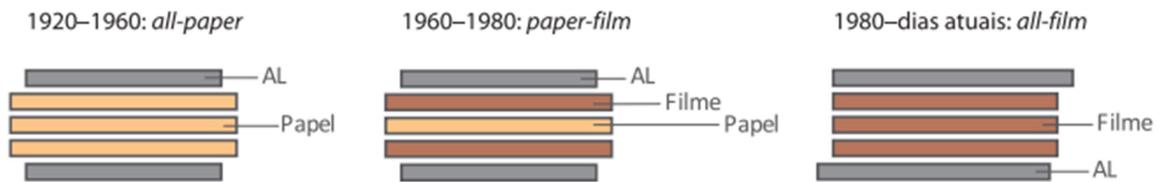


Figura 4 - Material dielétrico dos elementos capacitivos [11]

Uma unidade capacitiva de potência é composta por diversos componentes internos, como elementos capacitivos interligados em grupos série e paralelo, isolados por camadas de papel e enclausurados dentro da caixa de aço, conforme mostrado na Figura 5.

Os resistores de descarga são projetados para reduzir a tensão residual permitindo o chaveamento dos bancos de capacitores após a abertura do disjuntor, assim como garantir a dissipação da energia interna dos elementos capacitivos. Existem diferentes configurações de resistências de descarga, como exemplo IEC 60871 tem como valor padrão 75 V em no máximo 10 minutos, já a NBR 5282 tem como valor padrão 50 V em no máximo 5 minutos.

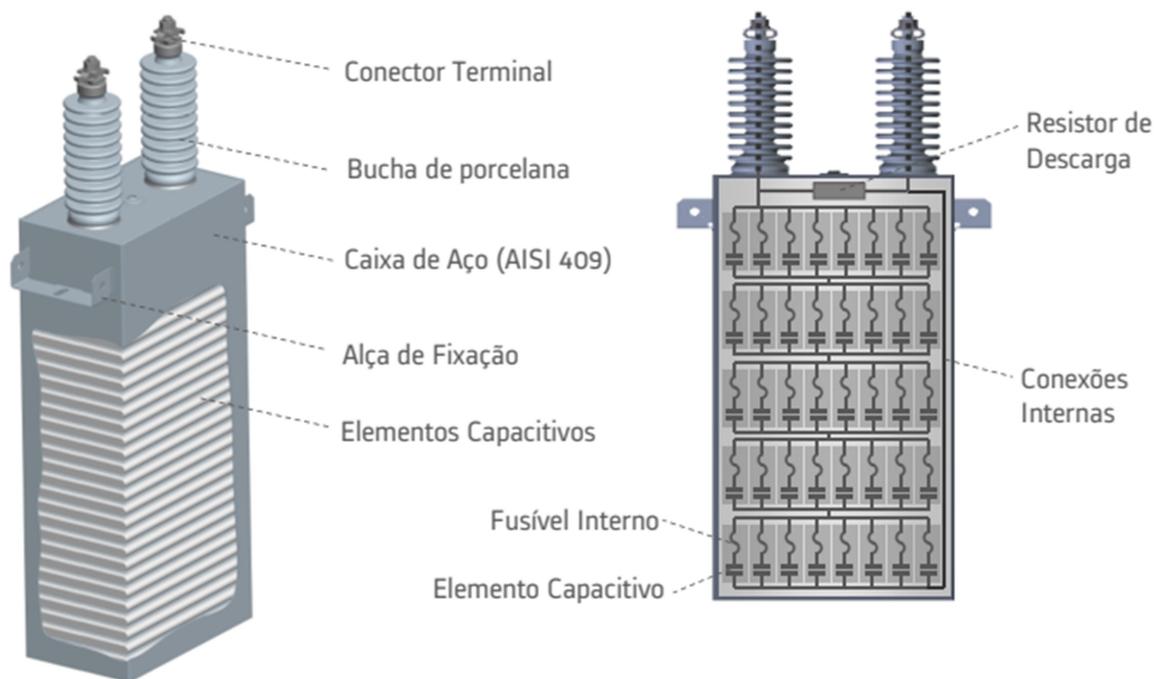


Figura 5 - Unidade capacitiva [11]

O processo produtivo das unidades capacitivas apresenta diversos fatores que interfere na capacitância nominal do equipamento em produção, sendo que ao final da linha produtiva existem desvios de capacitâncias previsto no projeto e que deve ser levado em consideração durante a montagem dos bancos de capacitores. Resumidamente, o processo produtivo é composto pelas seguintes etapas:

- Preparação da matéria prima:

Separação de todo o material utilizado na fabricação da unidade capacitiva, assim como a climatização do filme isolante de polipropileno, garantindo assim as condições favoráveis para a bobinagem dos elementos capacitivos. Nesta etapa a escolha do lote dos rolos de filme de polipropileno e alumínio é muito importante, possibilitando uma bobinagem equilibrada e conseqüentemente elementos mais homogêneos.

A escolha inapropriada da matéria prima, nesta etapa, pode resultar em elementos não uniformes e conseqüentemente um distanciamento irregular entre as placas de alumínio, resultando na variação excessiva da capacitância final da peça.

- Bobinagem dos elementos capacitivos:

Esta etapa refere-se à produção dos elementos capacitivos, apresentado na Figura 6, que serão conectados em série e paralelo para composição da capacitância total da unidade capacitiva. Nesta etapa do processo é muito importante o total controle da bobinagem, pois alterações na velocidade, tensão de bobinagem e comprimento do filme resultará em alterações na capacitância dos elementos e conseqüentemente variação na capacitância da unidade capacitiva. Uma das variáveis de interesse de grande importância na obtenção da capacitância tem total relação com esta fase do processo produtivo, a distância entre as placas condutoras apresentada em (1).

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (1)$$

Onde:

ε_0 : Permissividade do vácuo (8.86x10-12 F/m)

ε_r : Permissividade relativa do meio isolante

A : Área da placa condutora (Eletrodo)

d : Distância entre as placas condutoras (Eletrodo)

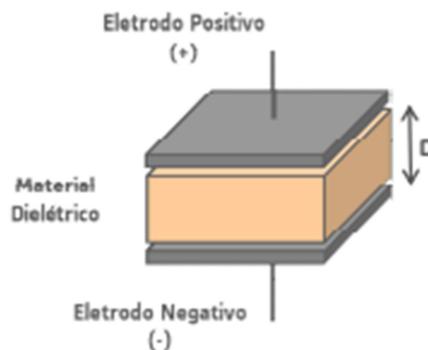


Figura 6 - Elemento capacitivo [11]

Conforme demonstrado, o espaçamento refere-se ao percentual de espaço livre entre os eletrodos do elemento capacitivo, que posteriormente será preenchido por óleo isolante na fase de impregnação e tratamento.

- Empilhamento e isolamento:

Montagem e empilhamento dos elementos juntamente com a conexão série e paralelo. Posteriormente realiza-se o isolamento do pacote e a correta compactação. Assim como na etapa anterior, esta fase do processo é muito importante para garantir o correto fator de espaçamento, uma vez que a correta compactação resulta nas distâncias adequadas entre os eletrodos, assim com a distância entre os filmes de polipropileno e as folhas de alumínio.

- Enlatamento:

Após o isolamento do pacote inicia-se o processo de enlatamento, inserção dos elementos capacitivos dentro da lata e soldagem da tampa. Nesta etapa do processo pode ocorrer variação da capacitância, uma vez que é exercida uma pressão para que todo o pacote seja acondicionado dentro da caixa. Normalmente a capacitância nesta etapa do processo é aproximadamente 15% menor que a capacitância projetada, uma vez que o óleo isolante ainda não está inserido na peça.

- Impregnação e Tratamento:

As unidades capacitivas são submetidas a ciclos de vácuo e aquecimento, objetivando a retirada de umidade de dentro das caixas dos capacitores. Após diversas horas de tratamento inicia-se o processo de enchimento e impregnação. O óleo isolante ocupará todos os espaços, inclusive os espaços entre os filmes de polipropileno e folha de alumínio (Fator de espaçamento), assim como impregna todos os materiais como papel, filme de polipropileno e folha de alumínio. Nesta etapa produtiva o impacto na capacitância pode ocorrer quando o processo não atinge a temperatura ideal, ou o vácuo não é plenamente atingido, resultando na permanência de umidade no interior da caixa e influenciando na quantidade de óleo absorvido pelos materiais durante a impregnação. Problemas na impregnação resultam na alteração das perdas dielétricas e conseqüentemente alterações na permissividade equivalente do meio isolante.

- Acabamento:

Finalmente, após todos os processos já mencionados é realizado o acabamento, como jateamento, estanqueidade para verificação da existência de possíveis vazamentos e pintura.

Sendo assim, o processo produtivo apresenta diversas etapas que interferem diretamente na capacitância nominal da unidade fabricada, sem mencionar o impacto da matéria prima, por exemplo, variações na espessura dos filmes e folhas de alumínio, permissividade do óleo. Segundo as normas que norteiam a produção de unidades capacitivas,

existem faixas de variação de capacitância que devem ser garantidas segundo a aplicação, conforme Figura 7.

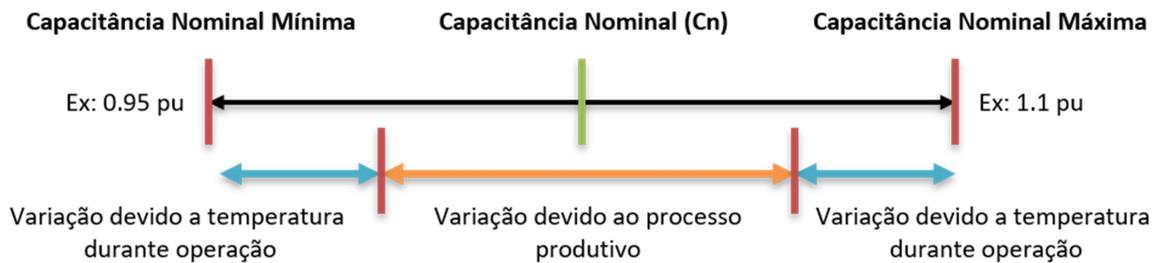


Figura 7 - Tolerância de capacitâncias

Ao final do processo produtivo, as unidades capacitivas são ensaiadas e os valores de capacitância nominal são obtidos. Devido aos diversos pontos já mencionados, o resultado de um determinado lote apresenta unidades capacitivas com valores de capacitâncias diversos. Exemplo desta aleatoriedade pode ser observado na Tabela 1, referente a um lote real de produção.

Tabela 1 - Variação de capacitância fabricada

Capacitância Nominal	26.75	[uF]
Capacitância Mínima	25.41	[uF]
Capacitância Máxima	29.43	[uF]

Capacitor	Capacitância [uF]	Variação [%]
Capacitor 1	27.18	1.6%
Capacitor 2	27.05	1.1%
Capacitor 3	26.63	-0.4%
Capacitor 4	26.98	0.9%
Capacitor 5	27.04	1.1%
Capacitor 6	27.14	1.5%
Capacitor 7	27.08	1.2%
Capacitor 8	27.21	1.7%
Capacitor 9	26.52	-0.9%
Capacitor 10	27.12	1.4%
Capacitor 11	26.40	-1.3%
Capacitor 12	27.40	2.4%

A aleatoriedade, dentro das faixas limites de desvio de capacitâncias das UCs produzidas, resulta na necessidade da realização do balanceamento dos BCs para garantir o equilíbrio das impedâncias e conseqüentemente reduzir o desequilíbrio natural, tornar homogêneo as correntes e tensões nos capacitores conectados em série e paralelo.

Células capacitivas conectadas em série de forma desequilibrada resultam em distribuição de tensão não uniforme, conforme demonstrado na Figura 8. Sobretensões em regime permanente em capacitores resultam na redução da vida útil devido a stress elétrico elevado, ocasionando a degradação dos materiais isolantes.

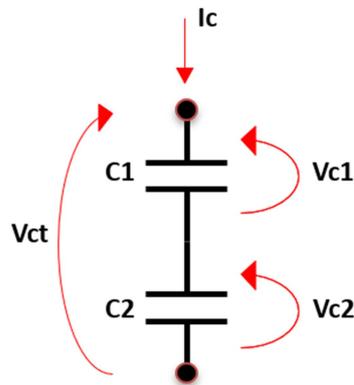


Figura 8 - Tensões em unidades série

Na conexão série mostrada na Figura 8, quando a capacitância C1 é superior à capacitância C2, a distribuição de tensão ficará não uniforme. O aumento da capacitância resulta na redução da impedância capacitiva e conseqüentemente no aumento da queda de tensão nos demais elementos em série, conforme apresentado em (2) e (3).

$$\downarrow X_{gs} = \frac{1}{\omega \cdot C} \uparrow \quad (2)$$

$$\uparrow V_s = X_c \cdot \uparrow I_{gs} \quad (3)$$

Onde:

X_c : Impedância do capacitor [Ω]

X_{gs} : Impedância do grupo série [Ω]

ω : Frequência angular [Hz]

C : Capacitância [F]

V_s : Queda de tensão no capacitor em série [V]

I_{gs} : Corrente do grupo série [A]

Células capacitivas conectadas em paralelo, Figura 9, sofrem impactos diretos na distribuição da corrente devido ao desbalanço de impedâncias. A sobrecorrente resulta na maior dissipação de calor e aumento da temperatura interna da unidade de forma inversamente proporcional a variação de capacitância, conforme (4). O resultado da elevação das perdas do equipamento, além de gerar dissipação de energia e conseqüentemente perdas financeiras, ocasiona a degradação do material isolante e aumento da pressão interna da UC.

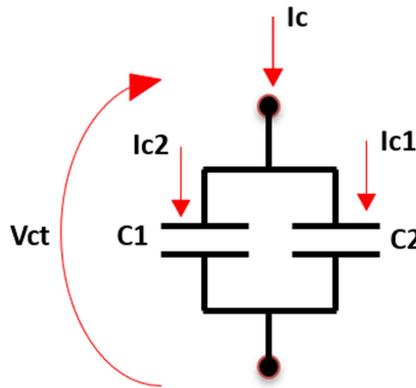


Figura 9 - Correntes em unidades paralelo

$$\uparrow I_{c1} = \frac{V_c}{\downarrow X_{c1}} \quad (4)$$

Nos casos explicitados anteriormente, desequilíbrio série e paralelo, resultam na degradação dos materiais que compõe o equipamento. Partes fundamentais do isolamento elétrico interno das unidades são afetadas negativamente. Conforme mencionado por Sarjeant [12], a sobretensão em unidades capacitivas resulta na redução da vida útil do equipamento, assim mostrados na Figura 10.

Os elementos capacitivos submetidos a maiores sobretensões ou surtos transitórios, conseqüentemente, estarão expostos a um maior stress dielétrico resultando em uma degradação precoce. Conforme IEEE Std. 18 e IEEE Std. 1036, as unidades capacitivas devem ser dimensionadas não somente pela tensão de operação, mas também pela quantidade de ciclos transitórios de tensão pelos quais o equipamento estará exposto em sua vida operativa [13] [14]. Toda análise é baseada, justamente, na sensibilidade deste equipamento frente a variações de tensão.

Sendo a sobretensão e sobrecorrente um fator relevante e impactado pela variação de capacitância durante o processo produtivo, conforme já exposto anteriormente, tem-se assim a importância do correto balanceamento do banco de capacitores. No capítulo 3 deste trabalho, será apresentado com detalhe a metodologia proposta para identificação e correção do

balanceamento, assim como as interferências da distribuição inadequada de capacitâncias no sistema de proteção.

Assim como a sobretensão, a operação em temperaturas elevadas, fora dos limites especificados, também resulta em degradação no dielétrico. Segundo Sarjeant [12], elevações de temperatura entre 20° e 40° não são significantes para a redução da vida útil do capacitor. Diferentemente de elevações entre 40° e 65°, onde experimentos mostraram redução da vida útil em 2 vezes para cada incremento de 8°C. Com temperaturas superiores a 65°C inicia-se um novo modo de falha, onde a vida útil decresce rapidamente, conforme Figura 11.

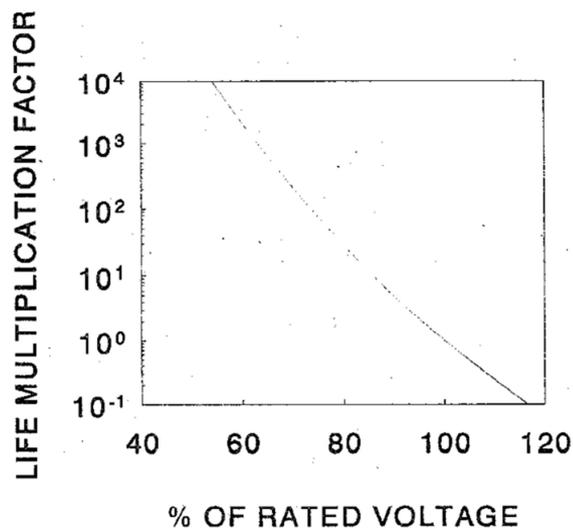


Figura 10 – Influência da sobretensão na vida útil das unidades capacitivas [12]

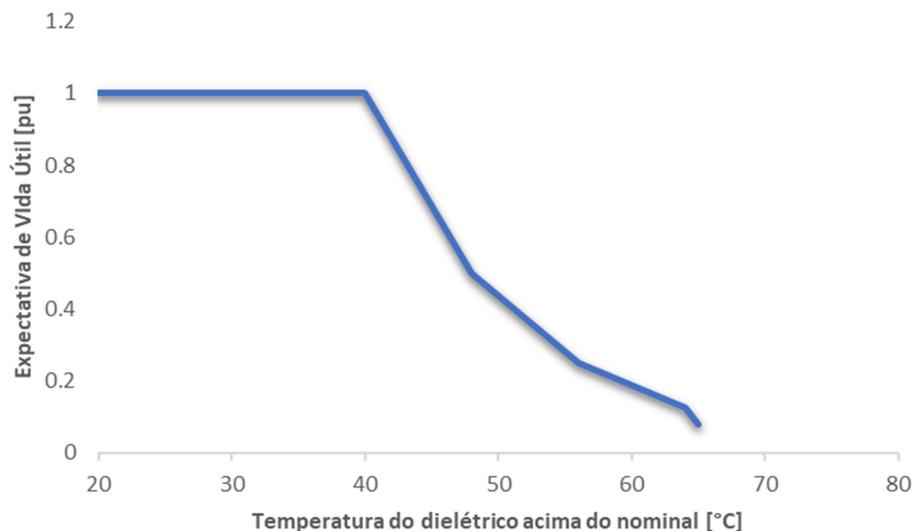


Figura 11 - Expectativa de vida útil

O efeito da temperatura do dielétrico pode ocasionar perda da vida útil quando os valores operativos ultrapassam os limites nominais do equipamento. Quando a temperatura de operação está dentro dos valores nominais, a unidade capacitiva pode operar normalmente, conforme explicado anteriormente. No entanto, qualquer variação de temperatura do dielétrico resulta em variações na capacitância da UC.

A variação de capacitância, devido a variações de temperatura, é um fenômeno de grande relevância. Principalmente devido as filosofias de proteção comumente utilizadas no mercado atualmente, onde a principal variável de monitoramento indireto é a capacitância. Sendo assim, entender o fenômeno e seus possíveis impactos na proteção, resulta no aprimoramento das filosofias protetivas, consequentemente na maior confiabilidade do sistema de compensação reativa.

Conforme já discutido anteriormente, as UCs são formadas pela combinação série e paralelo de elementos capacitivos. Por sua vez, os elementos capacitivos são formados basicamente por 3 materiais: Filme de polipropileno, folha de alumínio e óleo isolante. Desta forma, a temperatura tem efeitos diretos nestes materiais, ocasionando a alteração da capacitância resultante. A seguir será apresentada uma análise detalhada de cada material.

2.1 Filme de polipropileno

Existem vários tipos de filme isolante de polipropileno, podendo variar a espessura do filme, rugosidade, metodologia de fabricação, entre outros fatores como, rigidez dielétrica. Na Tabela 2 são apresentados alguns parâmetros relevantes de um tipo de filme muito utilizado pelos fabricantes de capacitores [15].

Tabela 2 - Características do filme isolante

Filme de Polipropileno		
Espessura	15.2	μm
Permissividade @ 100°C	2.23	
Fator de Perdas @ 100°C, 60Hz	0.01	%
Ponto de fulgor	176	°C
Suportabilidade dielétrica	625	Vdc/μm

Dentre os parâmetros informados, a permissividade do material é a propriedade de maior relevância na composição da capacitância da unidade capacitiva. Conforme apresentado em (1), a permissividade é diretamente proporcional a capacitância do elemento capacitivo.

Conforme estudado por Riddle, o filme de polipropileno apresenta variação da permissividade quando exposto a diferentes temperaturas. Conforme apresentado na Figura 12, existe uma relação inversamente proporcional entre temperatura e permissividade deste

tipo de material [16]. Conseqüentemente, a capacitância do elemento estará exposta a estas variações, uma vez que este material está inserido no meio dielétrico.

Analisando a curva de permissividade do polipropileno, podemos obter a equação da linha de tendência entre 20° e 100°, faixa de temperatura existente no campo, conforme Figura 13 . Os dados apresentam uma margem de desvio, uma vez que estes testes foram empíricos e resultaram na obtenção de valores na faixa de erro exposta [16].

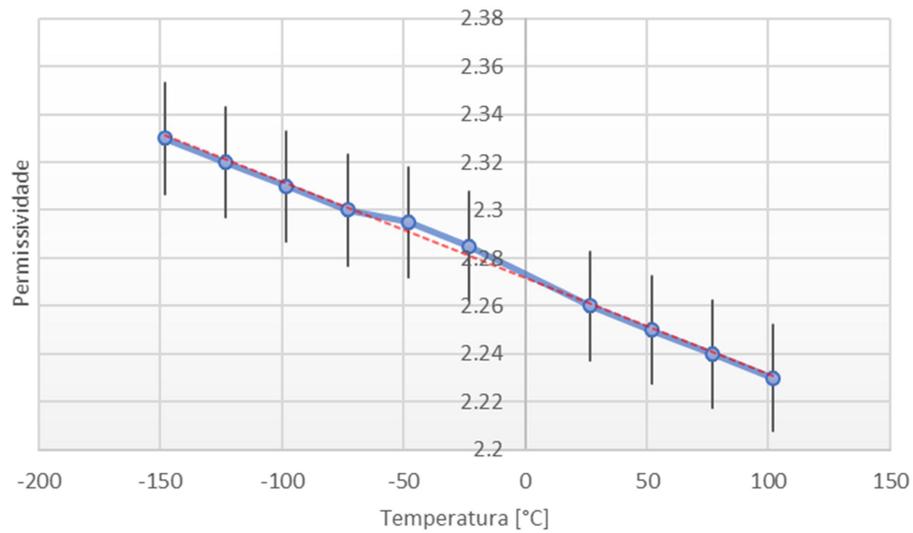


Figura 12 - Permissividade do polipropileno [16]

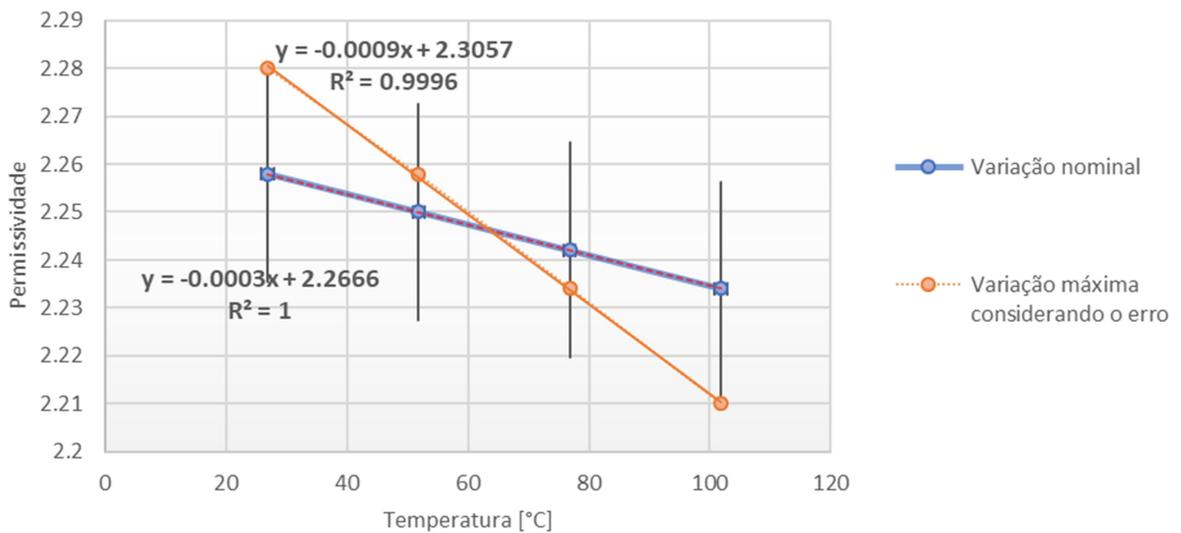


Figura 13 - Equação da permissividade do polipropileno entre 20° e 100°

A análise proposta tem como objetivo verificar a maior variação possível na permissividade do material, dentro da faixa de erro, conseqüentemente análise do impacto na capacitância. Em (5) é possível observar que a relação é negativa, ou seja, com o aumento da temperatura ocorre a diminuição da permissividade, na proporção indicada.

$$\varepsilon_f = -0.0003 \cdot ^\circ C + 2.2666 \quad (5)$$

2.2 Óleo Isolante

Existem diversos tipos de óleos isolantes, sendo que para fabricação de unidades capacitivas são utilizados os tipos sintéticos, diferentemente dos transformadores de potência onde o óleo mais utilizado é do tipo mineral.

