



## **Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE**

### **Monitoramento de Bancos de Capacitores Série - Critérios para Especificações**

**RAFAEL AUGUSTO MATEUS DA COSTA(1); RENAN MAUAD BERNARDES(2);JEFFERSON OLIVEIRA MENDONÇA(3)  
FURNAS(1);SEL(2);FURNAS(3)**

#### RESUMO

Devido à alta complexidade e criticidade dos bancos de capacitores série, além de um sistema de proteção e automação adequado, torna-se necessário, muitas vezes, o desenvolvimento de uma especificação para sistema de monitoramento eficaz, de modo a se obter diagnósticos consistentes e previsibilidade para as devidas decisões operativas e de manutenção. Entretanto, apesar de este sistema requerer um alto nível de especificações, as mesmas devem ser ponderadas com o potencial factível do mercado de implantação da referida solução.

Com base nas experiências em contratações de bancos de capacitores série para empreendimentos (recentemente licitados ou autorizados pela ANEEL), para cada um dos principais pontos de um sistema monitoramento, foi possível elencar as soluções comumente praticadas nestes empreendimentos, definir qual o conjunto de especificações ideais para um agente responsável pela O&M (Operação e Manutenção) do equipamento (algumas vezes impraticável) e, ainda, apresentar qual seria uma boa intersecção entre estes dois cenários.

#### PALAVRAS-CHAVE

Capacitores Série, Monitoramento, Especificações Técnicas

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

No intuito de garantir maior estabilidade sistêmica e aumento de transferência de potência em linhas de transmissão críticos do SIN (Sistema Interligado Nacional), são licitados pela ANEEL bancos de capacitores a serem instalados em série com estas linhas, em pontos estratégicos pré-definidos pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) e pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Em regime permanente, a energia gerada por esta capacitância inserida supre parte da perda energética envolvida na transmissão do fluxo de potência desta linha, associada à sua respectiva indutância intrínseca. Esta compensação energética aumenta substancialmente a capacidade de transmissão do ativo. O valor da indutância depende das características elétricas e construtivas de cada linha de transmissão do SIN.

Na prática, a concepção de um banco de capacitores série exclusivamente através de unidades capacitivas é tecnicamente inviável, face aos requisitos exorbitantes de projeto para que estas suportem as correntes de curto-circuito passantes durante todo o intervalo requerido pelo sistema de proteção e pelos disjuntores da respectiva linha de transmissão. Outro aspecto crítico seria a suportabilidade às correntes de descarga não-amortecidas envolvidas no curto-circuito dos bancos de capacitores. Com isso, outros equipamentos

são inseridos no projeto do banco de capacitores série de um determinado ponto do SIN, além das unidades capacitivas.

Considerando as atuais exigências quanto a disponibilidade de uma determinada função de transmissão e as respectivas perdas de receita envolvidas, faz-se necessária a utilização de um sistema de monitoramento adequado para estes bancos de capacitores e os demais equipamentos associados, a fim de se ter condições mínimas de previsibilidade determinística para tomada de decisões que favoreçam a disponibilidade e otimizem a receita de uma concessionária, e não apenas propiciem uma operação passiva e manutenções meramente corretivas durante desligamentos forçados.

## 2.0 - OBJETIVO

O artigo apresenta uma revisão conceitual sobre os principais componentes dos bancos série, assim como dos recursos de monitoramento presentes usualmente nos atuais projetos dos principais fabricantes de capacitores. O objetivo deste artigo é expor o conjunto de critérios e as conseqüentes especificações exigidas para o sistema de monitoramento de banco de capacitores série, tendo em vista as contratações para substituições de alguns bancos de capacitores série do SIN, recentemente autorizadas pela ANEEL. Ainda, para cada um dos principais equipamentos, destacar as práticas atuais, qual seria a solução ideal e o que se tem como exequível no momento, a fim de se obter um conjunto de critérios técnicos que, além de interessante, seja factível e consistente.

## 3.0 - PRINCIPAIS ELEMENTOS DO BANCO DE CAPACITORES SÉRIE E RECURSOS DE MONITORAMENTO

Os principais componentes do banco série são, naturalmente, as unidades capacitivas, compostas por elementos capacitivos conectados em grupos paralelo e série. O projeto pode ainda considerar a aplicação de fusíveis internos, externos ou sem fusível em sua concepção. Além dessas unidades, outros elementos que podem ser destacados são as colunas de MOVs (*Metal Oxide Varistors*), o(s) Centelhador(es), o Disjuntor de Desvio (*Bypass Breaker*) e o Circuito de Amortecimento (*Damping Circuit*). Um diagrama unifilar genérico de um banco de capacitores série é ilustrado na FIGURA 1.

