



**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(1); MARCELO RICARDO DE MORAES(1);  
LEANDRO SOUZA SILVA(1);  
GE Grid(1)**

**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. 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, 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 utilizado 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 conseqüentemente evitando multas e restrição de receita.

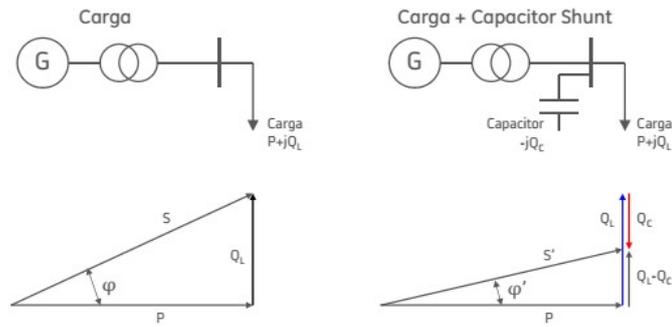


FIGURA 1 – Compensação reativa

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]

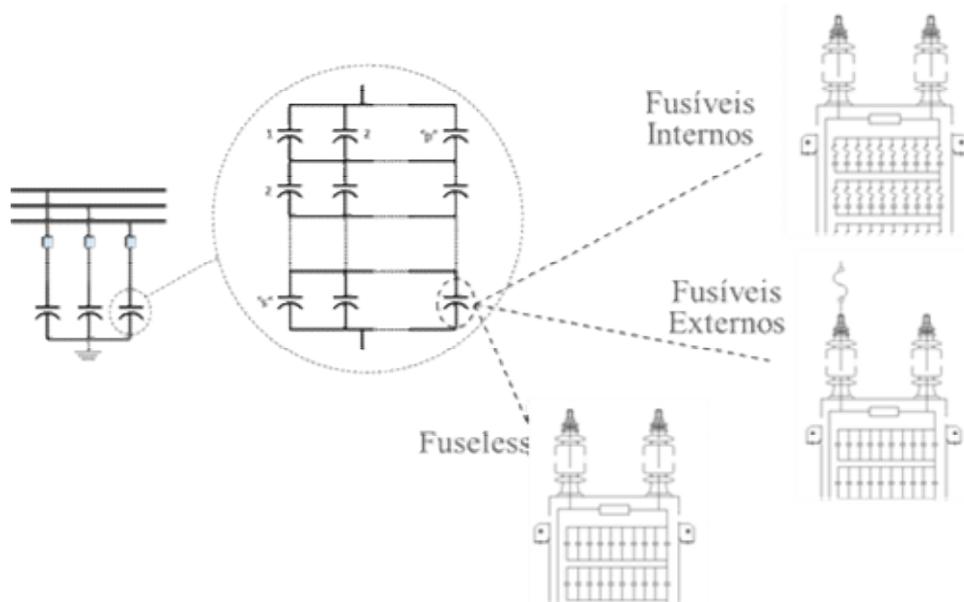


FIGURA 2 – Composição do banco de capacitores

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 capacitivos. A principal proteção para este tipo de equipamento 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]

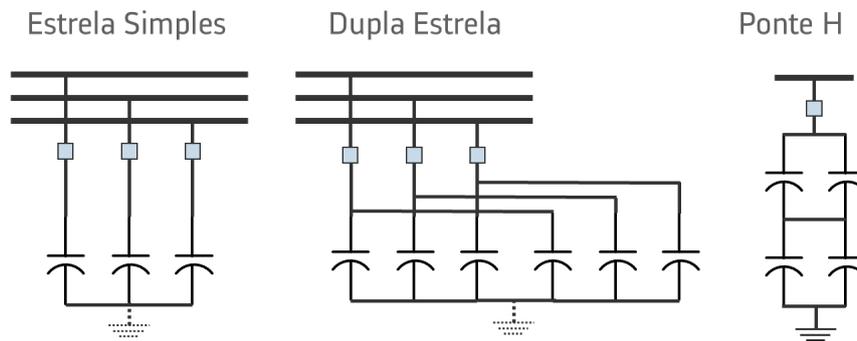


FIGURA 3 – Exemplos de conexões

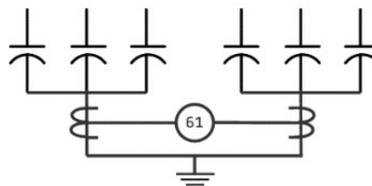


FIGURA 4 – Ligação dupla estrela isolada

## 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 consequentemente reduzir a divergência de capacitâncias entre os lados das estrelas, consequentemente 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 capacitivas em posições opostas resultam na redução da corrente de desequilíbrio medida, consequentemente 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, 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 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 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]