A grande maioria dos fabricantes de UCs utilizam a mesma família de óleo, conhecida com SAS. A seguir, Tabela 3, serão apresentadas algumas características genéricas do óleo SAS 40E [17].

Tabela 3 - Características do óleo isolante

Óleo Isolante SAS 40E	
Permissividade @ 100°C	2.43
Fator de Perdas @ 100°C, 60Hz	0.04 %
Ponto de fulgor	139 °C
Rigidez dielétrica	75 kV/mm

O óleo isolante tem papel fundamental na dissipação de calor da unidade capacitiva. Considerando que a caixa do capacitor é de aço inox, bom condutor térmico, o líquido interno é responsável por realizar as trocas térmicas entre os elementos capacitivos e o invólucro, que por sua vez está em contato direto com o ar. No entanto, o caminho inverso também é verdadeiro, a incidência de calor no lado externo da lata é transmitida para o lado interno, através do óleo isolante. Esta informação é de suma importância, uma vez que este trabalho tem por objetivo demonstrar os efeitos do ambiente externo na proteção das UCs.

Os dados obtidos junto ao fabricante, Nisseki Chemical Texas Inc., mostraram variações da permissividade frente a variação de temperatura, conforme Figura 14. Tendo que, a capacitância é diretamente proporcional a permissividade do óleo, conforme em (1), logo um dos motivos pelo qual a capacitância se altera com a variação térmica é devido a permissividade do óleo ser dependente da temperatura.

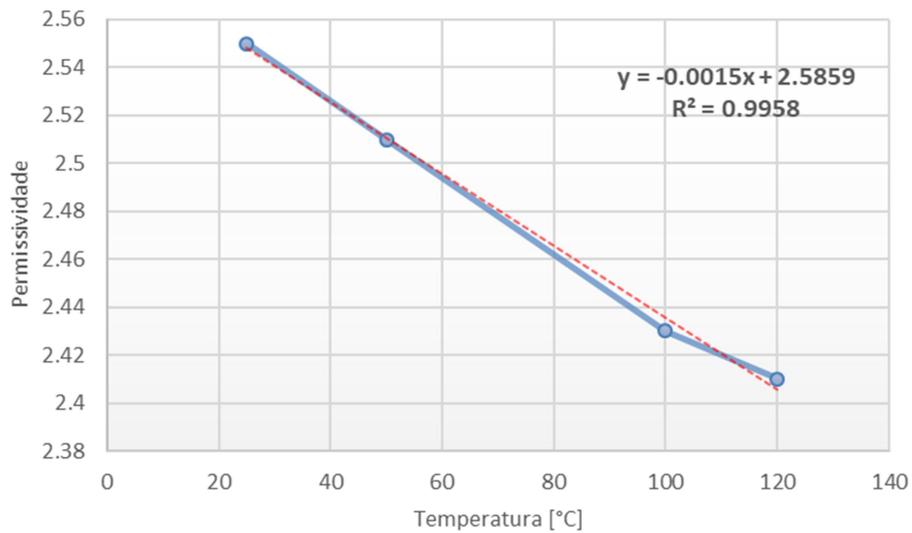


Figura 14 - Permissividade do óleo isolante [17]

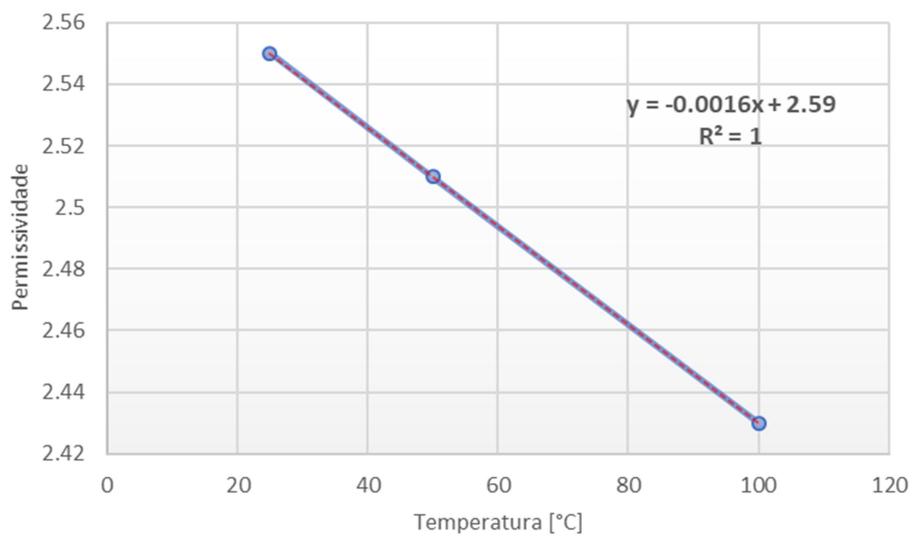


Figura 15 - Equação da permissividade do óleo entre 20° e 100°

Analisando a curva de permissividade do óleo, podemos obter a equação da linha de tendência entre 20° e 100°, faixa de temperatura existente no campo, conforme Figura 15. Em (6) é possível observar que a relação é negativa, ou seja, com o aumento da temperatura ocorre a diminuição da permissividade, na proporção indicada.

$$\varepsilon_o = -0.0016 \cdot ^\circ C + 2.59 \quad (6)$$

2.3 Folha de Alumínio

Os eletrodos do capacitor são compostos por duas folhas de alumínio em paralelo, separada pelo meio isolante, conforme Figura 16. Considerando a fórmula de capacitância, o impacto deste material na variação de capacitância está relacionado com o dimensional do eletrodo.

As dimensões da folha de alumínio sofrem alterações desprezíveis na faixa de temperatura entre 20° e 80°. Portanto, a influência deste material na capacitância do elemento, quanto à variação de temperatura, pode ser desconsiderada.

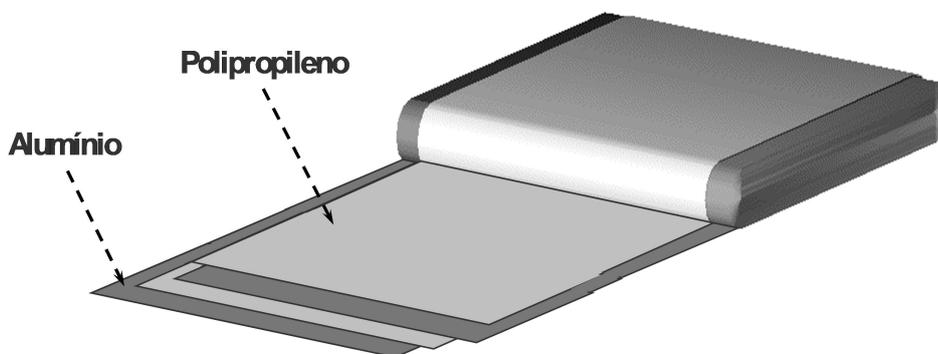


Figura 16 - Elemento capacitivo e posicionamento dos eletrodos [11]

Após toda análise e levantamento realizado sobre a composição e fabricação dos elementos capacitivos, pode-se notar o impacto da temperatura no valor da capacitância final da UC. Portanto, com os dados de variação da permissividade do filme e do óleo, bem como a metodologia de cálculo mencionada em (5), realizou-se o levantamento da curva teórica de variação da capacitância da UC em função da temperatura ambiente. O resultado obtido nesta etapa do trabalho é de fundamental importância para o entendimento da problemática que será apresentada no capítulo 4, onde será discutido o efeito do sombreamento heterogêneo em bancos com elevado número de capacitores.

O meio isolante entre as placas condutoras é formado pela combinação de diferentes materiais isolantes, neste caso dos capacitores de potência *All film* são encontrados os filmes de polipropileno e óleo isolante, conforme Figura 17. Portanto, o cálculo da permissividade resultante leva em consideração a combinação série desses componentes, assim como representado em (7) [18].

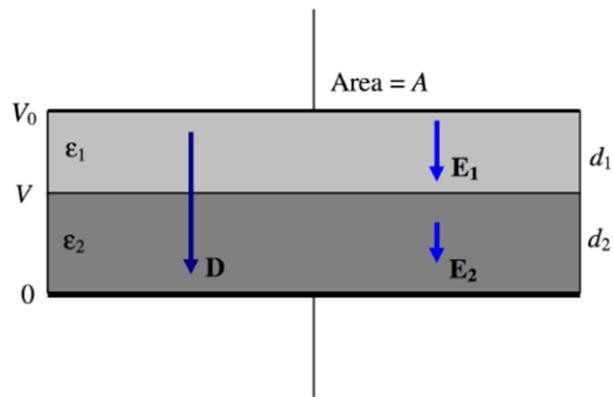


Figura 17 - Capacitância com dielétrico misto [18]

$$C = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot A}{\epsilon_2 \cdot d_1 + \epsilon_1 \cdot d_2} \quad (7)$$

Onde:

C : Capacitância do elemento [F]

ϵ_1 : Permissividade do material 1

ϵ_2 : Permissividade do material 2

d_1 : Espessura do material 1 [m]

d_2 : Espessura do material 2 [m]

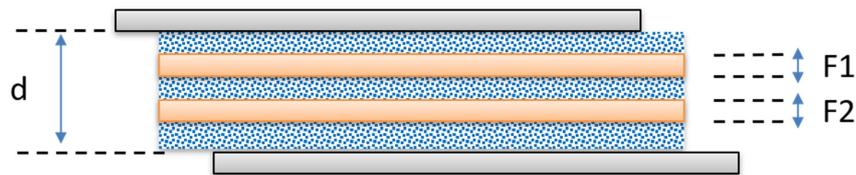
Conforme mostrado em (7), o cálculo da capacitância considera a relação entre a espessura dos dois materiais que compõe o meio dielétrico. Tendo que o filme de polipropileno tem sua dimensão fixa conforme o modelo de filme utilizado, como exemplificado na Tabela 2, precisa-se definir assim a espessura da camada de óleo isolante. Neste ponto faz-se necessário o entendimento sobre fator de espaçamento, apresentado a seguir:

2.4 Fator de Espaçamento (SF)

O fator de espaçamento é um importante parâmetro para unidades capacitivas de potência. Esta característica física do elemento é determinada no momento da bobinagem, através dos ajustes de velocidade de rotação e pressão, assim como no momento da prensagem do elemento capacitivo.

Conforme já mencionado anteriormente, o elemento capacitivo é produzido através do enrolamento de duas folhas de alumínio separadas por duas ou três folhas de isolante polipropileno. Ao término do processo de bobinagem, o elemento, em formato cilíndrico, é posicionado em uma mesa de prensagem, onde aplica-se uma pressão pré-definida para achatá-lo, tornando-o um retângulo de fácil manuseio e empilhamento.

Durante os processos descritos anteriormente, os ajustes dos parâmetros de pressão e velocidade de bobinagem, assim como a pressão de achatamento, determinam o fator de espaçamento. A interpretação do fator de espaçamento pode ser feita como sendo todo o gap existente entre os filmes de polipropileno e as folhas de alumínio [19], conforme exemplificado na Figura 18.



Legenda:

 Eletrodo – Folha de alumínio

 Isolante – Filme de polipropileno

 GAP

Figura 18 - Fator de espaçamento

Conforme mencionado por Mei [19], existem diversas definições distintas para o fator de espaçamento e formas diversas de calcular esta variável. Neste trabalho será utilizado a metodologia de cálculo praticada pelos franceses [19], conforme apresentado em (8). Onde o fator de espaçamento é calculado considerando as espessuras dos dois filmes de polipropileno (F1 e F2) e a distância entre os dois eletrodos.

$$SF = \frac{d - (F1 + F2)}{d} \quad [\%] \quad (8)$$

$$d_f = (F1 + F2) = d \cdot (1 - SF) \quad (9)$$

Sendo assim, obtido o fator de espaçamento do elemento capacitivo, pode-se calcular o valor da capacitância considerando a permissividade do polipropileno e do óleo. Durante o processo de impregnação, o óleo isolante irá penetrar em todos os espaços livres dentro da UC, ou seja, preencher os gaps do fator de espaçamento. Portanto o cálculo da capacitância demonstrado em (7) deve ser complementado, considerando essa nova variável, conforme apresentado em (10).

$$C = \frac{(1 - SF) \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_o \cdot A}{\varepsilon_o \cdot d_f + (1 - SF) \cdot \varepsilon_f \cdot d} \quad (10)$$

Onde:

C : Capacitância do elemento [F]

ε_f : Permissividade do filme de polipropileno

ε_o : Permissividade do óleo isolante

d_f : Espessura do filme de polipropileno (F1+F2)

d : Distância entre os eletrodos

SF : Fator de espaçamento

Adicionalmente, substituindo e isolando a componente da capacitância nominal demonstrada em (1) é possível a obtenção da componente K , conforme demonstrado em (11). Desta forma tem-se a capacitância em função da componente K , variável com a temperatura devido a permissividade do óleo e do filme.

$$K = \frac{(1 - SF) \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_o}{\varepsilon_o \cdot (1 - SF) + (1 - SF) \cdot \varepsilon_f} \quad (11)$$

Utilizando-se das equações (6) e (5) na equação (11), obtém-se a equação (12).

$$k = \frac{0.00000048 \cdot ^\circ C^2 - 0.00440356 \cdot ^\circ C + 5.870494}{-0.0019 \cdot ^\circ C + 4.8566} \quad (12)$$

Portanto, a capacitância calculada para o elemento capacitivo é função da temperatura e independente do fator de espaçamento, conforme demonstrado em (12). O resultado é satisfatório, uma vez que, durante o processo produtivo a variação do SF não impacta no resultado da capacitância da unidade, mas tem total relação com o nível de impregnação e com a suportabilidade dielétrica dos elementos. Adicionalmente, a equação (12) é válida quando da utilização dos materiais mencionados nas Tabelas Tabela 2 e Tabela 3, uma vez que os coeficientes da equação são obtidos com base na permissividade de cada componente.

Finalmente, utilizando a equação (12) obtém-se o gráfico da Figura 19 e consequentemente o fator teórico de variação da capacitância em função da temperatura, conforme (13).

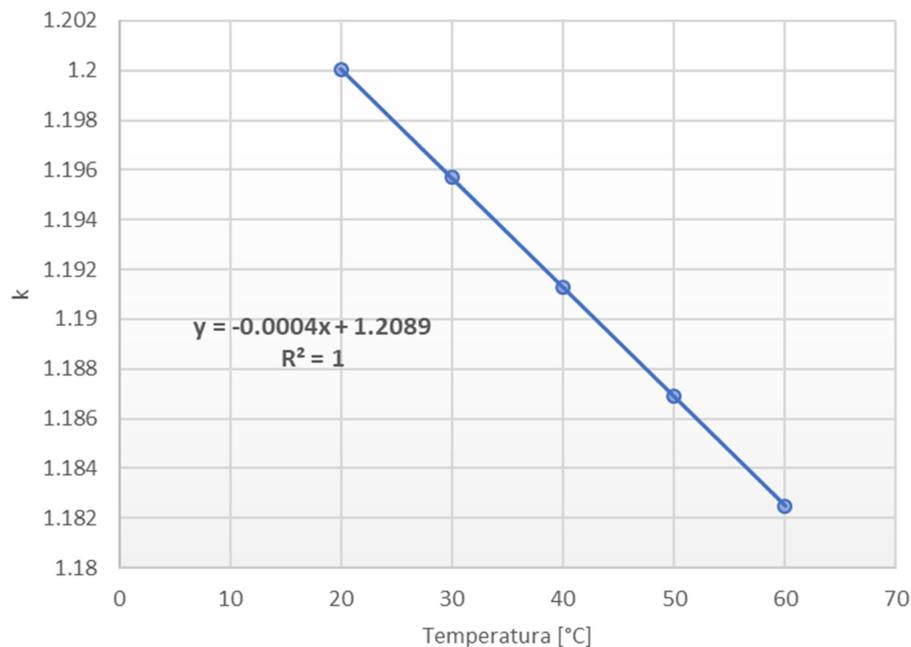


Figura 19 - Coeficiente k de variação

$$\text{Capacitância} \propto -0.00043 \cdot ^\circ C \quad (13)$$

2.5 Verificação Experimental

Os resultados teóricos obtidos demonstram que a variação da capacitância é inversamente proporcional a temperatura ambiente. Visando comprovar os valores

encontrados, realizaram-se ensaios controlados objetivando o levantamento real da curva de variação de temperatura.

Os ensaios realizados consistiram em realizar medições de capacitância, em três unidade capacitiva idênticas, em diversos pontos de temperatura. Todas as medições de capacitância foram realizadas com tensão nominal e frequência de 60 Hz, com os equipamentos descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Equipamentos do laboratório

PTD-007 - Ponte Digital de Medição de Capacitância e Tangente Delta - Omicron	
Certificado de Calibração:	0380/2017
Lab.:	Vegtron
MUD-030 - Multímetro Digital	
Certificado de Calibração:	0225/2019
Lab.:	Vegtron
DIT-006 - Divisor de Tensão modelo KVM 100 - Phenix	
Certificado de Calibração:	2164/2018
Lab.:	Vegtron

As unidades capacitivas escolhidas para o ensaio foram colocadas em uma câmara térmica, Figura 20, com temperatura controlada, e após atingir o equilíbrio térmico na temperatura desejada foram realizadas as aplicações de tensões e obtenção dos valores de capacitância, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio da variação de capacitância

Medição	Temperatura [°C]	Capacitância Média Medida [pu]
1	20	1.000
2	30	0.996
3	40	0.992
4	50	0.988
5	60	0.983

Utilizando os dados do ensaio, obteve-se a equação da reta para a tendência de variação das capacitâncias, mostrada na Figura 21 e equação (14). O resultado encontrado

apresenta as mesmas características dos resultados teóricos. A capacitância é inversamente proporcional a variação de temperatura.



Figura 20 - Câmara térmica de ensaio (Fonte: GE)

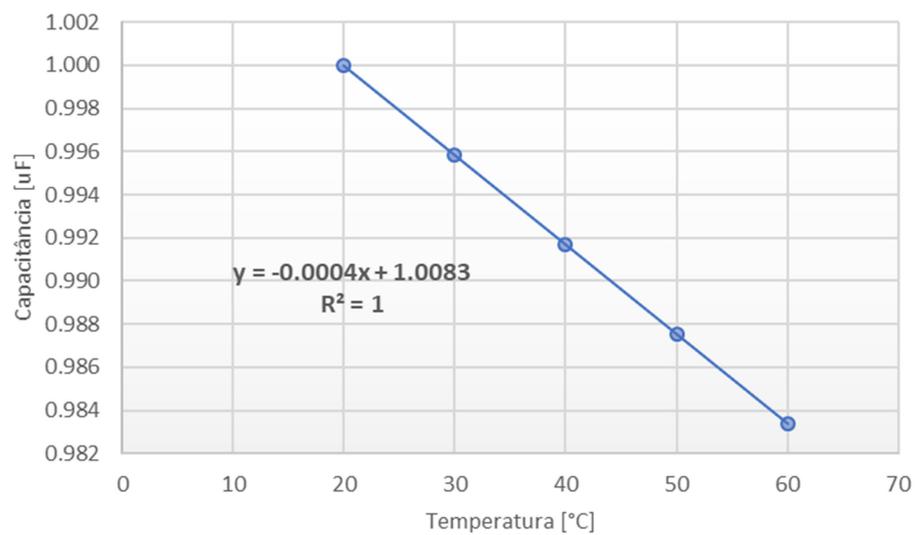


Figura 21 - Levantamento da equação da reta do ensaio de capacitância

$$\text{Capacitância} \propto -0.000415 \cdot ^\circ\text{C} \quad (14)$$

Os resultados obtidos neste trabalho, utilizando a fundamentação teórica, possibilitou o desenvolvimento de um aplicativo para a correção da capacitância com base na temperatura, mostrado na Figura 22. Até a publicação deste material, não se encontrou nenhum tipo de calculadora que possibilitasse o operador obter o valor corrigido de capacitância da unidade capacitiva em campo.

O desenvolvimento do aplicativo para celular denominado “*Capacitor Bank Calculation*” permite a correção instantânea da capacitância, considerando a temperatura ambiente, além de mostrar ao usuário a existência de elemento queimado no capacitor medido.

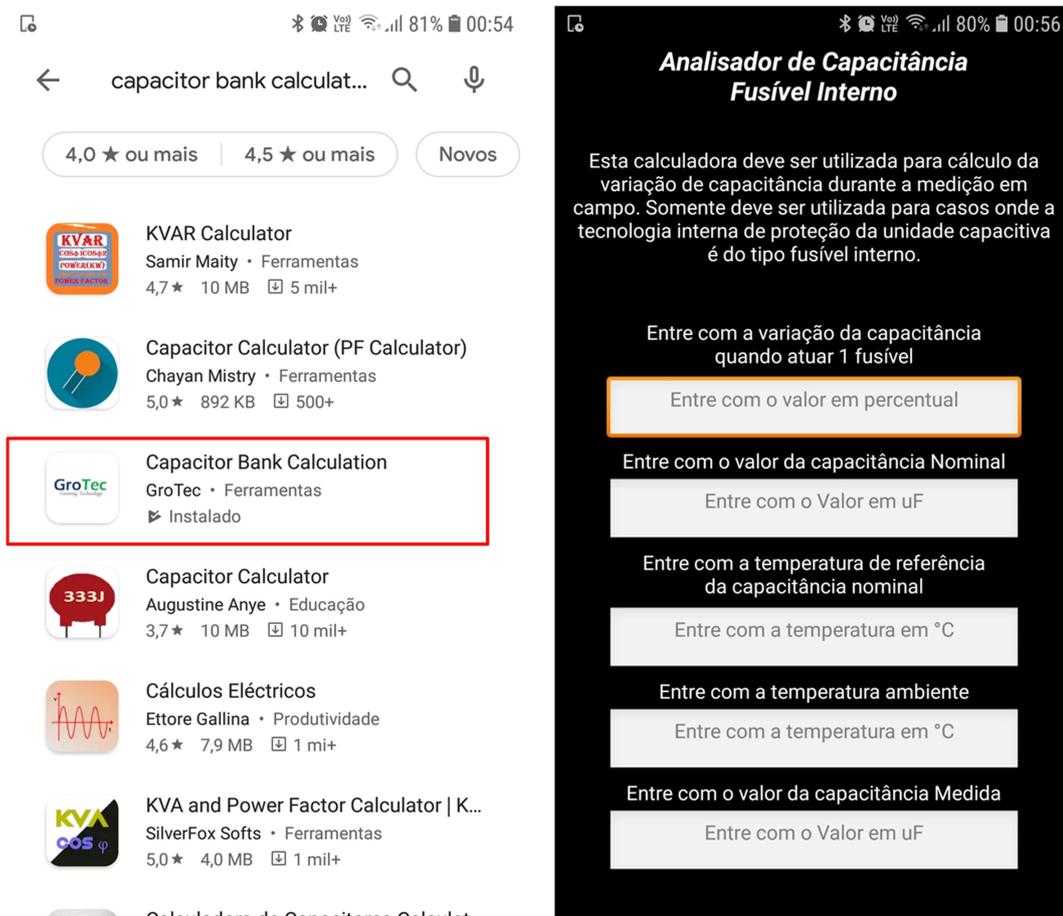


Figura 22 - Aplicativo para correção de capacitância com a temperatura ambiente

Ao final deste capítulo é possível entender melhor a unidade capacitiva e seus componentes, assim com a influência externa nos parâmetros elétricos. Portanto, os resultados

obtidos serão de grande relevância para entender o fenômeno da insolação heterogênea e seus impactos na proteção de grandes bancos de capacitores, capítulo 4 deste trabalho.

Capítulo 3 – Banco de Capacitores e Balanceamento

Neste capítulo será abordado primeiramente as diferentes tecnologias de proteção das UCs. Posteriormente, as diferentes topologias de ligações serão devidamente analisadas, uma vez que o entendimento destas será necessário para a compreensão das metodologias de mitigação das interferências externas, no sistema de proteção dos bancos de capacitores.

Bancos de capacitores são equipamentos formados por diversos outros componentes, ao serem conectados em conjunto compõem a solução de compensação reativa. As UCs são dimensionadas de modo que ao serem ligadas em série e paralelo, resultem na potência reativa total e tensão especificada. A perfeita harmonia e funcionamento destes componentes ocorre graças ao sistema de proteção, devidamente ajustado e parametrizado para tal.