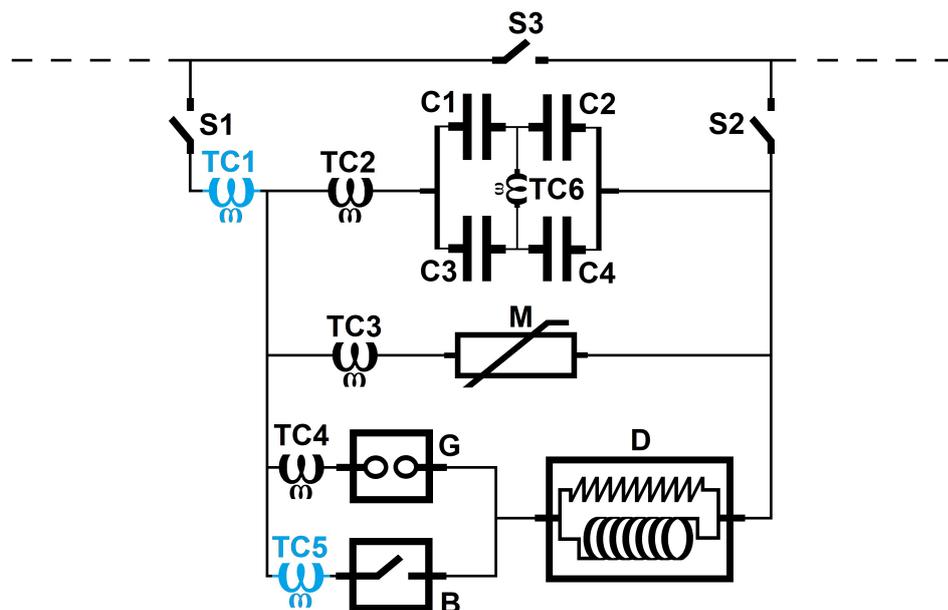


FIGURA 1 – Diagrama unifilar (exemplo) de um Banco de Capacitores Série

Os MOVs ("M", FIGURA 1), elementos não-lineares têm a função de limitar o fluxo de corrente por todos os conjuntos de unidades capacitivas ("C1", "C2", "C3" e "C4", FIGURA 1) durante curtos-circuitos passantes e demais surtos de corrente transitórios acima dos níveis máximos de sobrecarga admissíveis. À medida em que a queda de tensão nos terminais do capacitor aumenta (quando da ocorrência de elevadas correntes), os MOVs passam a conduzir um maior nível de corrente em decorrência da diminuição de sua impedância imposta (segundo respectiva Curva "V x I").

Caso seja atingido o limite térmico dos MOVs, o Centelhador ("G", FIGURA 1) é disparado e passa a desviar (após um tempo máximo de unidades de milissegundos) a corrente que flui pelos MOVs. Simultaneamente

à ordem de disparo do Centelhador, é enviado um comando de fechamento do Disjuntor de Desvio ("B", FIGURA 1), e o mesmo, em dezenas de milissegundos, estabelece um curto-circuito entre os Capacitores e o Circuito de Amortecimento ("D", FIGURA 1).

A função do Circuito de Amortecimento é atenuar os transitórios decorrentes da descarga dos capacitores durante o desvio. No intuito de se evitar sobretensões nos contatos do Secionador de Desvio ("S3", FIGURA 1), algumas soluções preveem a instalação do circuito de amortecimento em série com as unidades capacitivas, neste caso são considerados no Circuito de Amortecimento elementos não-lineares. Cada solução possui um conjunto de TCs (transformadores de corrente) para proteção, supervisão e monitoramento do Banco de Capacitores. No exemplo são considerados os Transformadores de Corrente "TC1", "TC2", "TC3", "TC4", "TC5" e "TC6" da FIGURA 1.

### 3.1 Monitoramento das Unidades Capacitivas

Tradicionalmente, considerando o arranjo da figura 1, a principal função de proteção dos capacitores é feita através do elemento de desbalanço da corrente, baseado na sobrecorrente através do ramo onde localiza-se o TC6. A circulação de corrente nesse ramo indica falha de elemento(s) capacitivos, geralmente ajustado com valor amperimétrico muito baixo. Para aumentar a sensibilidade desse elemento, alguns IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) sugerem, dentre suas funcionalidades, subtrair um fasor de corrente de desbalanço medido, no intuito de se obter medição nula da corrente de desbalanço para uma condição normal específica, geralmente durante os testes de comissionamento do banco série. O monitoramento convencional das unidades capacitivas considera exclusivamente a investigação da intensidade dessa corrente.