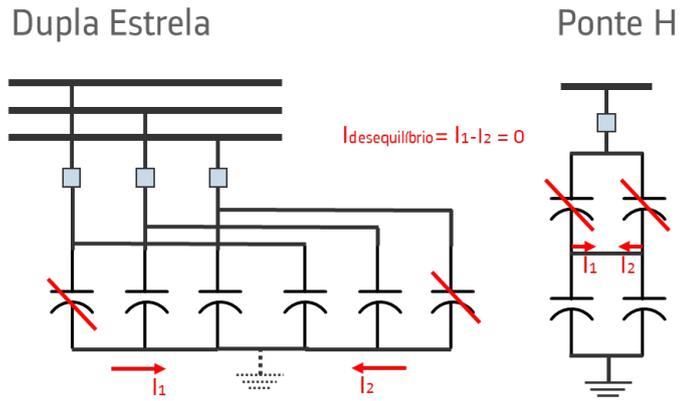


FIGURA 5 – Compensação da corrente de desequilíbrio

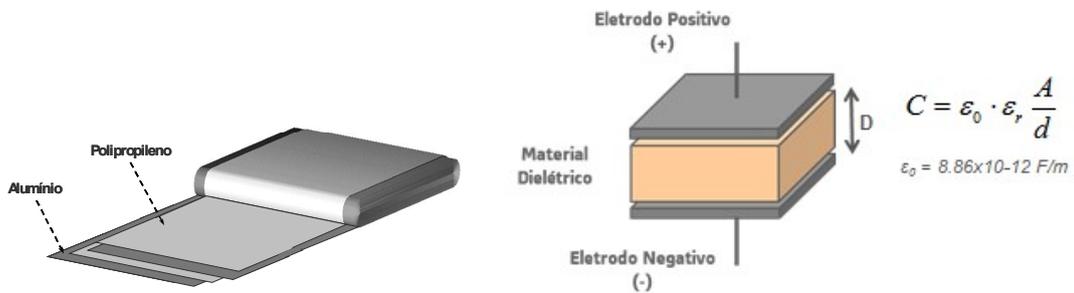


FIGURA 6 – Elemento capacitivo

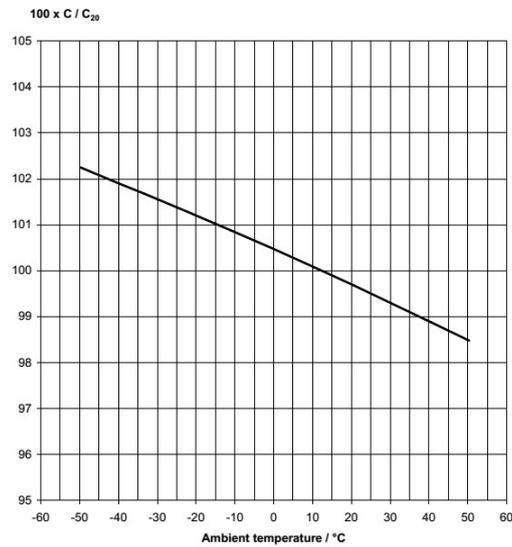


FIGURA 7 – Variação típica da capacitância em função da temperatura ambiente

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
- C<sub>0</sub>: Capacitância inicial
- ΔT: Variação de temperatura
- k: Coeficiente de variação

## 2.0 - ESTUDOS DE CASOS

A presente seção contempla a análise dos casos propostos 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