A seguir serão apresentadas as tecnologias usuais existentes no mercado para proteção das unidades capacitivas e que resultarão na definição da topologia de proteção do banco de capacitor.

3.1 Unidade Capacitiva com Fusível Externo (FE)

A tecnologia fusível externo foi por muito tempo utilizada na grande maioria dos projetos, sendo a primeira utilizada para proteger as células capacitivas. Com o avanço tecnológico novas soluções foram desenvolvidas e este método de proteção caiu em desuso, apesar de algumas concessionárias manterem em bancos de baixa potência e tensão reduzida [11].

A filosofia de proteção neste caso tem como principal fundamento a abertura do circuito de alimentação da UC quando elementos internos entram em curto. Desta forma evita a possibilidade de falhas em cascata dos elementos internos que poderia ocasionar a ruptura da caixa, colocando em risco a integridade do BC e das pessoas próximas. A seguir serão apresentadas algumas das desvantagens na utilização desta tecnologia:

- Elo fusível instalado ao tempo, exposto a intempéries. Possibilidade de atuação indevida colocando em risco a operação;
- Maior área de instalação devido a necessidade de barramentos adicionais no banco de capacitores para instalação dos cartuchos fusíveis, conforme Figura 23;
- Uso de capacitores com potências reduzidas para evitar grandes perdas quando da abertura do fusível externo, tendo impacto na área de instalação e otimização do projeto;

- Quando da abertura do elo fusível toda a unidade capacitiva é retirada de operação, resultando em uma variação considerável de capacitância, ilustrado na Figura 24 e Figura 25.



Figura 23 – Exemplo de banco de capacitores com fusível externo [11]

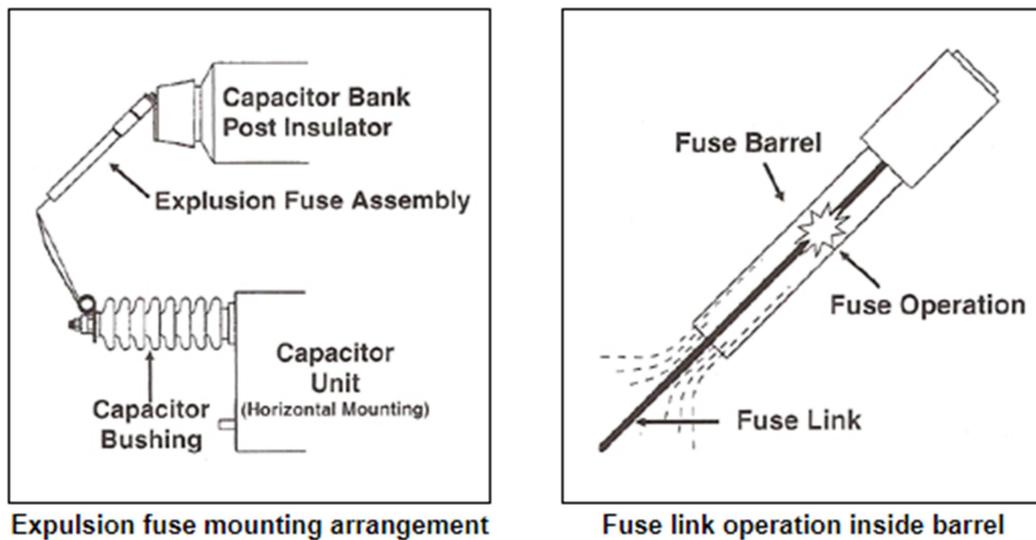


Figura 24 - Operação do fusível externo [20]

A filosofia da proteção neste tipo de UC fundamenta-se em não expor as unidades capacitivas adjacentes a tensões superiores a 1.1 pu, sobretensão essa definida por norma que o equipamento deverá suportar em regime permanente. Durante a falha de elementos internos ocorre o aumento da capacitância da UC, conseqüentemente redução da impedância e aumento da corrente e tensão no capacitor, conforme demonstrado nas equações (15) (16).

$$\uparrow C = C_{elemento} \cdot \frac{n_{ep}}{n_{es}} \downarrow \quad (15)$$

$$\downarrow X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \uparrow \quad (16)$$

$$\uparrow I = \frac{U}{X_c} \downarrow \quad (17)$$

Onde:

C : Capacitância da unidade capacitiva [F]

C_e : Capacitância do elemento capacitivo [F]

n_{ep} : Número de elementos em paralelo

n_{es} : Número de elementos em série

X_c : Impedância capacitiva [Ω]

f : Frequência nominal [Hz]

U : Tensão na unidade capacitiva [V]

I : Corrente da unidade capacitiva [A]

3.2 Unidade Capacitiva sem fusível - *Fuseless* (FL)

As unidades capacitivas *fuseless* não apresentam nenhum dispositivo interno e externo para proteção quanto a queima de elementos, no entanto o projeto destes capacitores apresenta características diferenciadas. Atualmente refere-se ao projeto de maior grau tecnológico e com grande percentual de implementação. As UCs são conectadas em *strings* série sem interligação paralela, quanto maior a tensão nominal do banco de capacitores maior a quantidade de UCs conectadas na *string*, conforme mostrado na Figura 27.

O efeito da queima de elementos internos é o mesmo já discutido anteriormente, diferenciando apenas no resultado das falhas consecutivas. Nos capacitores com fusível externo, o elo se rompe com o aumento da corrente, já neste caso os valores de ajustes da proteção são calculados considerando os limites internos do projeto.

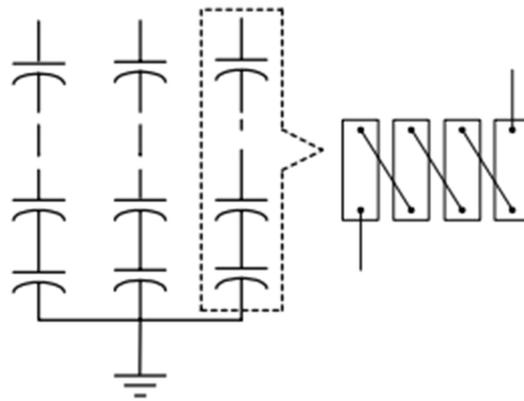


Figura 27 - Diagrama banco de capacitores *fuseless*

Exemplificando, um banco de capacitores formado por 6 unidades em série, sendo cada unidade composta por 8 elementos em série, tem-se no total 48 elementos série na *string*. Na queima de 1 elemento, este será curto circuitado e a tensão sobre os elementos remanescentes será de $48/47$, ou seja, aproximadamente 2%. Neste caso o banco de capacitores continua em operação, uma vez que o limite de 10% não foi atingido. Caso ocorra falhas sucessivas nesta mesma *string* a sobretensão aumentará levando o BC à um evento de alarme e trip.

Conforme demonstrado no exemplo anterior, projetos considerando unidades *fuseless* devem, preferencialmente, conter no mínimo 10 elementos capacitivos em série no BC garantindo que os elementos sadios durante uma falha não estarão expostos a tensões maiores que 110% [11].

3.3 Unidade Capacitiva com Fusível Interno (FI)

Dentre os tipos de proteção já mencionados anteriormente, fusível interno é a tecnologia mais utilizada nos dias de hoje. Assim como no fusível externo, nesta topologia a unidade capacitiva possui fusível de proteção para evitar danos mais severos ao BC e minimizar os riscos para os operadores. No entanto, cada elemento capacitivo tem um fusível interno conectado em série, conforme Figura 28, garantindo a abertura do elo quando o elemento é curto circuitado, obviamente se o fusível for projetado adequadamente [11].

O “simples” fusível consiste em um pedaço de fio dimensionado para fundir quando exposto a uma determinada energia, encapsulado em embrulho de papel capaz de suportar o calor produzido pelo arco durante o processo de interrupção da corrente e fusão do elo. Após a falha do elemento, o fusível remove o mesmo de operação não impedindo que os demais elementos em paralelo continuem em operação, diferente do caso fusível externo e *fuseless*. No entanto, os elementos “sadios” em paralelo no mesmo grupo série, após o elemento defeituoso sair de operação, permanecem em operação com uma pequena sobretensão e sobrecorrente.

No caso da ocorrência de falha em outro elemento as sobretensões internas se agravam, uma vez que, a probabilidade de ocorrência de falha no mesmo grupo série já afetado anteriormente é muito maior. A cada nova queima de elementos, os elementos remanescentes ficam expostos a um stress dielétrico e térmico superior aos elementos dos demais grupos séries da mesma UC.

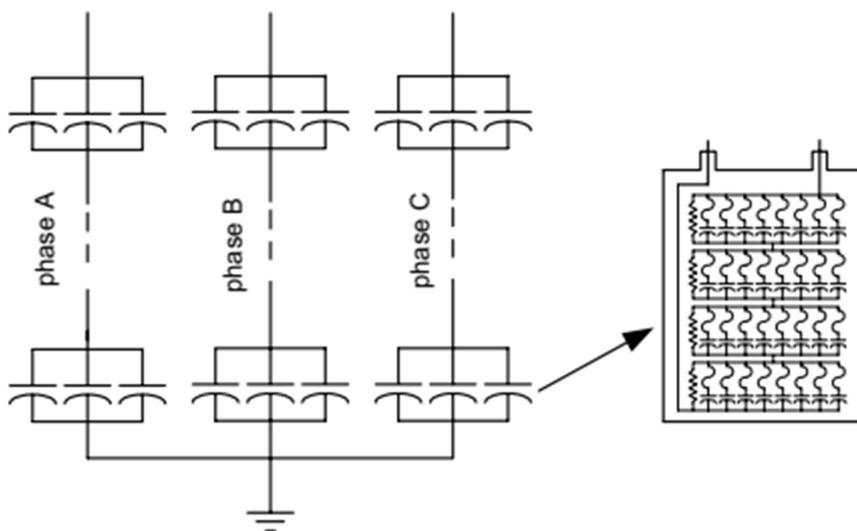


Figura 28 - Diagrama banco de capacitores com fusível interno [21]

Quando comparado com o fusível externo, uma desvantagem operativa é a difícil identificação da UC danificada no momento da troca. Diferentemente do fusível externo, o fusível interno não tem um meio prático e simples, como o cartucho e mola, para identificar

qual deverá ser a unidade capacitiva que necessita ser trocada. Portanto o tempo de atuação da equipe de manutenção em casos de intervenção é maior para este tipo de capacitores.

Contudo, os pontos positivos deste tipo de tecnologia são inúmeros e muitos deles estão relacionados com a segurança operativa do equipamento, alguns destes benefícios são:

- Elemento fusível está dentro do capacitor, protegido de intempéries em um ambiente controlado e imerso em óleo isolante;
- Maior confiabilidade operativa, quando projetado adequadamente;
- O elemento danificado não retira os demais elementos de operação, garantido continuidade operativa da unidade capacitiva como um todo;
- A falha interna é isolada dos demais elementos;
- Possibilidade de unidades capacitivas com maior potência e otimização do projeto, possibilitando redução de custo e espaço de instalação. Como ilustrado na Figura 29.

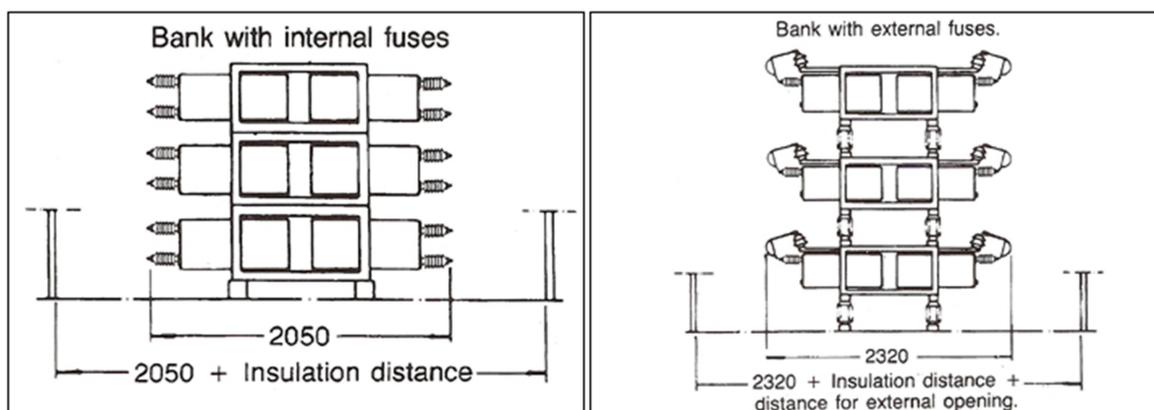


Figura 29 - Comparação banco FI e FE [20]

O cálculo da variação de capacitância quando da queima de um elemento deve ser realizado considerando a retirada apenas da porção danificada. Diferentemente das unidades fusível externo e *fuseless*, neste caso a variação da capacitância é negativa e em proporções menores de variação, conforme o exemplo mostrado na Tabela 6. Com a redução da capacitância ocorre o aumento da impedância e conseqüentemente a redução da corrente na unidade capacitiva com fusível atuado. No entanto devido a redistribuição de corrente interna nos elementos do grupo série afetado, ocorre um acréscimo da tensão na porção restante, logo este dado é utilizado para definir os ajustes da proteção, valores de alarme e trip, conforme Tabela 6.

Na Figura 30 é possível visualizar o fenômeno de alteração das distribuições internas de corrente durante a atuação dos fusíveis, assim como entender a variação da capacitância negativa neste caso, conforme (18).

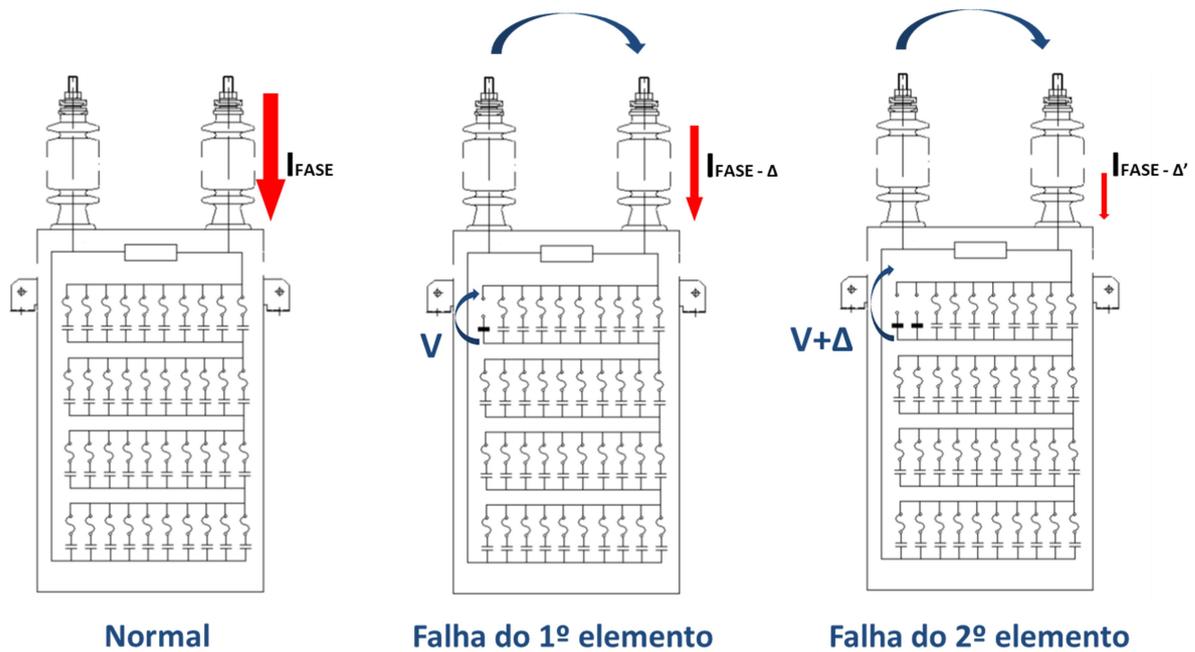


Figura 30 - Fusível interno em operação

Tabela 6 - Análise dos parâmetros elétricos da unidade com fusível interno

DADOS DA UNIDADE CAPACITIVA

Tensão Nominal	Uc =	11790 V
Potência Nominal	Qc =	473 kvar
Corrente Nominal	Ic =	40.1 A
Capacitância Nominal	Chom =	9.03 μF
Núm. Grupos Série de Elementos	Su =	6
Elementos em Paralelo / Grupo	N =	10

Número de Fusíveis Atuados	Capacitância da Unidade Afetada	Qu / Qn	Capacitância da Fase Afetada	Qp / Qb	Tensão na Unidade Afetada	Tensão nos Elementos Afetados	Corrente na Unidade Afetada	Corrente de Desequilíbrio entre os Neutros	
f	Qu (μF)	%	Qp (μF)	%	Vcu (pu)	Ve (pu)	Iu (pu)	In (A)	
0	9.03	0.00%	1.50	0.00%	1	1	1	0	
1	8.86	-1.82%	1.50	-0.08%	1.017	1.110	0.999	0.031	
2	8.67	-4.00%	1.50	-0.17%	1.039	1.246	0.997	0.069	
3	8.42	-6.67%	1.50	-0.30%	1.066	1.422	0.995	0.119	
4	8.12	-10.00%	1.50	-0.46%	1.103	1.654	0.992	0.184	ALARME
5	7.74	-14.29%	1.49	-0.68%	1.153	1.977	0.989	0.275	
6	7.22	-20.00%	1.49	-1.02%	1.229	2.457	0.983	0.411	TRIP
7	6.50	-28.00%	1.48	-1.57%	1.352	3.246	0.974	0.633	

$$\downarrow C = C_{elemento} \cdot \frac{n_{ep}}{n_{es}} \downarrow \quad (18)$$

Conforme apresentado, cada tecnologia apresenta sua particularidade no que se refere a vantagens e desvantagens, bem como nos efeitos sobre as unidades capacitivas e BC quando da falha de um elemento capacitivo. O correto entendimento destas tecnologias possibilita identificar os resultados destes fenômenos no balanceamento, uma vez que o presente trabalho visa discutir os efeitos da interferência externa no equilíbrio dos bancos de capacitores.

Após a compreensão sobre as unidades capacitivas, será apresentado a seguir os diferentes tipos de configurações dos bancos de capacitores e os possíveis fenômenos que interferem na proteção, tema deste trabalho. Também serão apresentadas as metodologias propostas para mitigação destas interferências.

3.4 Configuração dos bancos de capacitores

Conforme já apresentado, as unidades capacitivas possuem configuração série e paralela de elementos internos formando uma capacitância equivalente. No caso dos bancos de capacitores, a lógica permanece a mesma, a junção de diversas unidades capacitivas conectadas em série e paralelo resulta em potência e tensão equivalente do banco. A vantagem nestas configurações é possibilitar o particionamento do banco e conseqüentemente fazer diversos subequipamentos com menor potência e menor isolação. Isso torna o equipamento mais barato e com manutenção facilitada, uma vez que é possível a troca parcial em caso de falha.

A conexão das diversas UCs pode ser realizada de muitas maneiras, resultando em filosofias de proteção diferenciadas, mas sempre obedecendo o correto balanceamento do BC. Serão então analisadas as principais configurações utilizadas, assim como possíveis filosofias de proteção e suas particularidades.

A. Dupla Estrela

Os bancos de capacitores trifásicos são em sua grande maioria conectados em dupla estrela isolada ou aterrada de acordo com o nível de tensão e local de instalação. A Figura 31 representa os dois tipos de conexão. A determinação do isolamento do neutro leva em consideração estudos que verifiquem os níveis de sobretensões e sobrecorrentes transitórios oriundos da manobra do BC, assim como avaliação dos limites do dispositivo de manobra a ser utilizado.

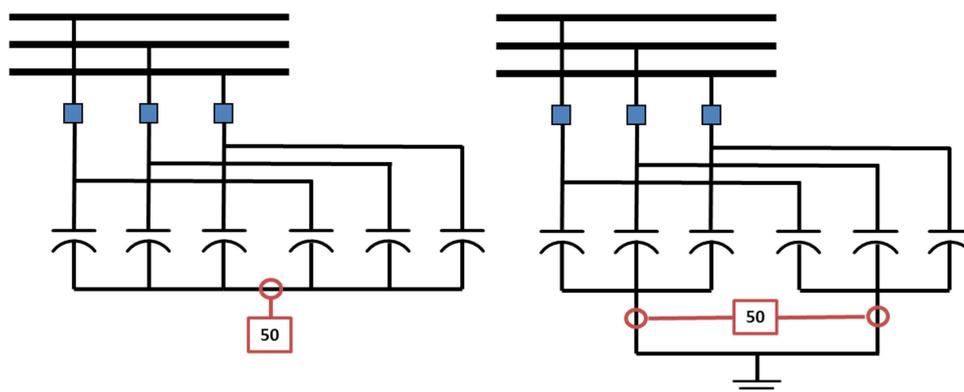


Figura 31 – Configuração dupla estrela e o transformador de corrente de proteção

A popularização da configuração dupla estrela isolada está relacionada com a facilidade de implementação da lógica de proteção por meio da utilização de um único transformador de corrente (TC) para o caso isolado, e dois para o caso aterrado. Devido ao número reduzido de TCs, a implementação desta solução apresenta um dos melhores custo benefício, além de tornar o sistema de medição de desequilíbrio de neutro insensível ao desequilíbrio das fases. Outro fator importante é a robustez e confiabilidade deste sistema de proteção. Que, quando isolado, não sofre interferência de ruídos oriundos da malha de terra, assim como interferências das harmônicas de sequência zero.

A configuração aterrada é comumente aplicada para sistemas com tensão nominal superior a 138 kV, minimizando sobretensões frente a faltas monofásicas. O aterramento, caminho de baixa impedância para terra, auxilia na proteção contra surtos atmosféricos, além de reduzir as tensões transitórias sobre os terminais dos disjuntores. Outro fator relevante, é a diminuição da possibilidade de reacendimento do arco elétrico (Restrike), fenômeno este prejudicial aos capacitores.

As desvantagens do aterramento estão relacionadas com as correntes transitórias que são mais elevadas, e criação de caminho para circulação de correntes harmônicas de sequência zero. Logo, interferência e ruído nos sinais da proteção podem ocorrer, possibilitando atuação indevida e exposição das unidades capacitivas a sobrecargas, ocasionando queima de elementos, fusíveis e danos irreversíveis no banco.

A filosofia de proteção neste tipo de configuração consiste, basicamente, na comparação da impedância de ambos os lados da estrela [4]. Conforme ocorrem alterações nos valores de capacitâncias devido a queima de elementos, a alteração da corrente entre as duas “pernas” das estrelas resultará em uma corrente de neutro diferente de zero. Na Figura 32 a) está representado um banco de capacitores dupla estrela isolada equilibrada, portanto a corrente de desequilíbrio é zero, conforme mostrado na Figura 32 b).

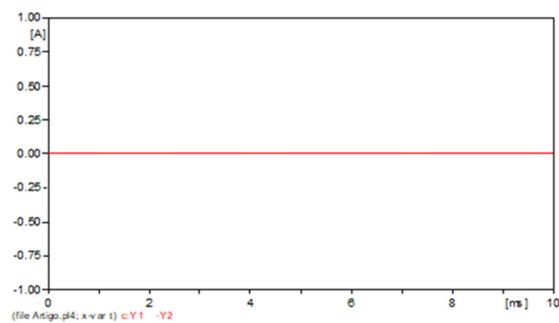
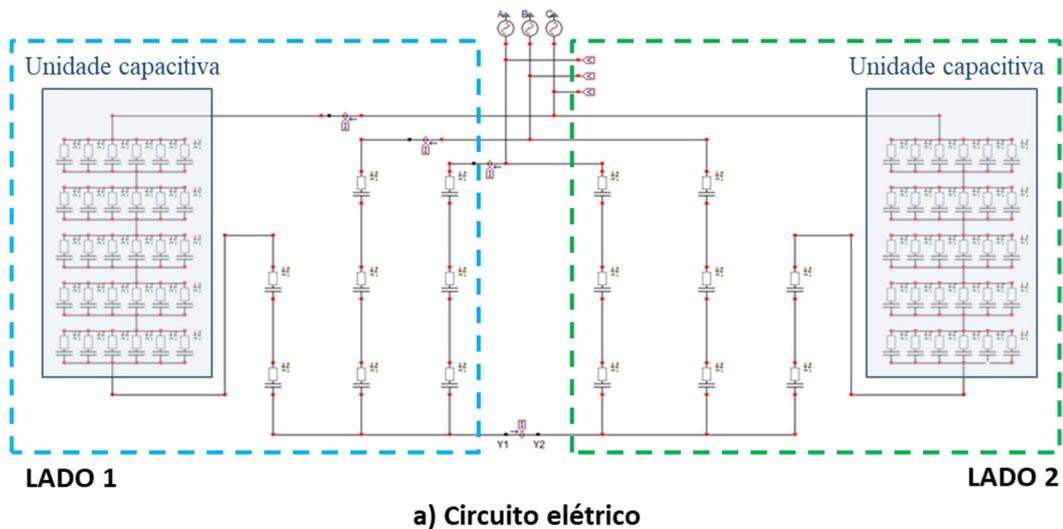


Figura 32 - Dupla estrela equilibrada

O caso exemplificado anteriormente ocorre numa situação ideal, onde as capacitâncias dos lados 1 e 2 são idênticas, sabe-se que esta situação é rara, para não dizer impossível. A Figura 33 representa o caso contendo um desequilíbrio nas impedâncias devido a atuação de um fusível interno no lado 1, conseqüentemente a capacitância é reduzida, reduzindo a corrente neste ramo e por consequência causando o desequilíbrio de corrente de neutro.