Todavia, além da falha de um elemento capacitivo, existem diversas condições normais de operação que causam variação da corrente de desbalanço, tornando a solução tradicional vulnerável, ora menos sensível, ora não assertiva para condições normais de operação. Dentre estas condições, a divergência entre o valor calculado e o valor real da corrente natural de desbalanço, a variação da corrente de desbalanço com a variação da corrente de linha, variação da corrente de desbalanço com a variação não homogênea da temperatura das unidades capacitivas ao longo do dia, e consequente variação não homogênea no valor das respectivas capacitâncias.

Diante de todas estas interferências, a determinação da falha de um elemento e o apontamento do conjunto de unidades capacitivas que possui elemento em falha ficam comprometidos, considerando a solução convencional. Alguns IEDs para proteção e supervisão de capacitores trouxeram novos recursos, mas ainda possuem limitações para estes cenários supracitados.

#### 3.1.1 Mitigação das Oscilações da Corrente Natural de Desbalanço e determinação da ocorrência de Falha de Elemento

De modo a evitar erros de medição em decorrência da variação da corrente passante na linha de transmissão, recomenda-se que seja especificada a correção (continuamente) da corrente de desbalanço à uma corrente pré-determinada, como por exemplo a corrente nominal. Esta correção está explicitada na EQUAÇÃO 1 abaixo.

#### EQUAÇÃO 1

$$I_{DESB}^* = I_{DESB} (I_N \div I_{LINHA})$$

$I_{DESB}^*$ : Corrente de desbalanço corrigida [mA];

$I_{DESB}$ : Corrente de desbalanço medida [mA];

$I_N$ : Corrente de linha nominal [A];

$I_{LINHA}$ : Corrente de linha medida [A];

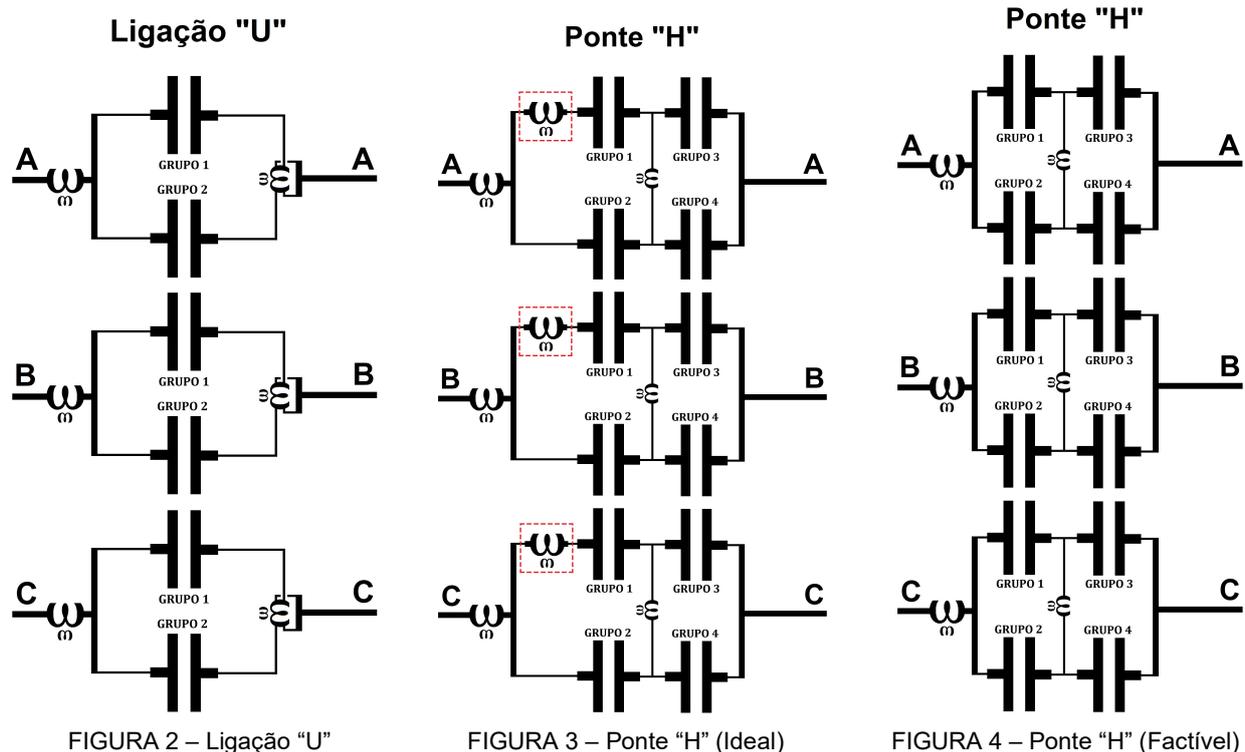
Dessa forma, a proteção contra desbalanço de corrente e identificação da falha elementos capacitivos não sofre interferência do carregamento da linha de transmissão. A correção sugerida proporciona uma estabilidade na medição da corrente de desbalanço, de modo que a única oscilação desta se daria pela variação não homogênea da temperatura das unidades capacitivas ao longo do dia. Esta variação em função da temperatura é um fator muito menos relevante em relação à variação da corrente de linha, em função de serem previstas isolações