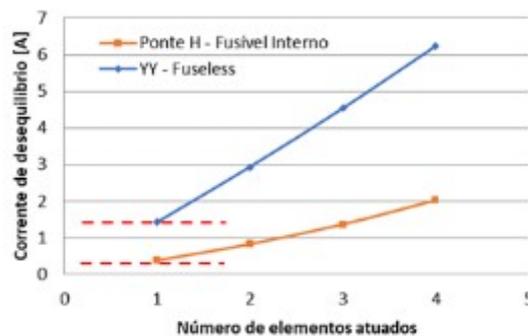


FIGURA 8 – Crescimento da corrente de desequilíbrio

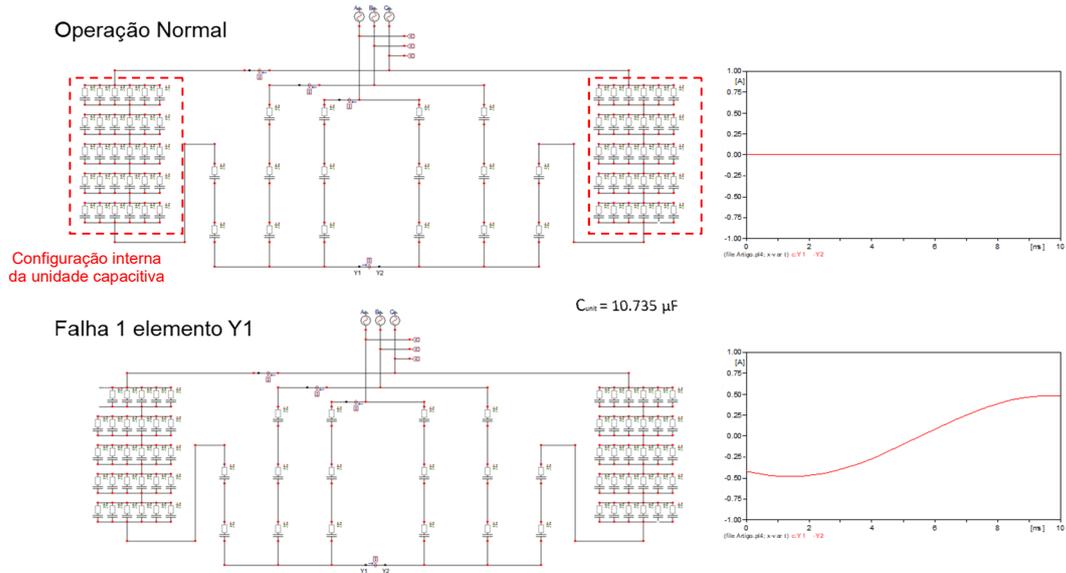


FIGURA 9 – Corrente de desequilíbrio em operação normal

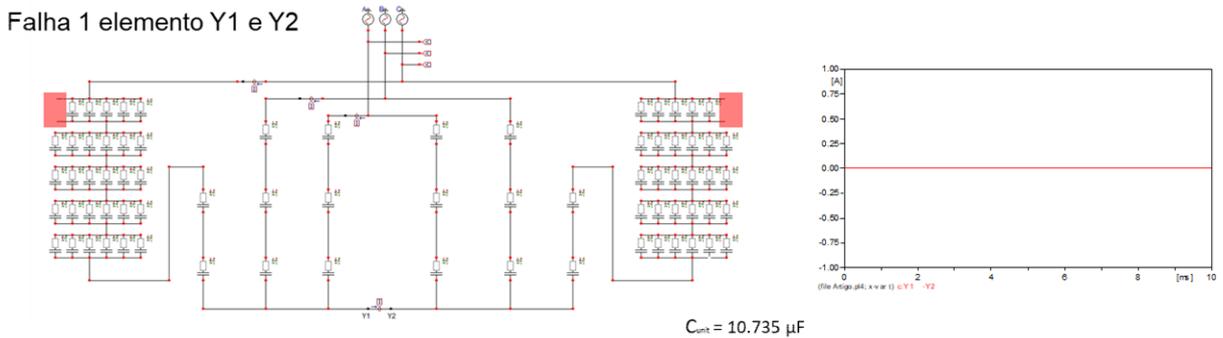


FIGURA 10 – Corrente de desequilíbrio em caso de compensação

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.