Conforme apresentado anteriormente, a queima de elementos nos capacitores ocasiona o desbalanço de corrente. Sendo assim, caso ocorra queima de elementos apenas de um lado da dupla estrela o valor da corrente de desequilíbrio somente aumentará, sendo efetivo o método de proteção. No entanto, a queima de elementos nas estrelas opostas resultará na compensação do balanceamento, conforme Figura 34, ocultando os defeitos nas unidades capacitivas e colocando em risco a integridade do banco de capacitores.

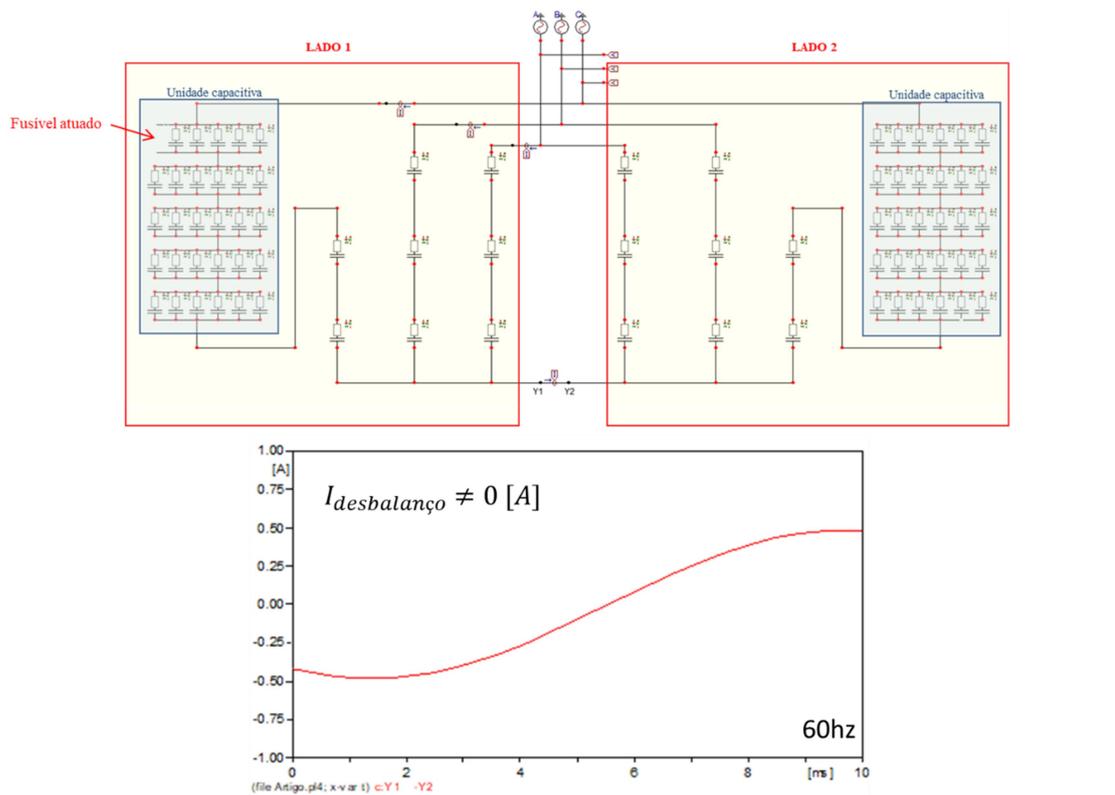


Figura 33 - Dupla estrela desequilibrada

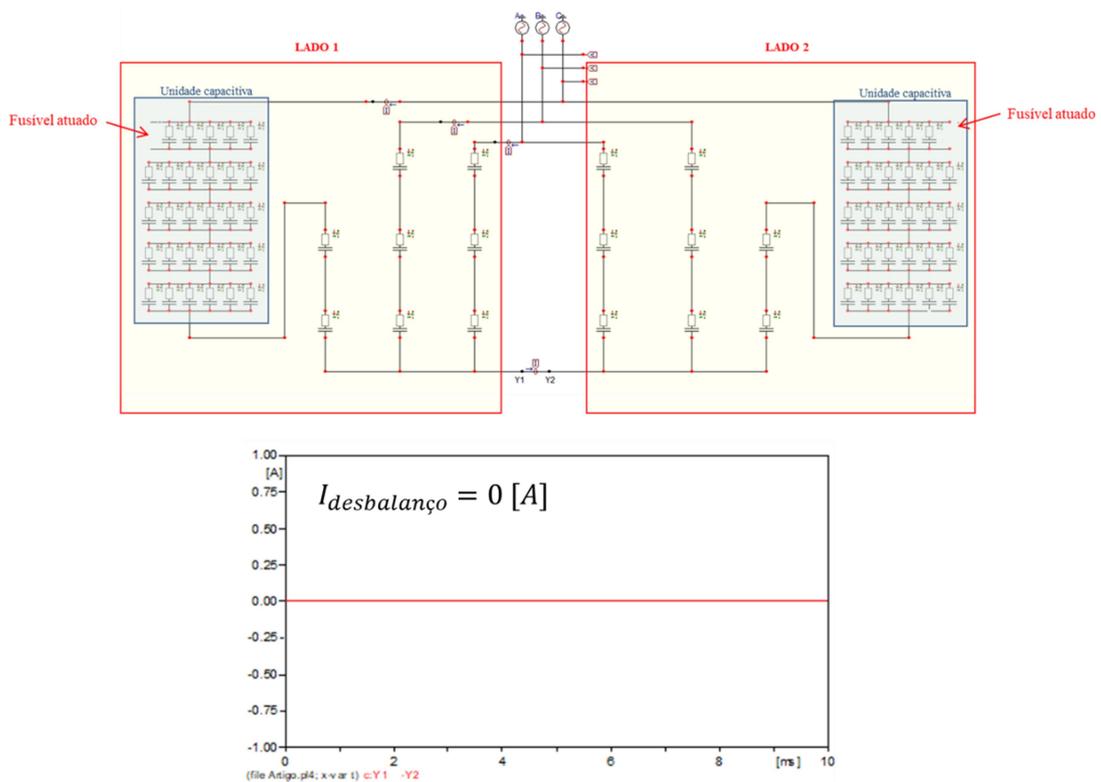


Figura 34 - Dupla estrela compensada

A compensação no sinal de desequilíbrio de bancos de capacitores é recorrente nos BCs que utilizam essa filosofia de proteção, apesar do baixo custo de implementação e boa sensibilidade quando comparada com as demais metodologias de proteção.

Havendo a possibilidade das falhas se tornarem invisíveis, novas metodologias de identificação de falhas devem ser estudadas para evitar danos severos em momentos críticos de operação do equipamento. As normas nacionais de disponibilidade são severas e podem aplicar multas de 150 vezes a receita gerada pelo BC, sendo em alguns casos na ordem de milhões de reais. Portanto, a problemática da compensação do desbalanço pode ser mitigada através do acompanhamento contínuo da amplitude da corrente de desequilíbrio, em percentual da corrente nominal de linha conforme exposto na equação (19) e exemplificado graficamente na Figura 35.

$$Fator_{desbalanço} = \frac{I_{desequilíbrio}}{I_{fase}} * 100 \text{ [%]} \quad (19)$$

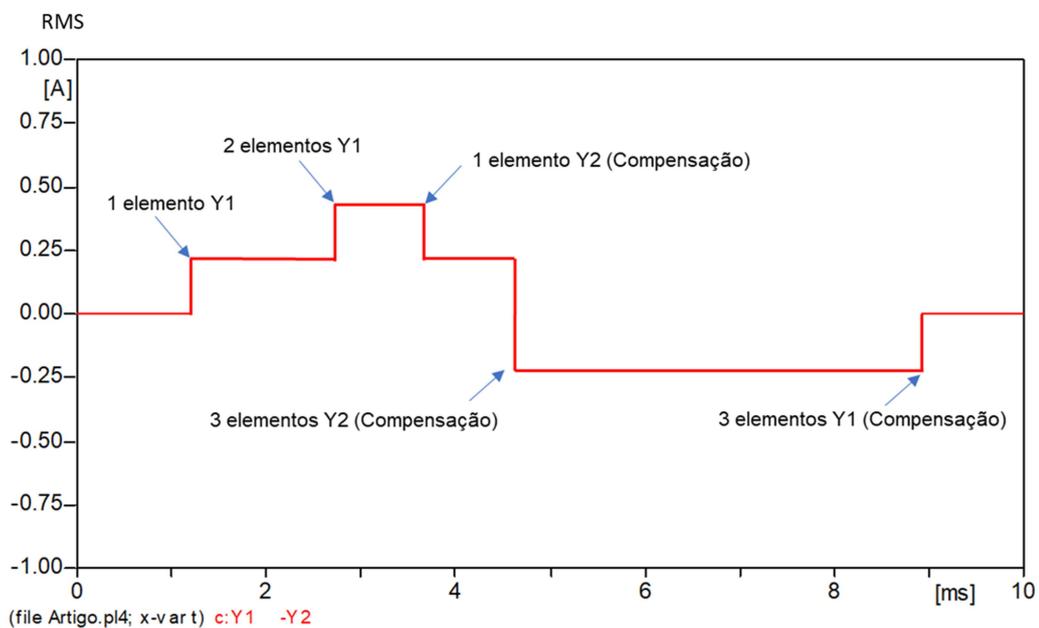


Figura 35 - Acompanhamento da corrente de desequilíbrio

A detecção do fenômeno da compensação seria baseada na alteração no sentido da corrente de desequilíbrio. Conforme a mudança do valor da corrente a curva se altera, tanto em módulo quanto em sinal, indicando assim a queima de elementos, conforme apresentado nas equações (20). Através de uma variável contador é possível armazenar e monitorar a quantidade de elementos danificados no banco em análise.

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I(t - t') - I(t)}{t'} \quad (20)$$

O acompanhamento do desequilíbrio pode ser realizado através do supervisor ou até mesmo de uma lógica em paralelo com o sistema de proteção. Deve-se criar uma variável denominada “máxima”, outra denominada “atual” e a “quantidade de elementos”. Através da comparação constante entre o valor armazenado na “máxima” com o valor armazenado na “atual” realiza-se o incremento ou decremento na variável “quantidade de elementos”. O fluxograma da lógica proposta pode ser visualizado na Figura 36, desta forma a proteção poderá atuar não somente com a corrente de desequilíbrio, mas também pelo valor atingido na quantidade de elementos danificados.

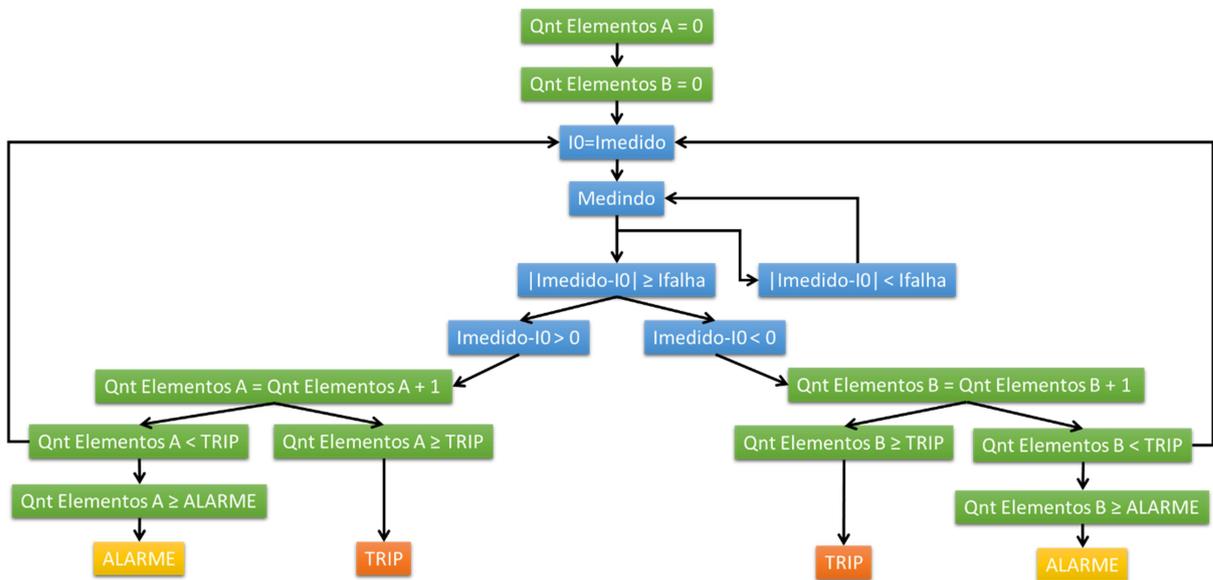


Figura 36 - Fluxograma análise de compensação

No fluxograma apresentado na Figura 36, temos as seguintes variáveis:

- Qnt Elementos A: Quantidade de elementos danificados no lado A.
- Qnt Elementos B: Quantidade de elementos danificados no lado B.
- I0: Variável de armazenamento de corrente temporária para implementação da lógica de comparação.
- Imedido: Corrente instantânea medida (Variável de monitoramento).
- Ifalha: Corrente referente a queima de um elemento capacitivo.
- TRIP: Quantidade de elementos necessários para atingir o nível de desligamento.
- ALARME: Quantidade de elementos necessários para atingir o nível de alarme.

Portanto a metodologia apresentada identifica as variações da corrente de desequilíbrio informando a quantidade de elementos danificados em cada lado da estrela, eliminando

qualquer possibilidade de compensação. Desta forma, a filosofia proposta permanecerá econômica, com boa sensibilidade e sem possibilidade de pontos operativos proibitivos aos equipamentos, ou seja, extinção da operação inadequada quanto a quantidade de elementos falhados.

Outra possível solução à compensação de corrente é a utilização de dois ajustes de alarme e um ajuste de trip. Trata-se de uma medida corretiva simplista, porém econômica e de fácil implementação. O objetivo é ajustar o ALARME 1 no momento que houver a primeira falha de elemento e conseqüentemente a corrente de desequilíbrio se distanciar do ponto de equilíbrio. Neste caso, o ALARME 1 funciona como um identificador de falhas, garantindo ao sistema de proteção que já existe no BC elementos capacitivos danificados. Durante o funcionamento do BC em caso de falhas de novos elementos, a corrente de desequilíbrio será alterada novamente, caso a alteração resultar na queda da corrente a níveis inferiores ao valor ajustado no ALARME 1, tal fenômeno tem como significado a compensação de corrente entre as estrelas. O ALARME 2 deve ser ajustado aos valores de alarme normal informado pelo fabricante, assim como o TRIP deverá ser ajustado normalmente. Neste caso da avaliação da compensação, através de múltiplos alarmes, não se tem com precisão a quantidade de elementos danificados, permitindo desta forma possíveis condições operativas inadequadas ao equipamento.

A configuração dupla estrela isolada também pode ser utilizada com um transformador de potencial entre o ponto de neutro e o terra. Caso esta topologia for utilizada, toda teoria descrita anteriormente permanece válida, no entanto o sinal de alarme e trip será em decorrência do sinal de tensão de neutro e não mais corrente de desbalanço entre as duas estrelas. Portanto haverá alterações somente no tipo do sinal, antes corrente e neste caso tensão, mas toda lógica protetiva permanece conforme descrita.

A configuração dupla estrela aterrada é outra opção, neste caso utiliza-se um transformador de corrente entre o neutro e o terminal de terra. Recomenda-se a utilização de varistor no TC, pois durante chaveamentos e transitórios pode ocorrer fluxo de alta corrente para o caminho de baixa impedância, sendo um dos motivos o chaveamento das fases em tempos distintos e gerando diferenças de tensão entre as fases durante o chaveamento. Por esse motivo também, uma boa prática é a utilização de funções temporizadas para os ajustes de proteção, evitando assim, atuações indevidas durante chaveamentos.

B. Ponte H

Considerada uma das configurações mais completas, apresentando boa sensibilidade e proteção individual por fase, sendo muito utilizada para projetos com UCs do tipo FI. No caso da necessidade de intervenção no BC para troca de unidades capacitivas, o tempo de atuação é reduzido em 1/3, visto que as medições são feitas individualmente por fase e a identificação da corrente de desequilíbrio é realizada de forma independente, conforme Figura 37.

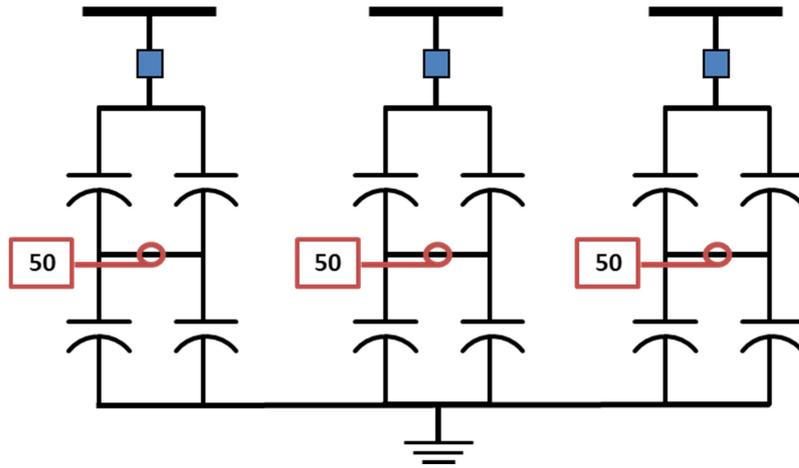


Figura 37 - Ponte H com transformadores de corrente independentes

Referente ao custo de implementação, a ponte H requer um grande investimento, visto que existe a necessidade de incluir 3 transformadores de corrente com nível de isolamento aproximadamente 0.5 pu do nível básico de isolamento (NBI) da linha. No entanto, quando considerado o custo de indisponibilidade do sistema de compensação reativa para o SIN, o investimento necessário para a implementação desta topologia se torna irrisório.

A filosofia de proteção tem como principal característica a ponte de Wheatstone. O equilíbrio de corrente é obtido com a igualdade do produto das capacitâncias dos dois setores diagonais, conforme apresentado na Figura 38 e na equação (21).

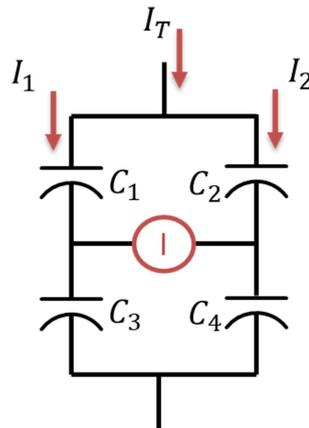


Figura 38 - Ponte de Wheatstone capacitiva

$$C_1 * C_4 = C_2 * C_3 \quad (21)$$

Neste caso, diferentemente da conexão dupla estrela, a corrente de desequilíbrio é obtida através do divisor de corrente formado entre os quatro quadrantes de capacitância de

cada fase, individualmente. A corrente de desequilíbrio é calculada em função da corrente de fase (I_T), conforme equação (22).

$$I_{Desequilíbrio} = I_T \cdot \left(\frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 \cdot C_4 + C_3^2} - \frac{C_2 \cdot C_1}{C_1 \cdot C_2 + C_1^2} \right) \quad (22)$$

As mesmas considerações realizadas para a configuração dupla estrela são válidas para esta topologia ponte H. As metodologias de mitigação da interferência no sistema de proteção, devido a compensação do desequilíbrio, se aplicam da mesma forma. Neste caso, a compensação ocorrerá quando a queima de elementos ocorrer de forma alternada entre as diagonais da ponte H, conforme Figura 39. Importante ressaltar que nesta topologia, todas as metodologias corretivas deverão ser aplicadas em cada fase individualmente.

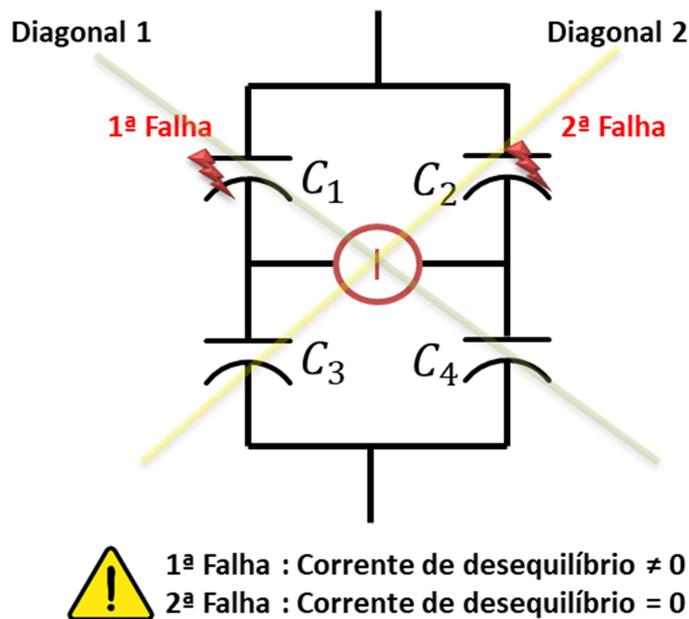


Figura 39 - Fenômeno da compensação na topologia ponte H

A configuração ponte H possui proteção de desequilíbrio independente nas três fases, Figura 37, utilizando-se de três canais individuais de corrente no relé de proteção do banco. Portanto, no momento de uma falha, a identificação do alarme e trip pode ser realizada de maneira individual, mostrando ao usuário qual das três fases sensibilizou os ajustes pré-determinados. Conseqüentemente, a operação de manutenção poderá ser executada de forma mais rápida e objetiva, reduzindo a indisponibilidade do equipamento.

Após apresentado as configurações dupla estrela e ponte H, assim como os pontos positivos e negativos quanto a disponibilidade e melhorias no sistema de identificação de falhas, outro fator relevante que deve ser avaliado é o balanceamento.

3.5 Balanceamento de bancos de capacitores

Conforme mencionado nos capítulos anteriores, o balanceamento deve ser realizado para equilibrar a distribuição de tensões e correntes entre as unidades capacitivas. Quando o equipamento está equilibrado, garante-se que todas as UCs estarão operando dentro dos valores nominais especificados. Portanto, a variável que representa a real situação do balanceamento é denominada corrente de desequilíbrio natural.

A corrente de desequilíbrio natural é a corrente de desequilíbrio resultante quando o banco de capacitores não apresenta nenhuma unidade falhada. Logo, o momento adequado para avaliação deste parâmetro é após a primeira energização ou na energização posterior a realização de medição de capacitância em todas unidades, e comprovado que nenhum capacitor possui elementos queimados.

A recomendação para o valor de desequilíbrio aceitável é que, o módulo desta corrente, esteja abaixo do nível de corrente resultante da queima de um elemento capacitivo. Isto porque, o valor da corrente de desequilíbrio natural não poderá interferir na interpretação do sistema de proteção quando da queima de um elemento interno.

Basicamente, o objetivo principal é que toda falha existente no banco de capacitores sensibilize o sistema de proteção, garantindo confiabilidade operativa ao operador. Portanto, estando a corrente de desequilíbrio natural em níveis superiores aos recomendados, no momento da falha de elementos, poderá ocorrer a compensação de corrente e resultar em um sinal de falso zero, conforme mostrado na Figura 40.

Claramente, o balanceamento inadequado resulta em diversos pontos negativos para a operação do BC. Na Figura 40 exemplifica o caso onde toda a filosofia de proteção foi prejudicada devido a corrente de desequilíbrio natural estar superior ao valor estabelecido neste trabalho.

A metodologia de mitigação desta interferência é a aplicação da técnica da corrente de desbalanceamento natural inferior a queima do primeiro elemento. A Figura 41 exemplifica o caso de queima de elementos capacitivos em um banco balanceado corretamente.

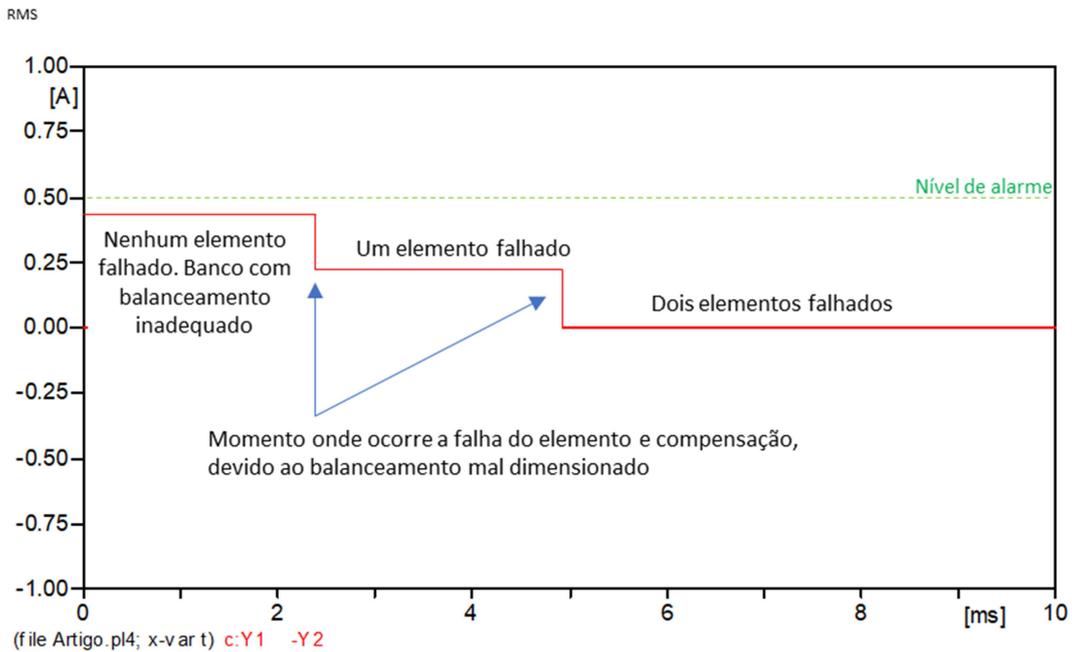


Figura 40 - Balanceamento inadequado prejudicando a proteção

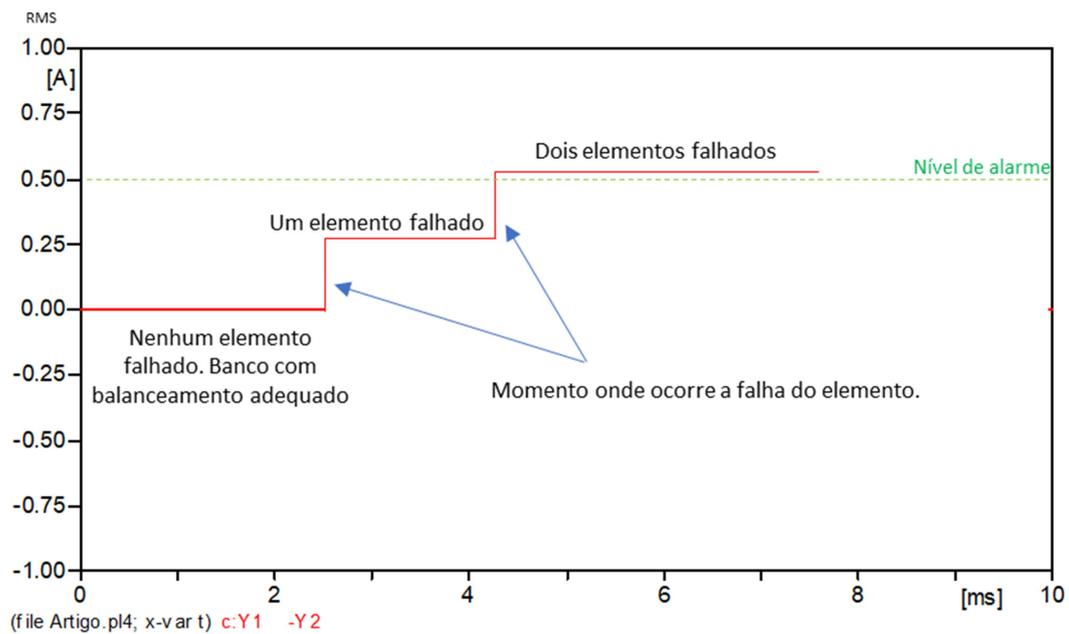


Figura 41 - Balanceamento adequado e correto funcionamento da proteção

A informação dos níveis de correntes oriundos da queima de elementos internos é de responsabilidade do fabricante, devendo ser informado ao cliente no momento da entrega do produto. A Tabela 7 representa uma análise prática, onde verifica-se os níveis admissíveis para corrente de desequilíbrio natural em um banco de capacitores com as características descritas na Tabela 8. Os dados informados referem-se a um banco de capacitores real, em

operação no nordeste brasileiro, e a corrente de desequilíbrio natural obtida no comissionamento foi 0.01 A.

Tabela 7 - Memorial de desequilíbrio e limite para o desequilíbrio natural

Número de Fusíveis Atuados	Capacitância da Unidade Afetada	Q _u / Q _n	Capacitância da Fase Afetada	Q _p / Q _b	Tensão na Unidade Afetada	Tensão nos Elementos Afetados	Corrente na Unidade Afetada	Corrente na Fase Afetada	Corrente de Desequilíbrio entre os Neutros	
f	Q _u (μF)	%	Q _p (μF)	%	V _{ou} (pu)	V _e (pu)	I _u (pu)	I _{ph} (pu)	I _n (A)	
0	9.03	0.00%	1.50	0.00%	1	1	1	1	0	
1	8.86	-1.82%	1.50	-0.08%	1.02	1.11	0.999	0.999	0.03	Desequilíbrio
2	8.67	-4.00%	1.50	-0.17%	1.04	1.25	0.997	0.999	0.07	Natural Máximo
3	8.42	-6.67%	1.50	-0.30%	1.07	1.42	0.995	0.998	0.12	ALARME
4	8.12	-10.00%	1.50	-0.46%	1.10	1.65	0.992	0.997	0.18	
5	7.74	-14.29%	1.49	-0.68%	1.15	1.98	0.989	0.995	0.28	TRIP
6	7.22	-20.00%	1.49	-1.02%	1.23	2.46	0.983	0.993	0.41	
7	6.50	-28.00%	1.48	-1.57%	1.35	3.25	0.974	0.989	0.63	

AJUSTES DEFINIDOS PARA A PROTEÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Máxima corrente de desequilíbrio natural aceitável	0.031	A
Alarme	0.12	A
Trip	0.28	A

Tabela 8 - Dados nominais do banco de capacitores e unidades capacitivas

DADOS DO SISTEMA		
Tensão Nominal	Unom =	245 kV
Frequência Nominal	fnom =	60 Hz

DADOS DO BANCO DE CAPACITORES		
Núm. de Capacitores em Série	S =	12
Núm. de Capacitores em Paralelo	Pt =	2
Tensão Efetiva	Ub =	245 kV
Potência Efetiva	Qb =	34 Mvar
Corrente Efetiva	Ib =	80.2 A
Capacitância Efetiva	Cb =	1.50 μ F

DADOS DA UNIDADE CAPACITIVA		
Tensão Nominal	Uc =	V
Potência Nominal	Qc =	kvar
Corrente Nominal	Ic =	40.1 A
Capacitância Nominal	Cnom =	9.03 μ F
Núm. Grupos Série de Elementos	Su =	6
Elementos em Paralelo / Grupo	N =	10

Os níveis de corrente de desequilíbrio praticado nos neutros, ou no meio da ponte H, são muito pequenos quando comparado com a corrente nominal do equipamento. Durante a fase de balanceamento em fábrica, utiliza-se os dados de capacitância das UCs obtidas durante o ensaio de rotina devido a qualidade da medição. Os capacitores são ensaiados na tensão nominal, com frequência nominal e temperatura conhecida, portanto é possível realizar a normalização das medidas para uma temperatura comum a todas as unidades. Assim, o balanceamento é definido objetivando a mínima corrente de desequilíbrio, conforme apresentado neste capítulo.

No entanto, o balanceamento realizado em fábrica pode ser considerado como teórico, uma vez que muitas são as variáveis externas que interferem no resultado obtido em campo. A seguir serão apresentados três fatores relevantes que contribuem para ocorrência de divergência entre a corrente de desequilíbrio calculada para a corrente de desequilíbrio medida.

- Transporte das unidades

Durante o transporte das UCs, até o local de destino, muitos são os choques mecânicos e deslocamentos ocorridos no percurso. Internamente, as unidades capacitivas são compostas por elementos capacitivos interligados e embebidos em líquido isolante, portanto os choques mecânicos podem resultar em micro deslocamentos entre os materiais e deslocamento do óleo, provocando pequenas alterações na capacitância da UC. Pequenas variações de

capacitâncias em muitas unidades podem resultar em desvios significativos nos valores de balanceamento.

- Diferença de temperatura entre as unidades

Quando instaladas em campo, as unidades capacitivas estarão expostas ao ambiente, portanto sujeitas a todas as condições climáticas do local. Conforme estudado no capítulo 2, a temperatura ambiente tem influência direta sobre a capacitância do capacitor. Bancos de capacitores com quantidade elevada de UCs pode ocorrer o fenômeno do sombreamento heterogêneo, tema relevante deste trabalho e que será discutido especificamente no capítulo 4.

- Impedâncias parasitas

O objetivo do balanceamento do banco de capacitores é atingir o equilíbrio de impedâncias entre os ramos monitorados. Sendo assim, toda e qualquer impedância existente no circuito impactará o resultado da corrente observada no neutro, conforme Figura 42. Neste sentido, tem-se como principais causadores de interferência:

- Conexões em condições inadequadas;
- Torque insuficiente dos conectores;
- Comprimento de cabos e barras de conexões com dimensões diferentes, conseqüentemente impedâncias diferentes entre os dois lados monitorados pelo TC de desequilíbrio.

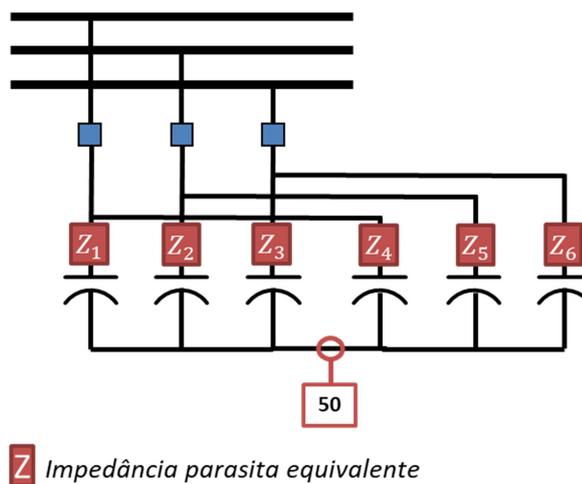


Figura 42 - Circuito equivalente com impedâncias parasitas

Na prática, as interferências mencionadas anteriormente são intrínsecas ao projeto, no entanto algumas, como exemplo transporte, não são possíveis de serem eliminadas. Tendo que

o banco de capacitores deve operar balanceado, independente das interferências existentes no sistema, o equipamento deve entrar em operação com os valores de corrente de desequilíbrio natural dentro dos parâmetros já apresentados.

Uma forma de mitigação destas interferências externas é a utilização do procedimento aplicado durante este trabalho e então denominado “Metodologia para Análise de Balanceamento – MAB”. A seguir será apresentado a MAB, assim como testes práticos realizados em laboratório.

3.6 Metodologia para Análise de Balanceamento - MAB

O objetivo principal da metodologia é permitir ao usuário avaliar a corrente de desequilíbrio natural do banco de capacitores durante o comissionamento, ou seja, antes da energização do banco. Desta forma, caso encontrado valores indesejados de corrente de desequilíbrio, será possível realizar permutas de capacitores para compensar as interferências já mencionadas.

A MAB consiste na inserção de tensão reduzida no banco de capacitores para avaliação da corrente de desequilíbrio. No entanto, devido à baixa tensão nos terminais do banco de capacitores, a corrente de fase circulante será muito reduzida e conseqüentemente a diferença de corrente entre dois ramos será ainda menor. Desta forma, desenvolveu-se um sistema de bobinas contraposta ou bobinas subtratoras, com número de espiras definido, para realizar a subtração dos sinais de corrente dos dois ramos e multiplicar o valor de corrente medida pelo amperímetro diferencial, mostrado na Figura 43. Portanto, a corrente diferencial será multiplicada, resultando em uma corrente elevada lida pelo miliamperímetro.

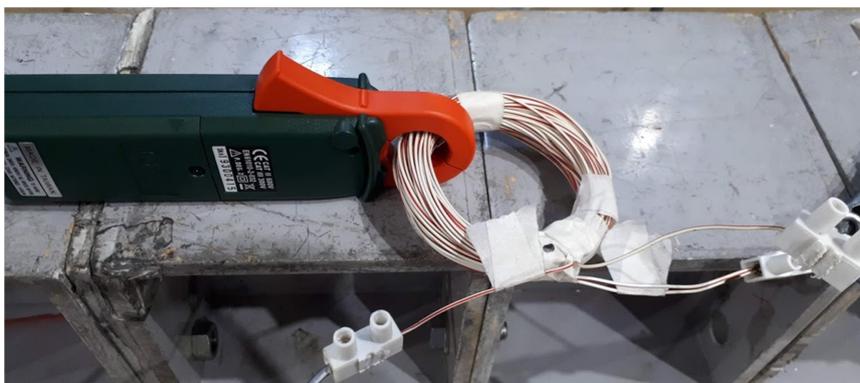


Figura 43 - Bobinas contrapostas para utilização na MAB

O cálculo das bobinas contrapostas depende da corrente de linha que será atingida durante o ensaio, portanto dependente da capacitância do banco ensaiado. Na Figura 44 é apresentado o software desenvolvido para calcular os dados de ensaio, assim como o correto dimensionamento dos equipamentos. Os resultados obtidos a utilização do software estão apresentados na Figura 45.



CONFIGURADOR - MAB

DADOS DOS EQUIPAMENTOS DE TENSÃO

Tensão do Variador Máxima	<input type="text" value="220"/>	V
Tensão Ajustada no Variador	<input type="text" value="220"/>	V
Frequência	<input type="text" value="60"/>	Hz

DADOS DO BANCO DE CAPACITORES

Capacitância do Banco	<input type="text" value="111.49"/>	uF
Tipo de Conexão	<input type="text" value="II"/>	
Corrente de linha	<input type="text" value="500"/>	A
Diferença desejada observar	<input type="text" value="15"/>	mA
Número de espiras do enrolamento	<input type="text" value="50"/>	espiras

Calcular Equipamentos **Limpar**

Figura 44 - Tela inicial do software para cálculo da MAB

CONFIGURADOR - MAB

EQUIPAMENTOS RECOMENDADOS

VARIAC

Primário	220
Secundário	220
Relação	1
Tensão no terminal HV Banco	220 V
Potência exigida	2.03 kVA

BOBINA SUBTRATORA

Fator de multiplicação	50
Corrente nas bobinas	4.62 A
Tempo da medição	120 s
Tensão de isolamento	220 V
Número de espira	50 esp
Quantidade de enrolamento	2
Total de espiras	100 esp

Observação: Deverá ser enrolado em sentidos opostos e intercalando uma espira com a outra para anular o efeito da interferência do campo eletromagnético da linha de transmissão.

Tipo do fio	15 AWG
Corrente Máxima	4.8 A
Resistência	10.3 Ohm/km
Secção	1.65 mm ²
Diâmetro nú	1.45 mm
Diâmetro isolado	1.55 mm
% de espaçamento na bobinagem	1 %
Comprimento total do cilindro bobinado	156.6 mm
Secção total	165 mm ²
Diâmetro Total	14.5 mm
Diâmetro da bobina	80 mm
Raio da bobina	40 mm
Comprimento do condutor	25.1 m

MILIAMPÉRÍMETRO

Corrente medida no clamp de corrente	13.87 mA
Precisão desejada	0.01 mA

Imprimir

Voltar

Figura 45 - Resultado do software para aplicação da MAB

A validação da metodologia foi realizada em laboratório, conforme Figura 46, e utilizando um banco de capacitores com os dados nominais apresentados na Tabela 9. O esquema de ligação dos equipamentos é apresentado na Figura 47, e os equipamentos utilizados neste ensaio estão descritos nas Figura 48 e Figura 49.



Figura 46 - Ensaio realizado em laboratório de alta tensão

Tabela 9 - Banco de capacitores ensaiado com a MAB

DADOS DO BANCO DO CONJUNTO ENSAIADO	
Núm. de Capacitores em Série	S = 1
Núm. de Capacitores em Paralelo	Pt = 8
Tensão Efetiva	Ub = 17.7 kV
Potência Efetiva	Qb = 11.3 Mvar
Capacitância Efetiva	Cb = 1.50 μ F

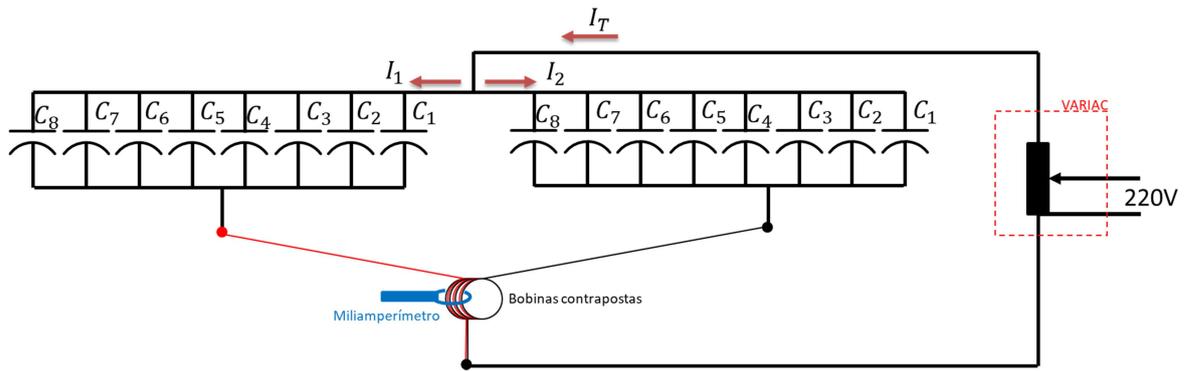


Figura 47 - Diagrama elétrico da metodologia MAB

Range Specifications

Function	Range	Resolution	Accuracy		Overload protect
DC Current	4000mA	1mA	± (2.0% + 3d)		40A DC
	30A	10mA			100A DC
AC Current (True RMS)			50/60Hz	40 to 100Hz	
	400mA	0.1mA	±(1.5% + 5d)	±(2.0% + 5d)	40A AC
			50/60Hz	40 to 1kHz	
	4000mA	1mA	±(2.5% + 5d)	±(3.0% + 5d)	40A AC
	30A	10mA	±(2.0% + 5d)	±(2.5% + 5d)	100A AC
DC Voltage	400V	0.1V	± (1.0% + 2d)		1000V DC
AC Voltage (True RMS)			50/60Hz	40 to 1kHz	
	400V	0.1V	±(1.5% + 4d)	±(2.0% + 5d)	800V AC



Figura 48 - Miliamperímetro Exttech 380942



Figura 49 - VARIAC modelo Tdgc2-2KVA/VTM-2KVA

Os resultados obtidos com o ensaio foram satisfatórios, pois o sistema de medição teve resolução suficiente para medir a corrente de desequilíbrio nas bobinas subtratoras. A amplitude da corrente encontrada no ensaio estava na mesma ordem de grandeza do valor teórico calculado. Visando reduzir a corrente de desequilíbrio, foi realizada a alteração no posicionamento de duas unidades capacitivas. As medições posteriores mostraram melhora significativa na corrente, mostrando a eficácia do método, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Resultado do ensaio utilizando a MAB

	Ensaio 1 Condição Inicial	Ensaio 2 Rebalanceado
Corrente no VARIAC [A]	7.8	7.9
Tensão de ensaio [V]	220	220
Corrente no miliamperímetro [A]	3.01	1.92
Relação das bobinas	50	50
Corrente real no neutro [A]	0.0602	0.0384

Capítulo 4 – Insolação heterogênea

O tema sobre variação de capacitância devido a alteração da temperatura ambiente desenvolvido no Capítulo 2 será de fundamental importante para o entendimento da problemática abordada neste capítulo. Basicamente, o objetivo principal desta etapa do trabalho é demonstrar o impacto negativo que a interferência externa pode gerar em um banco de capacitor de grande porte.

Bancos de capacitores de grande porte são constituídos por centenas de unidades capacitivas por fase. A distribuição dos capacitores é realizada de forma verticalizada, ou seja, os conjuntos de capacitores são instalados um sobre o outro, visando assim otimizar espaço, conforme ilustrado na Figura 50.



Figura 50 - Banco de capacitores série (Fonte: GE)

No entanto, ao agregar uma quantidade grande de unidades capacitivas pode surgir problemas que são visualizados na prática, mas até então não estudado de maneira aprofundada. As torres de unidades capacitivas, quando mal posicionadas espacialmente, são capazes de provocar o efeito denominado neste trabalho por Insolação Heterogênea.

Insolação heterogênea é quando a incidência solar direta ocorre em apenas um determinado lado da torre de capacitores, provocando assim um aquecimento não homogêneo nas unidades capacitivas do banco de capacitores, facilmente observado na Figura 51. O fenômeno aqui descrito é facilmente observado em bancos série, uma vez que, as torres capacitivas são menos espaçadas devido ao custo elevadíssimo do metro quadrado da plataforma.

O efeito do sombreamento pode resultar em variações de capacitância significativas, e quando considerado o número de unidades capacitivas afetadas, o valor da alteração de capacitância de uma fase total resulta no deslocamento da corrente de desbalanço. Em alguns casos, a variação na corrente de neutro resulta na atuação indevida da proteção, como um caso real estudado na região nordeste do país, que por motivo de sigilo industrial não pode ser citada neste trabalho. Portanto, esta é uma interferência externa na proteção dos bancos de capacitores e será analisada neste trabalho, assim como serão apresentadas formas de mitigação.

Inicialmente realizou-se um ensaio para avaliar o grau de impacto do sombreamento na variação de temperatura de uma unidade capacitiva padrão. Montou-se um experimento onde uma unidade capacitiva ficou exposta à incidência solar direta e outra unidade ficou protegida, conforme Figura 52, os valores de temperatura das peças foram monitorados durante o dia todo. Os resultados obtidos estão representados na Figura 53 e inseridos na Tabela 11.



Figura 51 - Caso de sombreamento heterogêneo (Fonte: GE)

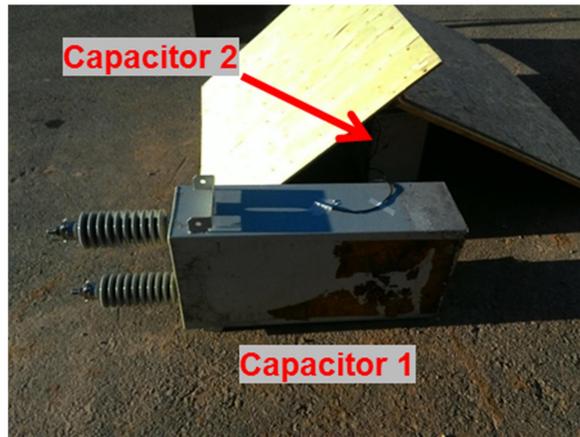


Figura 52 - Experimento para levantamento da curva de temperatura em unidades expostas a incidência solar direta

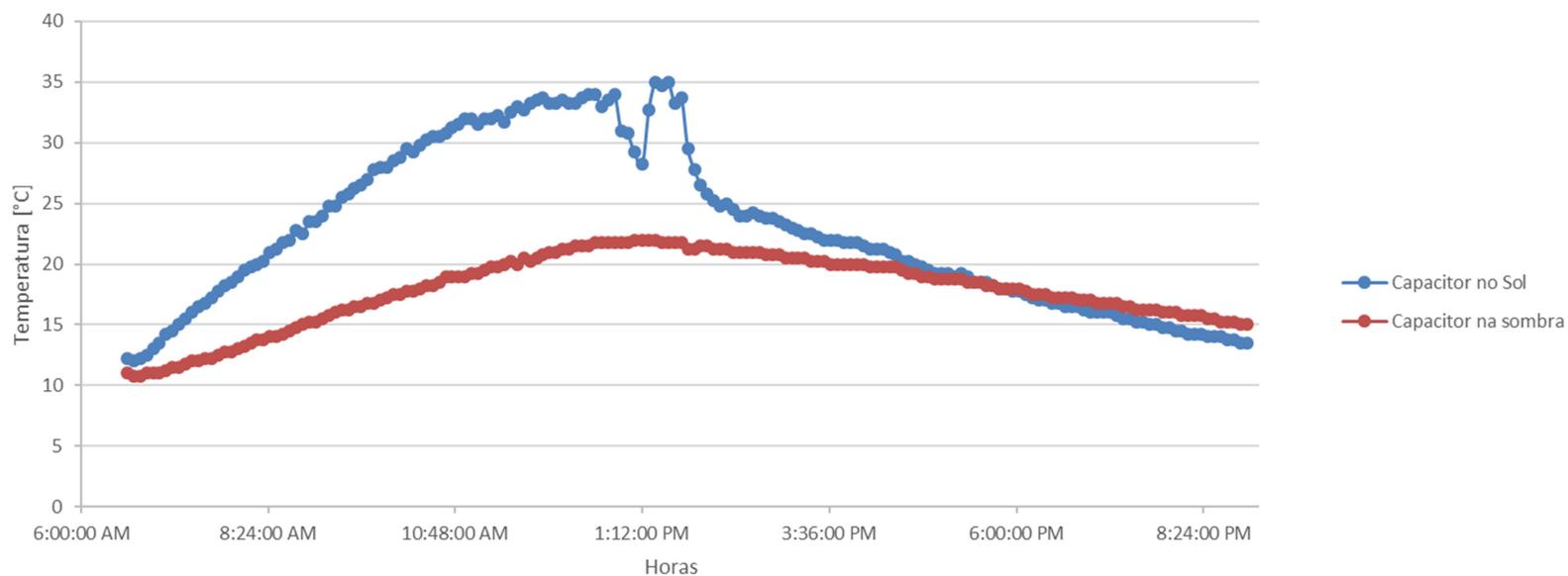


Figura 53 - Monitoramento da temperatura das unidades capacitivas ensaiadas no tempo

Tabela 11 - Dados nominais das unidades ensaiadas e resultados do experimento

DADOS DA UNIDADE CAPACITIVA		
Capacitância Nominal	9.28	uF
Tensão Nominal	12.125	kV
Potência Nominal	500	kvar
Cor da unidade capacitiva	RAL 7035	
DADOS DO ENSAIO		
Máxima diferença de temperatura entre as duas unidades	13.25	°C
Máxima diferença de capacitância entre as duas unidades	0.48	uF

O resultado do experimento explicitou a variação significativa da capacitância quando a UC é submetida a sombreamento. Portanto ficou comprovado que a interferência externa no valor da capacitância ocorre neste tipo de situação, estando o sistema de proteção exposto a falsas variações de corrente de desequilíbrio.