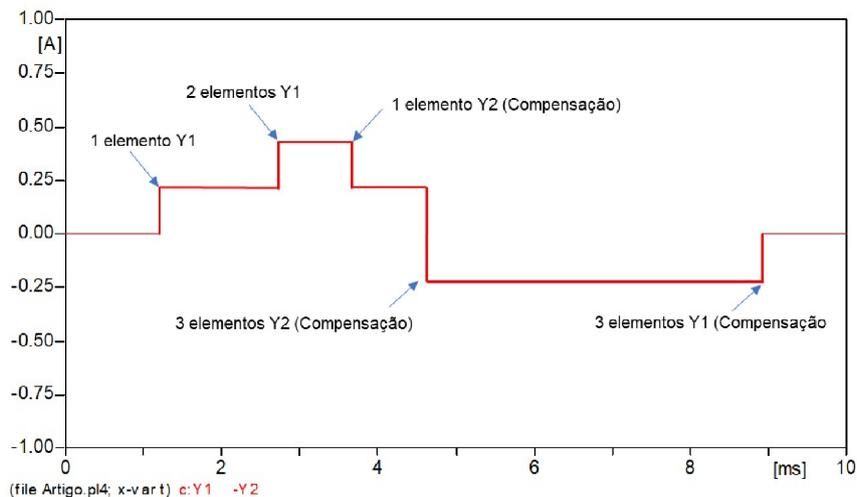


FIGURA 11 – Acompanhamento da corrente de desequilíbrio

### - 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.

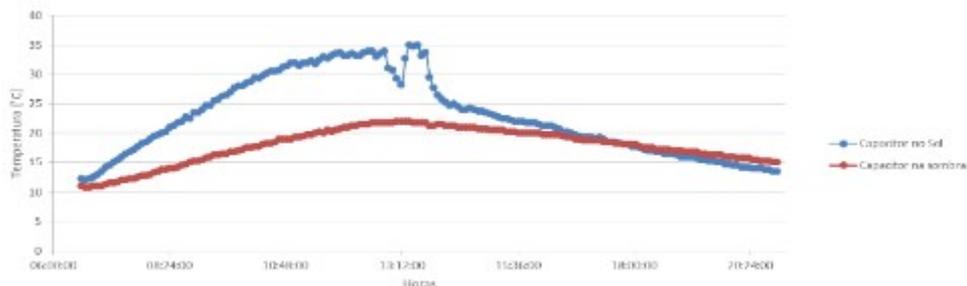


FIGURA 12 – Variação da temperatura na superfície das unidades capacitivas

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.

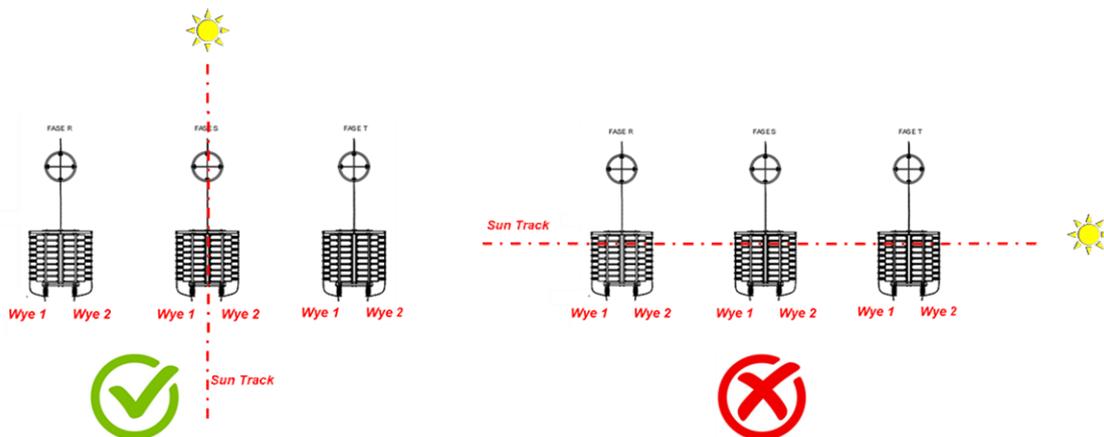


FIGURA 13 – Disposição física do banco de capacitores

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><b>Evandro Marcos Vaciloto Filho</b> 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><b>Ricardo Carvalho Campos</b> 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 General Electric, em Itajubá/MG. É membro regular do IEEE, Cigré Brasil e da SBQEE – Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica.</p>
	<p><b>Marcelo Ricardo de Moraes</b> 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><b>Leandro Souza e Silva</b> 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>