Este fenômeno foi identificado em um caso real de banco de capacitores série no nordeste brasileiro. As capacitâncias sofrem influência do sombreamento heterogêneo, resultando na flutuação da corrente de desequilíbrio do banco, conforme apresentado na Figura 54.

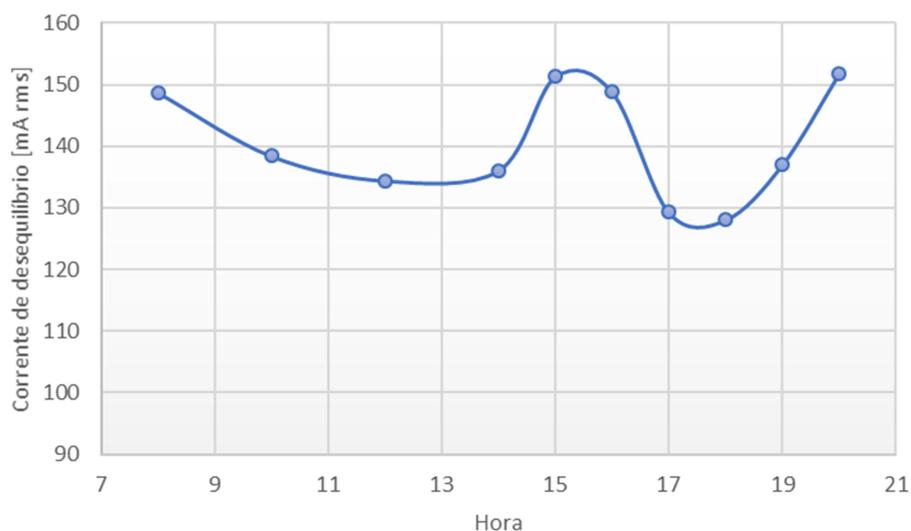


Figura 54 - Evolução da corrente de desequilíbrio em um caso real

Tendo que a incidência solar direta resulta no aquecimento da UC, uma forma inicial para minimizar o impacto dessa interferência é utilizar cores claras na pintura dos capacitores. Analisando a diferença de tonalidade entre as cores usuais para equipamentos elétricos, existe uma diferença significativa e que resulta em uma maior ou menor reflexão da luz solar. Conseqüentemente, quanto maior a reflexão da superfície onde ocorrerá a incidência luminosa, menor será a temperatura interna devido a absorção de energia térmica [22]. Na Figura 55 é possível observar a diferença de tonalidade entre as cores



Figura 55 - Diferença de tonalidade entre as cores mais usuais para capacitores

Adicionalmente, o sombreamento heterogêneo pode ser mitigado tanto fisicamente, ajustando o posicionamento do equipamento no momento da construção, quanto ajustando parâmetros adequados no sistema de proteção do equipamento. A seguir serão apresentadas três maneiras para solucionar o problema exposto neste capítulo.

Avaliação da disposição física do equipamento

A mitigação por meio da avaliação espacial da instalação do equipamento consiste em analisar, no momento da concepção do projeto da subestação, o deslocamento do sol durante o dia, permitindo assim que a incidência solar ocorra de forma homogênea no banco de capacitores, evitando o fenômeno do sombreamento heterogêneo. No entanto, a aplicação desta metodologia apresenta algumas dificuldades, como a não disponibilidade de área para instalação do equipamento na direção necessária, além da dificuldade em preparar toda a subestação para receber o banco de capacitores no posicionamento adequado. Na Figura 56 é apresentado o objetivo desta proposta de mitigação.

Nesta mesma linha de pensamento, a escolha do tipo de conexão ponte H elimina este tipo de interferência, uma vez que a incidência solar sempre estará impactando as duas diagonais principais, conforme já apresentado no capítulo 3.

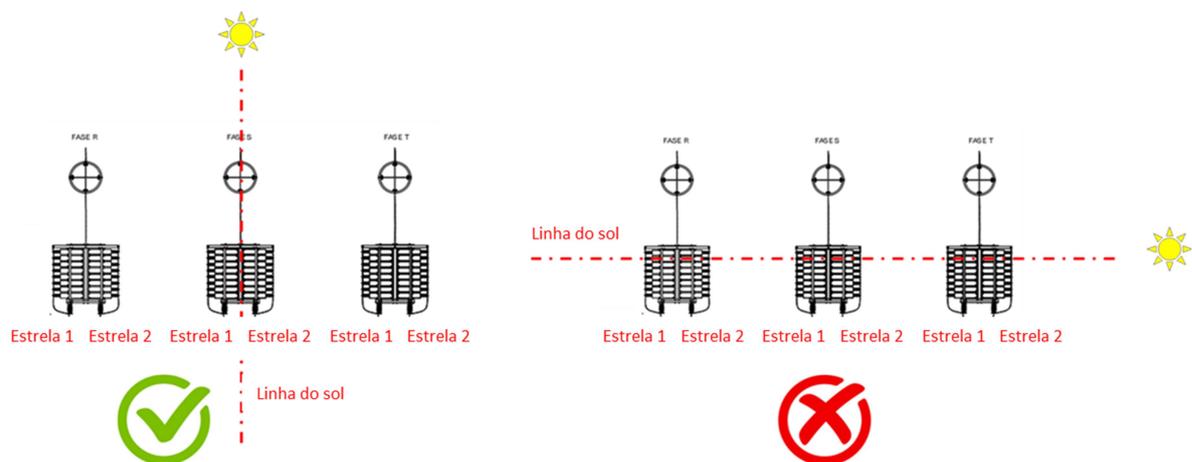


Figura 56 - Posicionamento do banco de capacitores para reduzir o sombreamento heterogêneo

Inserção da variável temperatura na curva de proteção

Outra forma de mitigação da interferência da temperatura seria realizar a inserção da variável temperatura na curva de proteção do banco de capacitores, ou seja, o monitoramento seria realizado avaliando as variáveis de interesse, corrente ou tensão e a temperatura ambiente. Os parâmetros de proteção seriam alterados de acordo com as medições de

temperatura, permitindo assim uma proteção dinâmica e adaptativa. O sistema de proteção pode ser observado na Figura 57.

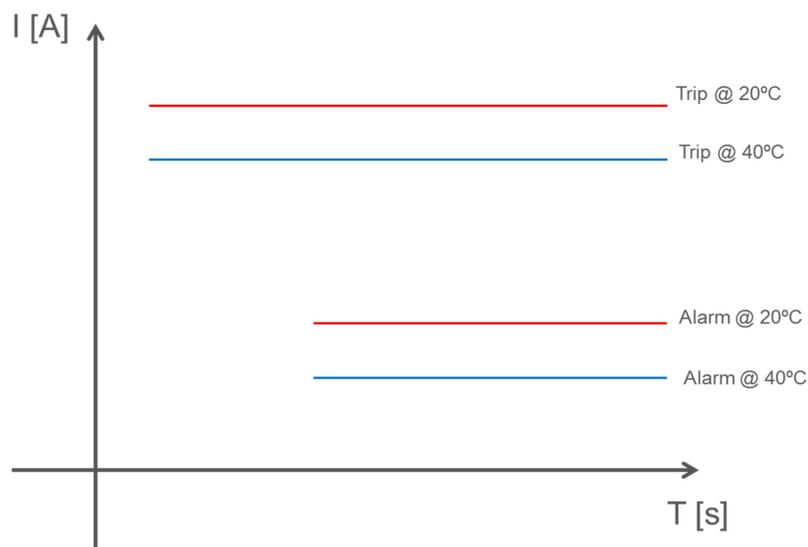


Figura 57 - Sistema de proteção adaptativo

Neste caso, o ideal é utilizar duas sondas de temperaturas em cada fase do banco. Desta forma será possível avaliar o real desequilíbrio de temperatura entre as faces do banco de capacitores. Dessa forma, seria realizado o monitoramento do balanceamento das temperaturas, não somente o balanceamento de corrente do banco. Quando a diferença das medições térmicas atingir os valores ajustados, inicia-se os reajustes dos parâmetros de proteção do banco, conforme Figura 57.

Proteção programada com alterações horárias

A proteção horária consiste na observação do comportamento da corrente ou tensão de desequilíbrio durante um determinado período. Com a curva de variação é possível determinar os horários onde a variável de interesse obteve seus valores alterados. Sendo assim deve-se parametrizar a proteção com 2 ajustes de alarme e trip, sendo um para condição normal, horários onde o fenômeno do sombreamento heterogêneo não tem grande relevância e o segundo ajuste para os horários onde o fenômeno gera alterações significativas nas leituras.

Esta metodologia de mitigação não é eficiente, uma vez que existem períodos do ano onde a incidência solar é menor, até mesmo em dias nublados. Portanto o ajuste secundário entrará em operação mesmo quando não houver necessidade. Um exemplo da proteção com esta metodologia pode ser observado na Figura 58.

Sendo assim, dentre as três formas de mitigação apresentadas cada uma possui suas dificuldades de implementação, mas é importante ressaltar que a implementação destas

metodologias na proteção de banco de capacitores de grande porte é de fundamental importância, visto que estes equipamentos estão se tornando cada vez mais importantes para o sistema e sua indisponibilidade pode resultar em prejuízos de grande monta, muito superior aos investimentos necessários para adequação do sistema protetivo.

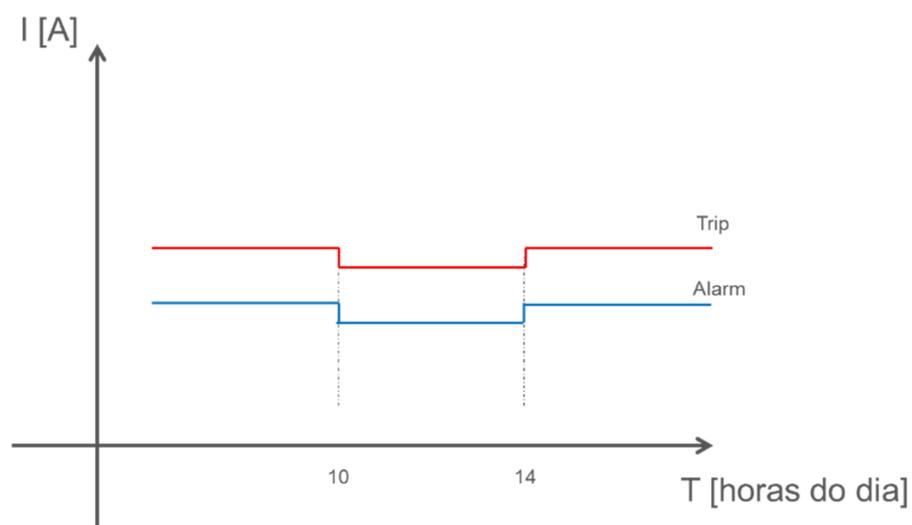


Figura 58 - Ajustes da proteção sazonal

Conclusão

Com tudo discutido anteriormente, os bancos de capacitores são equipamentos relevantes para o sistema, conseqüentemente devem atender aos requisitos de disponibilidade do ONS. No entanto, os sistemas de proteção atualmente utilizados estão sujeitos a interferências externas e balanceamentos inadequados que podem resultar em indisponibilidade. O presente trabalho apresentou diversas formas de mitigação de interferências no sistema de proteção.

Analisou-se inicialmente a composição das unidades capacitivas, visando entender e explicar a origem da variação de capacitância com a temperatura, possibilitando a compreensão da problemática do sombreamento heterogêneo. Com isso foram apresentadas maneiras adequadas para evitar que a incidência solar ocasione a sensibilização da proteção de maneira indevida. Adicionalmente, foi apresentado a possibilidade da utilização de tintas com tonalidades mais claras para evitar o aquecimento da unidade capacitiva, reduzindo assim a interferência do aquecimento.

Outro ponto relevante neste trabalho está relacionado com o balanceamento, onde foi discutido os problemas existentes devido a distribuição inadequada das unidades capacitivas em um banco de capacitores. Foram apresentadas metodologias de mitigação, assim como explicações dos fenômenos existentes devido ao desequilíbrio. A metodologia para análise de balanceamento apresentada teve por objetivo fornecer uma possibilidade de verificação do balanceamento, antes mesmo da energização do equipamento.

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de expor as problemáticas existentes em campo e apresentar soluções práticas. Todos os tipos de interferência na proteção mencionados foram analisados profundamente, buscando não somente evidenciar, mas sim justificar por meio teórico a origem do problema.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa observou-se, nesse campo do conhecimento, um horizonte de oportunidades de melhoria e aprimoramento das técnicas de proteção utilizadas atualmente para este tipo de equipamento. As metodologias utilizadas são simplórias e susceptíveis a inúmeras interferências, onde algumas delas foram citadas neste documento. As simples melhorias discutidas resultarão em um aumento significativo na confiabilidade e disponibilidade dos bancos de capacitores de grande porte.

Finalmente, após a visibilidade alcançada com o desenvolvimento deste trabalho, novas oportunidades surgiram e que deverão ser exploradas como continuidade desta pesquisa. Uma proposta de trabalho futuro é o desenvolvimento de um sistema inteligente para detecção de falhas internas através da análise do sinal de proteção, ou seja, identificar o posicionamento da unidade danificada sem a necessidade de desligamento do banco de capacitores. Outra possibilidade de desenvolvimento de trabalhos futuros é o desenvolvimento

de equipamentos para detecção de unidades falhada e análise de balanceamento, por exemplo, uma mala de testes específica para verificação de balanceamento de banco de capacitores.

Referências

- [1] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. [Online] 03 de Outubro de 2019. <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- [2] R. Natarajan, Power System Capacitors. CRC Press, Boca Raton, FL, 2005
- [3] Danemar, Ake e Lovkvist, Thomas. "Reliability calculations for capacitor Banks". IEEE Power Engineering Review; 83 WM 161-7; pp 3116-3122; ASEA KABEL AB, S-126 12. Stockholm, Sweden: s.n., September de 1983.
- [4] S. Samineni, C. Labuschagne and J. Pope, "Principles of shunt capacitor bank application and protection," 2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2010, pp. 1-14. doi: 10.1109/CPRE.2010.5469505
- [5] T. Smith, "Determining settings for capacitor bank protection," 2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2010, pp. 1-9. doi: 10.1109/CPRE.2010.5469510
- [6] E. Price and R. Wolsey, "String Current Unbalance Protection and Faulted String Identification for Grounded-Wye Fuseless Capacitor Banks," proceedings of the 65th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, May 2011
- [7] H. H. Race, "Capacitance and loss variations with frequency and temperature in composite insulation," in Electrical Engineering, vol. 52, no. 1, pp. 52-52, Jan. 1933.
- [8] R. Moxley, J. Pope and J. Allen, "Capacitor bank protection for simple and complex configurations," 2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2012, pp. 436-441. doi: 10.1109/CPRE.2012.6201251
- [9] Smith, Terrence. "Determining Settings for Capacitor Bank Protection". IEEE GE Digital Energy/Multilin; 978-1-4244-6075-5/10/\$26.00 ©. 2010.
- [10] Horton, Randy; Warren, Ted; Fender, Karl; Harry, Steven; Gross, Charles A. "Unbalance protection of fuseless, split-wye, grounded, shunt capacitor Banks". IEEE Transactions on Power Delivery, 0885-8977/02\$17.00 © 2002 IEEE. July de 2002. Vol. 17. 3.
- [11] FRONTIN, S. O. ; Alexandre Maduro-Abreu ; DAJUZ, A. ; SALGADO, F. M. ; AMON FILHO, J. ; JARDINI, J. A. ; KASTRUP FILHO, O. ; VAISMAN, R. ; MORAIS, S. A. . Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1. ed. Brasília: Goya Editora Ltda, 2013. v. 1. 934p

- [12] Sarjeant, W. J.; MacDougall, F. W.; Larson, D. W.; Kohlberg, I. "Energy storage capacitors aging and diagnostic approaches for life validation". CAIEEE Transactions on Magnetics. January de 1997. Vol. 33. 1.
- [13] IEEE Std 18. IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
- [14] IEEE Std 1036. IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors
- [15] http://www.shinetsu-film.co.jp/e/products/pdf/ppfilm_r_e.pdf. Acessado em: 29 de agosto de 2020.
- [16] B. Riddle, J. Baker-Jarvis and J. Krupka, "Complex permittivity measurements of common plastics over variable temperatures," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 51, no. 3, pp. 727-733, March 2003, doi: 10.1109/TMTT.2003.808730.
- [17] <https://pt.scribd.com/document/76706618/%E9%9B%BB%E5%AE%B9%E5%99%A8%E7%B5%95%E7%B7%A3%E6%B2%B9BDV-%E9%BB%8F%E5%BA%A6-SAS-40E>. Acessado em: 29 de agosto de 2020.
- [18] Tatum, Jeremy. "5.14: Mixed Dielectrics". Disponível em: <[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Book%3A_Electricity_and_Magnetism_\(Tatum\)/05%3A_Capacitors/5.14%3A__Mixed_Dielectrics](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Book%3A_Electricity_and_Magnetism_(Tatum)/05%3A_Capacitors/5.14%3A__Mixed_Dielectrics)>. Acesso em: 29 de agosto de 2020.
- [19] Mei Zhongyuan and Lue Qiaoqing, "The research on the space factor of high voltage power capacitors impregnated all PP film/foil," [1991] Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, 1991, pp. 736-739 vol.2, doi: 10.1109/ICPADM.1991.172171.
- [20] http://www.rectiphaseindia.com/ht_capacitors.html. Acessado em: 30 de agosto de 2020.
- [21] B. Kasztenny, J. Schaefer and E. Clark, "Fundamentals of adaptive protection of large capacitor banks," 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, Clemson, SC, 2007, pp. 154-186, doi: 10.1109/PSAMP.2007.4740911.
- [22] Guler C, Keles A, Guler MS, Karagoz S, Cora ÖN, Keskin G. Thermal Conductivity of Different Colored Compomers. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials. January 2017:e362-e368. doi:10.5301/jabfm.5000349
- [23] E. M. Vaciloto Filho, Marcelo Ricardo de Moraes R. C. Campos, L. S. e. Silva, "Avaliação da sensibilidade da proteção entre os diversos tipos de topologias de ligação de bancos de capacitores", XXV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Belo Horizonte, 2019.

[24] E. M. Vaciloto Filho, A. L. O. e. de Silva, R. C. Campos, L. E. B. da Silva, L. S. e. Silva and R. Rossi, "Methodology For Mitigation Of Interferences In The Protection System Of Capacitor Banks In Medium And High Voltage," 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA), Lima, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511710.



Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

AValiação DA SENSIBILIDADE DA PROTEÇÃO ENTRE OS DIVERSOS TIPOS DE TOPOLOGIAS DE LIGAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

**EVANDRO MARCOS VACILOTO(1); RICARDO CARVALHO CAMPOS(2); MARCELO RICARDO DE MORAES(3);
LEANDRO SOUZA SILVA(4);
GE Grid(1);GE Grid(2);GE Grid(3);GE Grid(4);**

RESUMO

Bancos de capacitores são equipamentos de grande relevância para o sistema elétrico de potência e a indisponibilidade destes pode ocasionar prejuízos consideráveis, visto que os mesmos são componentes fundamentais para compensação reativa e filtragem de harmônicos do sistema. O principal componente deste equipamento são propriamente as unidades capacitivas e existem basicamente três tipos de tecnologias para proteção destas: Fusível interno (FI), fusível externo (FE) e fuseless. A proteção do banco de capacitores está relacionada com a proteção das unidades e alguns esquemas de proteção são frequentemente utilizados, como exemplo dupla estrela e ponte H.

O artigo visa analisar os diversos tipos de proteção, comparando a sensibilidade frente à queima de elementos internos das unidades capacitivas, discutindo aspectos como: compensação de desequilíbrio devido a queima de elementos em ramos paralelos, queima de elementos em um mesmo grupo paralelo e principalmente a variação e instabilidade da corrente de desequilíbrio frente a influências externas aos bancos de capacitores, como por exemplo, fatores ambientais.

PALAVRAS-CHAVE

Banco de capacitores, proteção, confiabilidade, operação

1.0 - INTRODUÇÃO

A utilização de banco de capacitores pode proporcionar muitos benefícios para o sistema elétrico, com reflexos positivos na qualidade e no custo da energia elétrica disponibilizada aos consumidores. A utilização da compensação capacitiva pode resultar em grande economia, possibilitando a postergação de investimentos estruturais na rede, como construção de novas linhas de transmissão e subestações.

Alguns dos benefícios proporcionados pela utilização de banco de capacitores serão listados a seguir, podendo este ser aplicado no sistema de transmissão e distribuição de energia e sistemas industriais:

- Controle de tensão;
- Correção do fator de potência;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Redução das perdas;
- Filtragem de harmônicos, quando utilizados com reatores e devidamente sintonizado (Filtros passivos).

Bancos de capacitores são equipamentos de grande relevância para o sistema elétrico de potência e a indisponibilidade destes pode ocasionar prejuízos consideráveis, visto que os mesmos são componentes fundamentais para compensação reativa, conforme mostrado na Figura 1, e filtragem de harmônicos do sistema. A indisponibilidade de equipamentos elétricos no sistema resulta em multas e prejuízos financeiros de grande relevância.

Visando reduzir os prejuízos ocasionados pela indisponibilidade de equipamentos como banco de capacitores, técnicas de proteção estão sendo constantemente aprimoradas, objetivando a proteção efetiva contra defeitos, resguardando os mesmos de danos mais severos, além de garantir a correta detecção das falhas, evitando o desligamento equivocado e consequentemente evitando multas e restrição de receita.

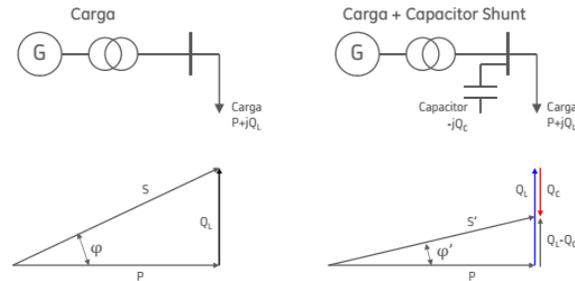


FIGURA 1 – Compensação reativa

Bancos de capacitores são formados basicamente por unidades capacitivas conectadas em série e paralelo, obtendo uma tensão nominal coerente com o sistema no qual o mesmo será instalado e com uma potência nominal equivalente consonante com a necessidade reativa do sistema, conforme a Figura 2. [1]

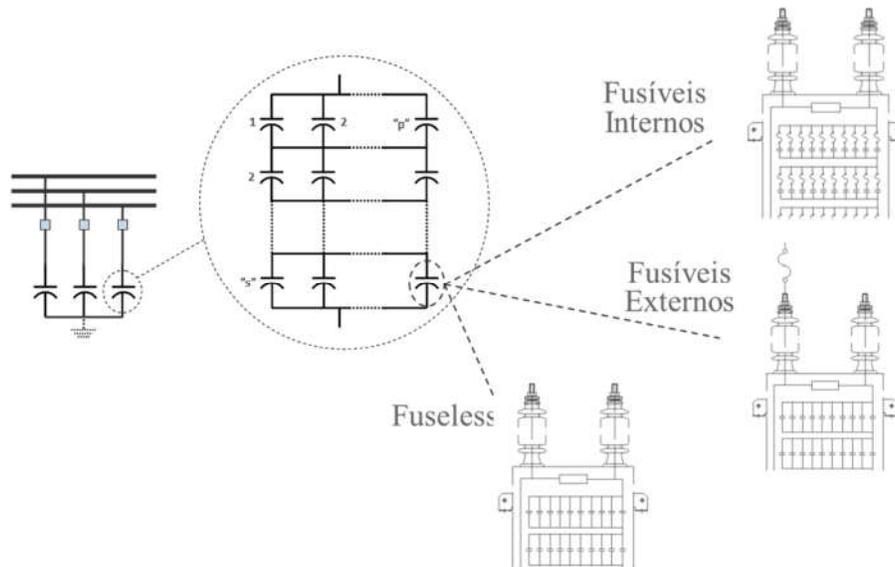


FIGURA 2 – Composição do banco de capacitores

As unidades capacitivas que compõe o banco de capacitor podem apresentar três tipos básicos de proteção, apresentados na Figura 2:

- **Fusível interno:** Cada elemento capacitivo interno a unidade capacitiva possui proteção individual por meio de fusível, comumente do tipo K. Quando a corrente exceder o limite de condução do elo, o mesmo se rompe abrindo a conexão deste elemento, isolando-o e garantindo a integridade do capacitor.
- **Fusível externo:** Toda a unidade capacitiva é protegida por um único elemento fusível externo. Quando a corrente da unidade capacitiva exceder o limite de condução do elo, o mesmo se rompe abrindo a conexão do capacitor garantindo a integridade do banco de capacitor. Comumente utilizado para unidades capacitivas de baixa potência.
- **Fuseless:** Os elementos capacitivos não apresentam proteção individual. O projeto desta unidade capacitiva é diferenciado, garantindo a continuidade da operação mesmo com alguns elementos capacitivos danificados.

As conexões dos bancos de capacitores podem ser feitas basicamente das seguintes formas: Estrela simples, dupla estrela, ponte H, podendo ser aterrado ou isolado e delta, conforme mostra a Figura 3.

Conforme apresentado na Figura 2 o banco de capacitor é formado por unidades capacitivas que por sua vez são formadas por elementos capacitivas. A principal proteção para este tipo de equipamentos é monitorar a quantidade de elementos capacitivos danificados, assim determinar o momento adequado e seguro para realizar a intervenção necessária. [2]

A proteção de desequilíbrio tem a função de quantificar e indicar a queima dos elementos capacitivos. Basicamente a filosofia desta proteção consiste em identificar a intensidade da corrente ou tensão no ramo de medição. Dependendo do tipo de ligação a posição do transformador de medida pode ser diferente, caracterizando assim o tipo da proteção e conseqüentemente a sensibilidade, precisão e confiabilidade.

Portanto, o presente trabalho busca esclarecer pontos relevantes para auxiliar na definição de parâmetros importantes para concepção dos sistemas de proteção de bancos de capacitores, discutindo temas pouco difundidos e de importância significativa, como a influência de fatores externos nos parâmetros da proteção de desequilíbrio, quando da utilização das configurações dupla estrela, conforme Figura 4, configuração essa mais difundida nos bancos de capacitores aplicados na média e alta tensão.[3]

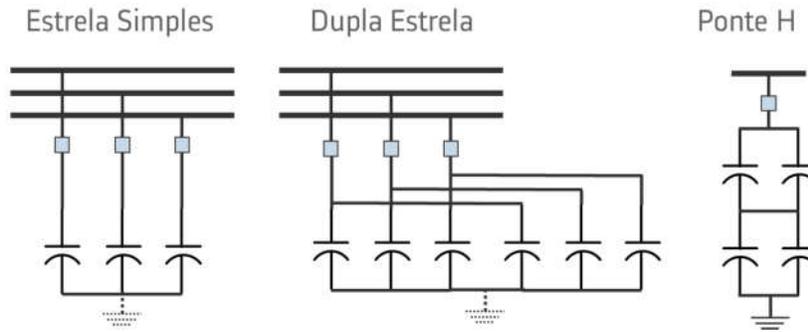


FIGURA 3 – Exemplos de conexões

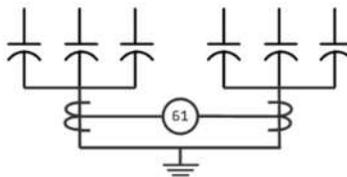


FIGURA 4 – Ligação dupla estrela isolada

1.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As proteções básicas utilizadas para realizar a proteção de banco de capacitores, conectados em dupla estrela, consiste basicamente na comparação entre os dois lados da estrela. A variação de capacitância resulta por sua vez na variação de corrente e tensão, indicando assim a ocorrência de falhas internas nas unidades capacitivas.

Durante o processo produtivo das unidades capacitivas, muitas são as variáveis que podem interferir na capacitância dos elementos capacitivos. Portanto os valores nominais apresentam variações que podem chegar a 5% em relação ao valor nominal. Sendo assim, durante a montagem das unidades capacitivas no banco de capacitores, deve-se realizar o balanceamento das capacitâncias, garantindo assim o balanceamento das fases e conseqüentemente reduzir a divergência de capacitâncias entre os lados das estrelas, conseqüentemente reduzir o desequilíbrio natural do banco de capacitores.

Na grande maioria, as filosofias de proteção utilizadas não são capazes de proteger totalmente os bancos de capacitores contra falhas internas nas unidades capacitivas, uma vez que a queima de elementos capacitivos em posições opostas resultam na redução da corrente de desequilíbrio medida, conseqüentemente na falsa indicação. Na Figura 5 é possível observar as possibilidades de compensação de correntes existentes nas filosofias comumente utilizadas nos equipamentos de compensação reativa dos sistemas de distribuição e transmissão.

Assim como o fenômeno descrito anteriormente, a variação de temperatura de forma heterogenea nos grandes bancos de capacitores podem resultar em um falso desequilíbrio e ocasionar o desligamento do banco de capacitores. Devido ao grande número de capacitores existentes nestas aplicações, juntamente com a metodologia de proteção empregada nestes casos, a filosofia de proteção deve ser aprimorada considerando o efeito da temperatura sobre os valores das capacitâncias.

A variação de temperatura ambiente resulta por sua vez a variação de temperatura do óleo, conseqüentemente a temperatura do filme de polipropileno e da folha de alumínio se altera, resultando em variações dimensionais, resultando assim na variação da capacitância. Conforme podemos observar na Figura 6, a montagem do elemento capacitivo é realizada com duas placas condutoras (Folha de alumínio), separadas por um material dielétrico (Filme de polipropileno e óleo isolante).

Portanto, a variação da área do eletrodo, juntamente com a alteração da distância entre os mesmos, resulta na variação da capacitância. O aquecimento do óleo isolante e conseqüentemente a elevação da temperatura dos

materiais condutores e dielétricos, resulta na expansão volumétrica do óleo e consequentemente no aumento da distância entre as placas condutoras, resultando assim na diminuição da capacitância. Ensaios empíricos realizados em amostras diversas de unidades capacitivas fabricadas afirmam a teoria da expansão volumétrica e distanciamento das placas condutoras, resultando na diminuição da temperatura, conforme podemos observar na Figura 7. [4] [5]

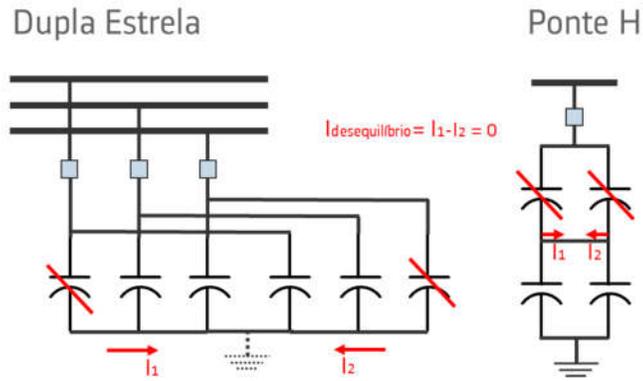


FIGURA 5 – Compensação da corrente de desequilíbrio

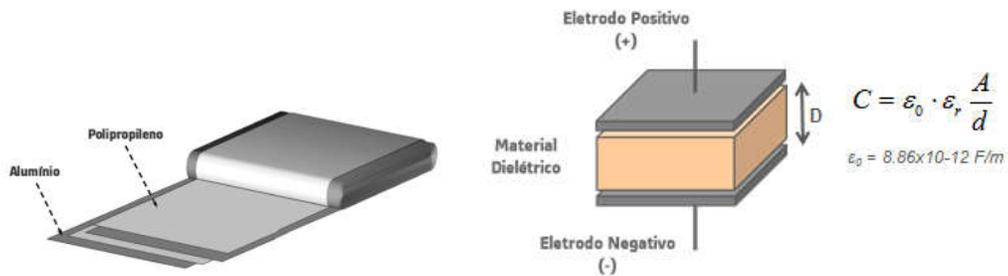


FIGURA 6 – Elemento capacitivo

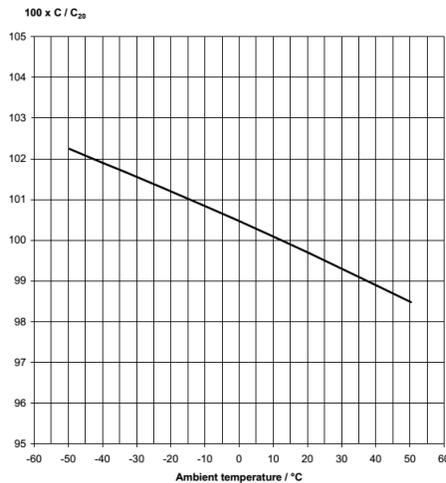


FIGURA 7 – Variação típica da capacitância em função da temperatura ambiente

Sendo assim, com os experimentos realizados em diversas amostras pode-se comprovar a taxa de variação da capacitância em função da temperatura ambiente, levantando assim Equação 1:

$$C' = C_0 - \Delta T * k \quad (1)$$

Onde:

- C': Capacitância final
- C₀: Capacitância inicial
- ΔT: Variação de temperatura
- k: Coeficiente de variação

2.0 - ESTUDOS DE CASOS

A presente seção contempla a análise dos casos proposto neste artigo e os efeitos dos fenômenos descritos anteriormente no sistema de proteção dos bancos de capacitores.

- CASO 1: SENSIBILIDADE DA PROTEÇÃO

Neste estudo de caso analisou-se a sensibilidade da proteção para dois tipos de filosofia de proteção, fusível interno e fuseless, observando a angulação da curva de elevação da corrente de desequilíbrio. Conforme representado na Tabela 1, a topologia considerando capacitores sem fusíveis apresenta um acréscimo de corrente maior se comparado com a tecnologia fusível interno. Sendo assim, a variação de corrente por número de elementos atuados é mais significativa quando considerado capacitores sem proteção interna, conforme Figura 8.

- CASO 2: COMPENSAÇÃO DA CORRENTE DE DESEQUILÍBRIO

Conforme apresentado nas seções anteriores, o fenômeno descrito é comum nos casos onde a topologia de proteção consiste na comparação entre os lados do banco de capacitores, conforme Figura 9. Na Figura 10 estão apresentados os resultados considerando a queima de unidades capacitivas opostas, resultando na compensação mencionada. O fenômeno de queima dos elementos capacitivos normalmente ocorre nos grupos séries já comprometido, ou seja, a tendência é que após a queima de 1 elemento dentro da unidade capacitiva a probabilidade de dano nos elementos paralelos a este é maior, uma vez que estarão submetidos a maior tensão e corrente.

TABELA 1 – Comparativo da variação de corrente de desequilíbrio para os dois casos apresentados

	Quantidade de elementos atuados	Variação da capacitância da unidade	Corrente de desequilíbrio [A]	ΔI/ΔC
Fuseless YY Série: 4 Paralelo: 4	1	12.50%	1.42	0.11
	2	28.57%	2.93	0.1
	3	50%	4.53	0.09
	4	80%	6.23	0.08
Fusível Interno Ponte H Série: 7 Paralelo: 2	1	-2.22%	0.375	0.08
	2	-4.76%	0.82	0.08
	3	-7.69%	1.357	0.08
	4	-11.11%	2.015	0.08

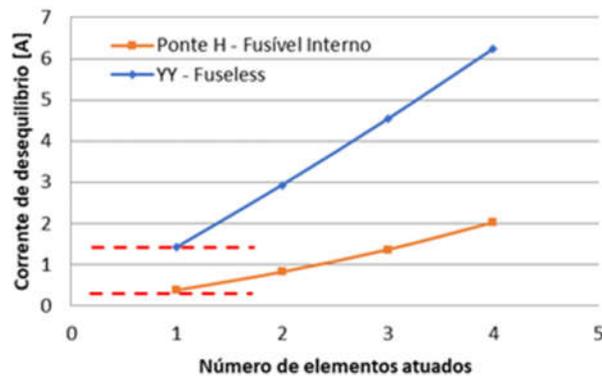


FIGURA 8 – Crescimento da corrente de desequilíbrio

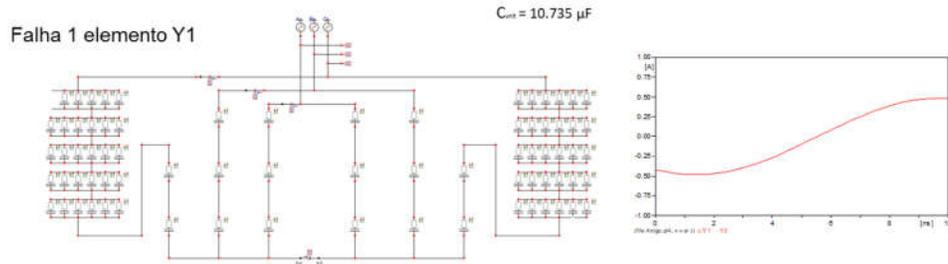
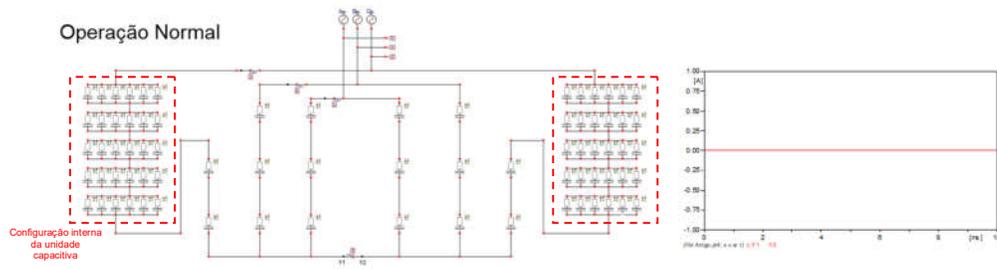


FIGURA 9 – Corrente de desequilíbrio em operação normal

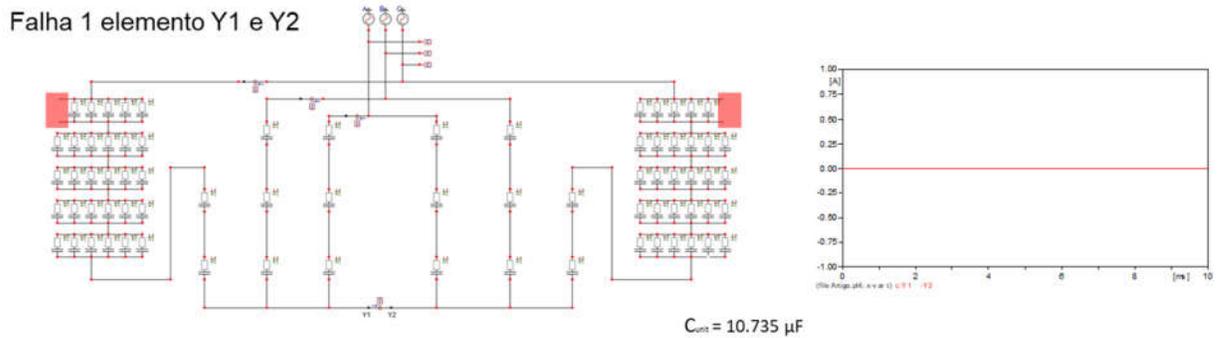


FIGURA 10 – Corrente de desequilíbrio em caso de compensação

Nestes casos uma forma possível de reduzir os impactos deste fenômeno é a utilização de 2 sinais de alarme, onde o primeiro será sensibilizado após a queima do primeiro elemento, mostrando ao operador que o banco de capacitores já apresenta unidades capacitivas com elementos danificados. Outra forma de mitigação é o registro contínuo da corrente de desequilíbrio, assim será possível analisar todas as alterações de sentido da corrente de desequilíbrio, conforme apresentado na Figura 11.

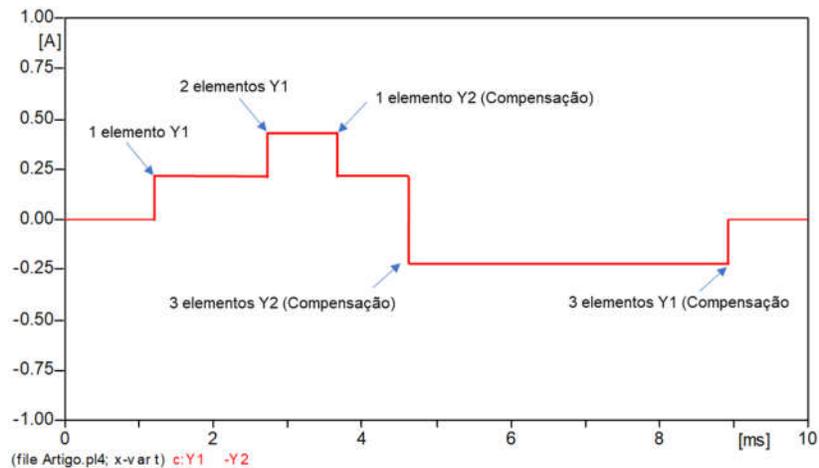


FIGURA 11 – Acompanhamento da corrente de desequilíbrio

- CASO 3: SOMBREAMENTO HETEROGÊNEO

Visando comprovar a possibilidade da variação da capacitância com a temperatura ambiente e o efeito do sombreamento heterogêneo em banco de capacitores, realizou-se um ensaio no campo para verificar a existência de tal fenômeno. Devido as dificuldades em acessar equipamentos já em operação, realizou-se o ensaio em duas unidades capacitivas reais e com as mesmas características físicas e elétricas. Inicialmente ambas as unidades capacitivas foram posicionadas no solo, conforme a posição normal de instalação nos bancos de capacitores. Posteriormente uma das unidades capacitivas foi coberta, simulando o sombreamento heterogêneo, ou seja, as unidades capacitivas de uma estrela sombreando a estrela oposta.

Assim foi instalado um logger de temperatura, onde se registrou a variação de temperatura durante o dia. O ensaio foi realizado no estado de Minas Gerais, Brasil, onde a amplitude térmica não é uma das maiores do país, portanto o resultado obtido pode apresentar valores de variação de capacitância ainda maiores em regiões onde a amplitude térmica é maior e a incidência solar é mais intensa. O resultado da variação da temperatura na superfície das unidades capacitivas pode ser observado na Figura 12.

O resultado obtido evidenciou o esperado, a diferença de temperatura entre as duas unidades capacitivas chegou a ser de 13.5°C. Considerando a curva de variação de capacitância com a temperatura, levantada no tópico anterior, podemos concluir que a variação de capacitância entre as duas unidades atingiu 0.48µF.

Portanto, a variação de capacitância obtida, considerando um banco de capacitores com quantidade significativa de unidades capacitivas, pode ocasionar alterações consideráveis na corrente ou tensão de desequilíbrio, levando o sistema de proteção a uma atuação indevida.

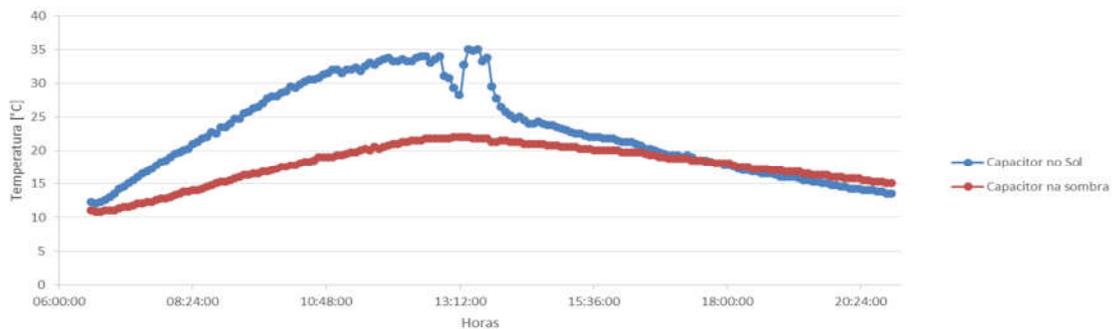


FIGURA 12 – Variação da temperatura na superfície das unidades capacitivas

A mitigação por meio da avaliação espacial da instalação do equipamento consiste em analisar, no momento da concepção do projeto da subestação, o deslocamento do sol durante o dia, permitindo assim a instalação do banco de capacitores de maneira a “receber” a incidência solar de forma homogênea, evitando assim o fenômeno do sombreamento heterogêneo. A aplicação desta metodologia apresenta algumas dificuldades, como a não disponibilidade de área para instalação do equipamento na direção necessária, além da dificuldade em preparar toda a subestação para receber o banco de capacitores o posicionamento adequado. Basicamente o funcionamento desta forma de mitigação pode ser observado na Figura 13.

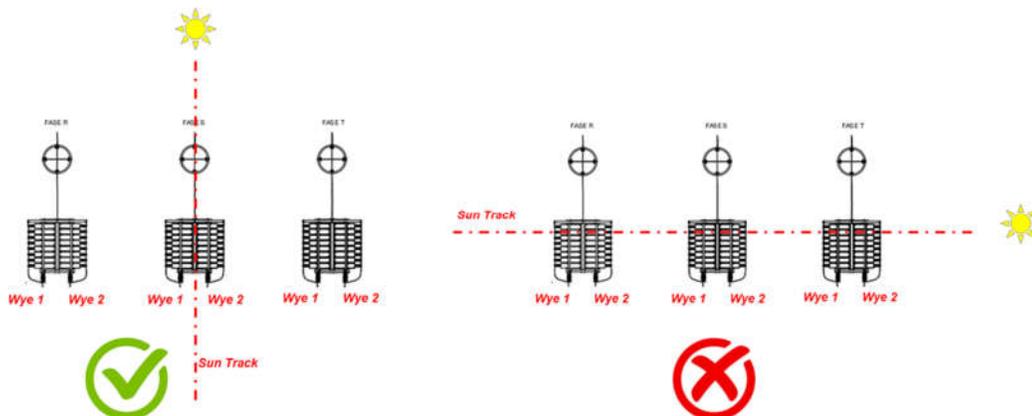


FIGURA 13 – Disposição física do banco de capacitores

Outras formas possíveis para solucionar a influência ambiental nos ajustes de proteção dos bancos de capacitores são através do ajuste da proteção considerando a variável temperatura, ou seja, através da medição da temperatura ambiente realizar a compensação da corrente de desequilíbrio ou simplesmente a alteração horária pré-ajustadas nos parâmetros de alarme e trip do equipamento.

3.0 - CONCLUSÃO

O presente informe técnico apresentou alguns fenômenos que impactam na proteção e operação dos bancos de capacitores, assim como mostrando possíveis formas de mitigação. Toda a análise é fruto de casos reais e com impactos severos na operação e disponibilidade dos equipamentos, resultando em perdas monetárias e transtornos indesejáveis devido a incorreta operação da proteção.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. R. Clark and S. B. Farnham, "Connection and protection of capacitor banks," in *Electrical Engineering*, vol. 69, no. 3, pp. 230-230, March 1950.
- [2] R. Moxley, J. Pope and J. Allen, "Capacitor bank protection for simple and complex configurations," 2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2012, pp. 436-441.
- [3] H.L Santos, J. O. S Paulino, W. C. Boaventura, "Harmonic distortion influence on grounded wye shunt capacitor banks protection: Experimental results", *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 28, no. 3, July 2013.
- [4] H. H. Race, "Capacitance and loss variations with frequency and temperature in composite insulation," in *Electrical Engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 52-52, Jan. 1933.
- [5] A. C. Lynch, "Variation of capacitance with temperature in metallized-mica capacitors," in *Electrical Engineers, Journal of the Institution of*, vol. 1953, no. 10, pp. 336-, October 1953

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Evandro Marcos Vaciloto Filho é natural de Mococa-SP, engenheiro eletricitista (2014) e mestrando pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Possui experiência na área de engenharia elétrica com ênfase em sistemas de potência, com especialidade em tópicos como: qualidade da energia, eletrônica de potência e fontes renováveis de energia elétrica. Atualmente trabalha no desenvolvimento de soluções de qualidade de energia e compensação reativa.</p>
	<p>Ricardo Carvalho Campos engenheiro eletricitista formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI em 2001. Trabalhou na Alstom como Engenheiro de Projetos, de 2002 a 2005, e como Supervisor de Engenharia, de 2007 a 2012. Também trabalhou no Operador Nacional do Sistema Elétrico como Engenheiro de Sistemas de Potência em 2006. Atualmente exerce o cargo de Gerente do Departamento Técnico e Comercial da unidade de Compensação Reativa da Alstom, em Itajubá/MG. É membro regular do IEEE, Cigré Brasil e da SBQEE – Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica.</p>
	<p>Marcelo Ricardo de Moraes engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI em 1999. Trabalha na General Electric como Engenheiro Eletricitista nas áreas de Engenharia, Comercial e Fabril desde 2000. Atualmente exerce o cargo de Gerente de Engenharia e Pesquisa e Desenvolvimento na General Electric em Itajubá/MG</p>
	<p>Leandro Souza e Silva é natural de Gonçalves-MG, engenheiro eletricitista pela UFSJ (2013), MBA em Comércio Exterior e Negócios Internacionais pela FGV (2017). Possui experiência na área de engenharia elétrica com ênfase em sistemas de potência, atualmente exerce a função de especialista em vendas de equipamentos para qualidade de energia e compensação reativa na unidade da GE em Itajubá-MG.</p>

METODOLOGIA PARA MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS NO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Evandro Marcos Vaciloto Filho
General Electric
Itajubá, Brazil
evandrovaciloto@gmail.com

Luiz Eduardo Borges da Silva
Federal University of Itajubá (UNIFEI)
Itajubá, Brazil
leborges@unifei.edu.br

Ricardo Carvalho Campos
General Electric
Itajubá, Brazil
ricardo.campos@ge.com

Ronaldo Rossi
Federal University of Itajubá (UNIFEI)
Itajubá, Brazil
ronaldo_rossi@unifei.edu.br

Leandro Souza Silva
General Electric
Itajubá, Brazil
Leandro.souza@ge.com

Abstract— O artigo tem por objetivo analisar a influência de fatores ambientais na proteção de bancos de capacitores utilizados na média e alta tensão. Propor uma nova visão referente a parametrização da proteção para este tipo de equipamento, levando em consideração as curvas de proteção tradicionais e ajustes de “Offset” sazonal, tornando o sistema de proteção adaptativo, garantindo uma proteção efetiva e seletiva para banco de capacitores.

Index Terms—Capacitor bank, Protection, natural interference.

I. INTRODUCTION

A utilização de banco de capacitores pode proporcionar muitos benefícios para o sistema elétrico, com reflexos positivos na qualidade e no custo da energia elétrica disponibilizada aos consumidores. A utilização da compensação capacitiva pode resultar em grande economia, possibilitando a postergação de investimentos estruturais na rede, como construção de novas linhas de transmissão e subestações.

Alguns dos benefícios proporcionados pela utilização de banco de capacitores serão listados a seguir, podendo este ser aplicado no sistema de transmissão e distribuição de energia e sistemas industriais:

- Controle de tensão;
- Correção do fator de potência;
- Aumento da capacidade de transmissão;

- Redução das perdas;
- Filtragem de harmônicos, quando utilizados com reatores e devidamente sintonizado (Filtros passivos).

Bancos de capacitores são equipamentos de grande relevância para o sistema elétrico de potência e a indisponibilidade destes pode ocasionar prejuízos consideráveis, visto que os mesmos são componentes fundamentais para compensação reativa, conforme mostrado na Figura 1, e filtragem de harmônicos do sistema. A indisponibilidade de equipamentos elétricos no sistema resulta em multas e prejuízos financeiros de grande relevância.

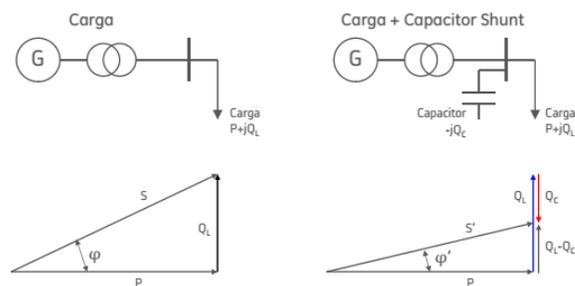


Figura 1 – Compensação reativa

Visando reduzir os prejuízos ocasionados pela indisponibilidade de equipamentos como banco de capacitores, técnicas de proteção estão sendo constantemente aprimoradas, objetivando a proteção efetiva contra defeitos, resguardando os mesmos de danos mais severos, além de garantir a correta detecção das falhas, evitando o desligamento equivocado e consequentemente evitando multas e restrição de receita.

Bancos de capacitores são formados basicamente por unidades capacitivas conectadas em série e paralelo, obtendo uma tensão nominal coerente com o sistema no qual o mesmo será instalado e com uma potência nominal equivalente consonante com a necessidade reativa do sistema, conforme a Figura 2. [1]

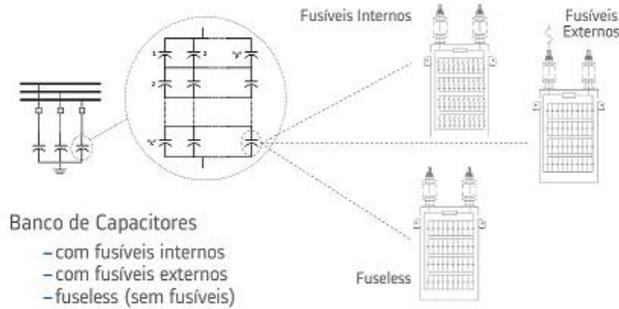


Figura 2 – Composição do banco de capacitores

As unidades capacitivas que compõem o banco de capacitor podem apresentar três tipos básicos de proteção, Figura 2:

- Fusível interno: Cada elemento capacitivo interno a unidade capacitiva possui proteção individual por meio de fusível, comumente do tipo K. Quando a corrente exceder o limite de condução do elo, o mesmo se rompe abrindo a conexão deste elemento, isolando-o e garantindo a integridade do capacitor.
- Fusível externo: Toda a unidade capacitiva é protegida por um único elemento fusível externo. Quando a corrente da unidade capacitiva exceder o limite de condução do elo, o mesmo se rompe abrindo a conexão do capacitor garantindo a integridade do banco de capacitor. Comumente utilizado para unidades capacitivas de baixa potência.
- Fuseless: Os elementos capacitivos não apresentam proteção individual. O projeto desta unidade capacitiva é diferenciado, garantindo a continuidade da operação mesmo com alguns elementos capacitivos danificados.

As conexões dos bancos de capacitores podem ser feitas basicamente das seguintes formas: Estrela simples, dupla estrela, ponte H, podendo ser aterrado ou isolado e delta, conforme mostra a Figura 3.

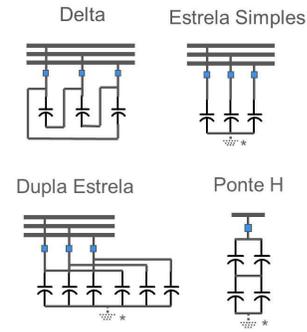


Figura 3 – Tipos de ligação

Conforme apresentado na Figura 2 o banco de capacitor é formado por unidades capacitivas que por sua vez são formadas por elementos capacitivos. A principal proteção para este tipo de equipamentos é monitorar a quantidade de elementos capacitivos danificados, assim determinar o momento adequado e seguro para realizar a intervenção necessária. [2]

A proteção de desequilíbrio tem a função de quantificar e indicar a queima dos elementos capacitivos. Basicamente a filosofia desta proteção consiste em identificar a intensidade da corrente ou tensão no ramo de medição. Dependendo do tipo de ligação a posição do transformador de medida pode ser diferente, caracterizando assim o tipo da proteção e consequentemente a sensibilidade, precisão e confiabilidade.

Portanto, o presente trabalho busca esclarecer pontos relevantes para auxiliar na definição de parâmetros importantes para concepção dos sistemas de proteção de bancos de capacitores, discutindo temas pouco difundidos e de importância significativa, como a influência de fatores externos nos parâmetros da proteção de desequilíbrio, quando da utilização das configurações dupla estrela, conforme Figura 4, configuração essa mais difundida nos bancos de capacitores aplicados na média e alta tensão. [3]

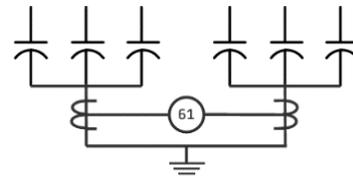


Figura 4 – Ligação dupla estrela aterrada

II. THEORETICAL FOUNDATION

As proteções básicas utilizadas para realizar a proteção de banco de capacitores, conectados em dupla estrela, consiste basicamente na comparação entre os dois lados da estrela. A variação de capacitância resulta por sua vez na variação de corrente e tensão, indicando assim a ocorrência de falhas internas nas unidades capacitivas.

Durante o processo produtivo das unidades capacitivas, muitas são as variáveis que podem interferir na capacitância dos elementos capacitivos. Portanto os valores nominais apresentam variações que podem chegar a 5% em relação ao valor nominal. Sendo assim, durante a montagem das unidades capacitivas no banco de capacitores, deve-se realizar o balanceamento das capacitâncias, garantindo assim o balanceamento das fases e consequentemente reduzir a divergência de capacitâncias entre os lados das estrelas, consequentemente reduzir o desequilíbrio natural do banco de capacitores.

No entanto, equipamentos utilizados em sistemas de média e alta tensão podem apresentar quantidades significativas de unidades capacitivas, principalmente em soluções como: Banco série e TSC (Thyristor switched capacitor). Devido ao grande número de capacitores existentes nestas aplicações, juntamente com a metodologia de proteção empregada nestes casos, a filosofia de proteção deve ser aprimorada considerando o efeito da temperatura sobre os valores das capacitâncias.

A variação de temperatura ambiente resulta por sua vez a variação de temperatura do óleo, consequentemente a temperatura do filme de polipropileno e da folha de alumínio se altera, resultando em variações dimensionais, resultando assim na variação da capacitância. Conforme podemos observar na Figura 5, a montagem do elemento capacitivo é realizada com duas placas condutoras (Folha de alumínio), separadas por um material dielétrico (Filme de polipropileno e óleo isolante). Assim a capacitância pode ser obtida, conforme Figura 6.

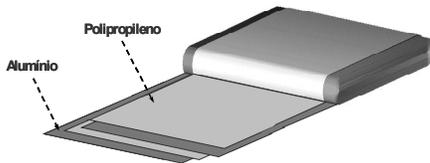


Figura 5 – Elemento Capacitivo

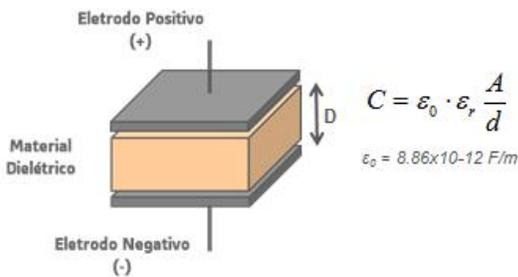


Figura 6 – Equacionamento da capacitância

Portanto, a variação da área do eletrodo, juntamente com a alteração da distância entre os mesmos, resulta na variação da capacitância. O aquecimento do óleo isolante e

consequentemente a elevação da temperatura dos materiais condutores e dielétricos, resulta na expansão volumétrica do óleo e consequentemente no aumento da distância entre as placas condutoras, resultando assim na diminuição da capacitância. Ensaios empíricos realizados em amostras diversas de unidades capacitivas fabricadas afirmam a teoria da expansão volumétrica e distanciamento das placas condutoras, resultando na diminuição da temperatura, conforme podemos observar na Figura 7. [4] [5]

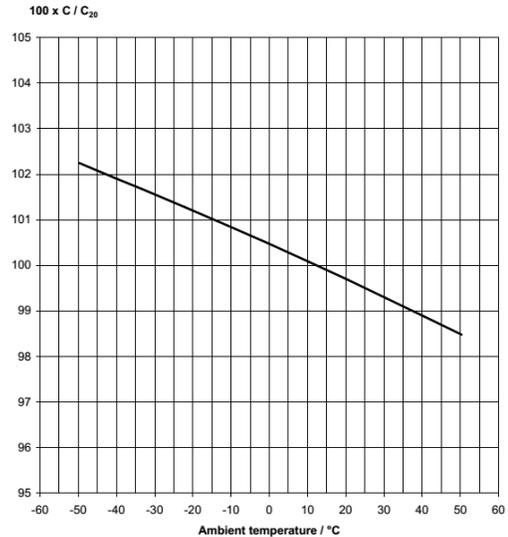


Figura 7 – Variação da capacitância em função da temperatura ambiente

Sendo assim, com os experimentos realizados em diversas amostras pode-se comprovar a taxa de variação da capacitância em função da temperatura ambiente, levantando assim a seguinte equação:

$$C' = C_0 - \Delta T * 0.04$$

Onde:

C' → Capacitância final

C_0 → Capacitância Inicial

ΔT → Variação de temperatura

A. Interferência da temperatura ambiente na proteção

Conforme já mencionado anteriormente, a filosofia da proteção em banco de capacitores conectados em dupla estrela consiste na comparação da capacitância entre as duas estrelas. Portanto se tivermos o fenômeno do sombreamento heterogêneo no banco de capacitores, ou seja, uma estrela estar submetida a incidência solar direta e a outra estrela estiver em uma região sombreada, haverá variação da capacitância podendo alterar a corrente de

desequilíbrio a níveis de alarme e trip, mesmo o equipamento estando em perfeitas condições. A situação descrita é comumente encontrada em bancos de grande porte, com grande quantidade de unidades capacitivas, conforme pode ser observado nas Figuras 8 e 9.



Figura 8 – Banco série



Figura 9 – Sombreamento heterogêneo

B. Verificação prática do efeito do sombreamento heterogêneo

Visando comprovar a possibilidade da variação da capacitância com a temperatura ambiente e o efeito do sombreamento heterogêneo em banco de capacitores, realizou-se um ensaio no campo para verificar a existência de tal fenômeno. Devido as dificuldades em acessar equipamentos já em operação, realizou-se o ensaio em duas unidades capacitivas reais e com as mesmas características físicas e elétricas. Inicialmente ambas as unidades capacitivas foram posicionadas no solo, conforme a posição normal de instalação nos bancos de capacitores. Posteriormente uma das unidades capacitivas foi coberta, simulando o sombreamento heterogêneo, ou seja, as unidades capacitivas de uma estrela

sombreamento a estrela oposta, conforme mostrado na Figura 10. Assim foi instalado um logger de temperatura, onde se registrou a variação de temperatura durante o dia. O ensaio foi realizado no estado de Minas Gerais, Brasil, onde a amplitude térmica não é uma das maiores do país, portanto o resultado obtido pode apresentar valores de variação de capacitância ainda maiores em regiões onde a amplitude térmica é maior e a incidência solar é mais intensa. O resultado da variação da temperatura na superfície das unidades capacitivas pode ser observado na Figura 11.

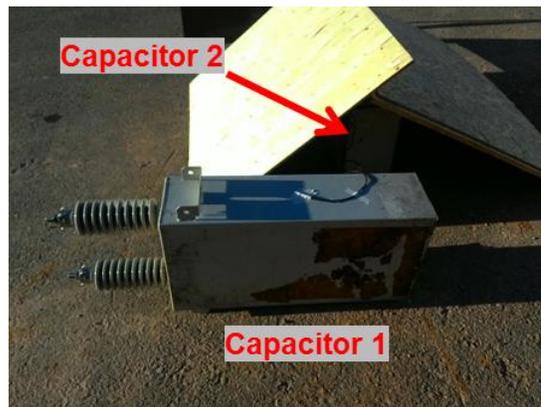


Figura 10 – Teste com os capacitores

O resultado obtido evidenciou o que já era esperado, a diferença de temperatura entre as duas unidades capacitivas chegou a ser de 13.5°C . Considerando a curva de variação de capacitância com a temperatura, levantada no tópico anterior, podemos concluir que a variação de capacitância entre as duas unidades atingiu $0.48\mu\text{F}$.

Portanto, a variação de capacitância obtida, considerando um banco de capacitores com quantidade significativa de unidades capacitivas, pode ocasionar alterações consideráveis na corrente ou tensão de desequilíbrio, levando o sistema de proteção a uma atuação indevida.

C. Formas de mitigação da interferência

A interferência descrita anteriormente pode ser mitigada basicamente de três maneiras:

1) Avaliação da disposição física do equipamento

A mitigação por meio da avaliação espacial da instalação do equipamento consiste em analisar, no momento da concepção do projeto da subestação, o deslocamento do sol durante o dia, permitindo assim a instalação do banco de capacitores de maneira a “receber” a incidência solar de forma homogênea, evitando assim o fenômeno do sombreamento heterogêneo. A aplicação desta metodologia apresenta algumas dificuldades, como a não disponibilidade de área para instalação do equipamento na direção necessária, além da dificuldade em preparar toda a subestação para receber o banco de capacitores

no posicionamento adequado. Basicamente o funcionamento desta forma de mitigação pode ser observado na Figura 12.

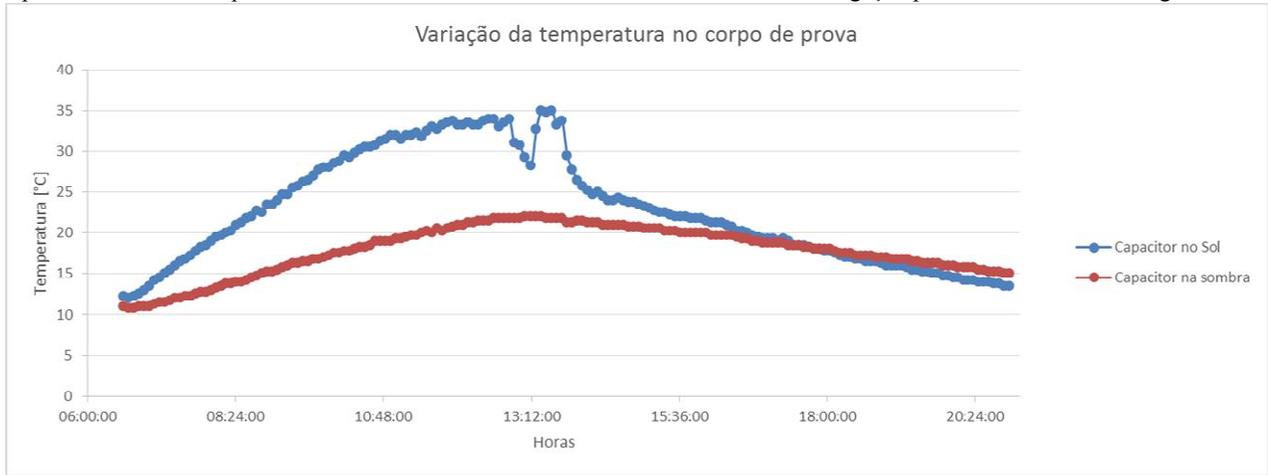


Figura 11 – Variação da temperatura na superfície das unidades capacitivas

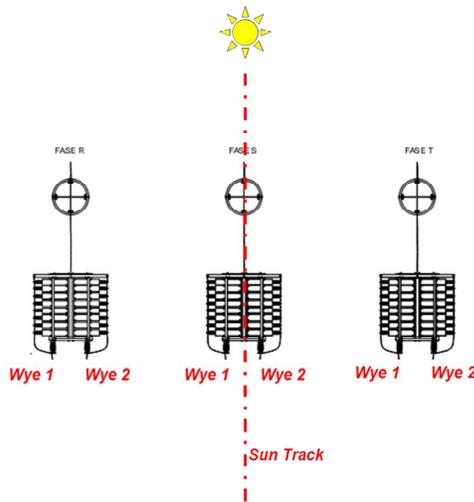


Figura 12 – Posicionamento correto do banco de capacitores

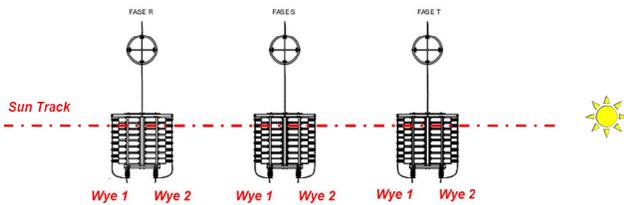


Figura 13 – Posicionamento errado do banco de capacitores

2) Inserção da variável temperatura na curva de proteção

Outra forma de mitigação da interferência da temperatura seria realizar a inserção da variável temperatura na curva de proteção do banco de capacitores, ou seja, o monitoramento seria realizado avaliando as variáveis de interesse, corrente ou

tensão e a temperatura ambiente. Os parâmetros de proteção seriam alterados de acordo com as medições de temperatura, permitindo assim uma proteção dinâmica e adaptativa. O sistema de proteção pode ser observado na Figura 14.

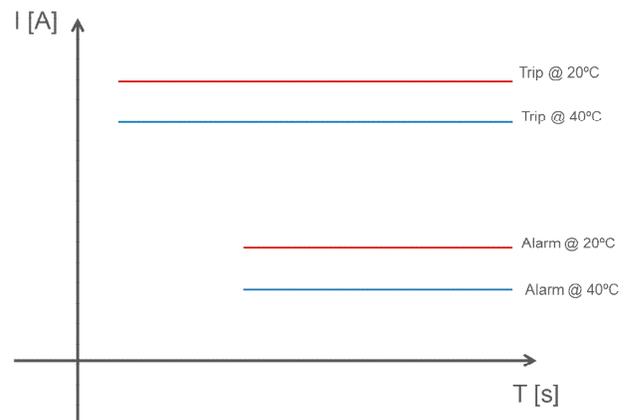


Figura 14 – Proteção adaptativa

3) Proteção programada com alterações horárias

A proteção horária consiste na observação do comportamento da corrente ou tensão de desequilíbrio durante um determinado período de tempo. Com a curva de variação é possível determinar os horários onde a variável de interesse obteve seus valores alterados. Sendo assim deve-se parametrizar a proteção com 2 ajustes de alarme e trip, sendo um para condição normal, horários onde o fenômeno do sombreamento heterogêneo não tem grande relevância e o segundo ajuste para os horários onde o fenômeno gera alterações significativas nas leituras. Esta metodologia de mitigação não é eficiente, uma vez que pode-se ter períodos

do ano onde a incidência solar é menor, até mesmo em dias nublados. Portanto o ajuste secundário entrará em operação mesmo quando não houver necessidade. Um exemplo da proteção com esta metodologia pode ser observado na Figura 15.

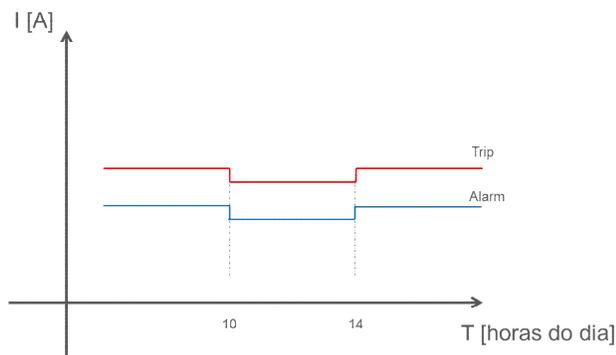


Figura 15 – Proteção adaptativa horária

Sendo assim, dentre as três formas de mitigação apresentadas cada uma possui suas dificuldades de implementação, mas é importante ressaltar que a implementação destas metodologias na proteção de banco de capacitores de grande porte é de fundamental importância, visto que estes equipamentos estão se tornando cada vez mais importantes para o sistema e sua indisponibilidade pode resultar em prejuízos de grande monta, muito superior aos investimentos necessários para adequação da proteção.

III. CONCLUSION

Neste trabalho foi apresentada uma nova visão sobre a proteção de banco de capacitores na configuração dupla estrela, onde interferências ambientais podem ocasionar a atuação indevida do sistema de proteção, resultando em prejuízos monetários, mesmo estando o equipamento em perfeitas condições de operação.

Através de ensaios em unidades capacitivas reais permitiu comprovar a influencia da temperatura ambiente na alteração da capacitância das unidades capacitivas, fato esse que resulta em problemas de desequilíbrio quando da existência do sombreamento heterogêneo.

Bancos de capacitores de grande porte, por apresentar quantidade elevada de unidades capacitivas, estão sujeitos ao sombreamento não uniforme, fato esse que resulta na variação da capacitância em apenas um lado da estrela, resultando em desequilíbrio e sensibilização da proteção.

REFERENCES

[1] N. R. Clark and S. B. Farnham, "Connection and protection of capacitor banks," in *Electrical Engineering*, vol. 69, no. 3, pp. 230-230, March 1950.

- [2] R. Moxley, J. Pope and J. Allen, "Capacitor bank protection for simple and complex configurations," 2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2012, pp. 436-441.
- [3] H.L Santos, J. O. S Paulino, W. C. Boaventura, "Harmonic distortion influence on grounded wye shunt capacitor banks protection: Experimental results", *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 28, no. 3, July 2013.
- [4] H. H. Race, "Capacitance and loss variations with frequency and temperature in composite insulation," in *Electrical Engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 52-52, Jan. 1933.
- [5] A. C. Lynch, "Variation of capacitance with temperature in metallized-mica capacitors," in *Electrical Engineers, Journal of the Institution of*, vol. 1953, no. 10, pp. 336-, October 1953