térmicas nas unidades capacitivas que mitigam bastante as grandes oscilações de temperatura no interior das unidades.

Monitorando-se a variação máxima da corrente de desbalanço (“di/dt” ou  $\Delta i/\Delta t$ ) ao longo do dia durante um período significativo (primeiro mês de operação satisfatória, por exemplo), pode-se definir um ajuste de variação mínima da corrente de desbalanço na ocorrência da falha de um elemento. Este ajuste é o valor da máxima variação natural da corrente de desbalanço obtida, multiplicada por um fator de segurança.

### 3.1.2 Apontamento do Subconjunto de Unidades Capacitivas com Elemento em Falha

A FIGURA 2, FIGURA 3 e FIGURA 4 apresentam as principais topologias das unidades capacitivas (considerando-se bancos de capacitores série). A FIGURA 2 apresenta uma topologia utilizada para bancos de capacitores de baixa potência (poucas unidades capacitivas) e considera a utilização de um “TC Subtrator” para medição da corrente de desbalanço. Ambas as FIGURAS 3 e 4 apresentam a topologia “PONTE H”, mais comumente adotadas nos projetos de bancos de capacitores série.



Comparando-se a polaridade da corrente do TC de desbalanço com a polaridade da corrente do TC de linha é possível determinar o sentido da corrente de “Falha de um Elemento” (uma vez que é possível determinar o momento do defeito). Conhecido este sentido, para a topologia ilustrada pela FIGURA 2 já se pode apontar o subconjunto de unidades capacitivas que possui elemento em falha. Caso a tecnologia das unidades capacitivas seja “FUSÍVEL INTERNO”, a falha de elemento diminui a capacitância da unidade com elemento em falha e, conseqüentemente, do respectivo subconjunto de unidades capacitivas. Já a falha de elemento em unidades capacitivas de tecnologia “FUZELESS”, a mesma promove um aumento da capacitância da unidade e do subconjunto.

A consideração das polaridades na topologia “PONTE H” possibilita o apontamento da diagonal em que se encontra o elemento em falha (GRUPO1/GRUPO4 ou GRUPO2/GRUPO3). A distinção entre cada um dos subconjuntos da diagonal requer a instalação dos TCs destacados em vermelho na FIGURA 3. Entretanto, a previsão destes TCs no sistema de medição não é recomendada, uma vez que o atendimento aos requisitos destes transformadores é praticamente inexecutável, tendo em vista a necessidade de uma suportabilidade térmica e dinâmica pouco inferior aos TCs de linha e, ao mesmo tempo, exatidão similar aos TCs de medição da corrente de desbalanço.

### 3.2 Monitoramento das Colunas de MOVs

Tradicionalmente, não se encontra para os atuais bancos de capacitores série de mercado soluções de monitoramento das colunas de MOVs, diferentemente dos sistemas de proteção destes elementos que estão bastante difundidos e consolidados, a citar o by-pass do banco de capacitores por proteção térmica dos MOVs, ou por falha de sua(s) coluna(s).

A forma mais direta e robusta de monitorar a degradação heterogênea destes semicondutores seria através da supervisão da diminuição da componente capacitiva (ou aumento da componente resistiva) da corrente de fuga de cada coluna de MOV do banco, conforme ilustrado na FIGURA 5. Entretanto, a inviabilidade técnica desta solução está na quantidade de transformadores de corrente e links ópticos envolvida nesta configuração do sistema de medição, bem como na previsão de um transformador de potencial na plataforma com níveis de isolamento compatíveis com a tensão terminal do capacitor série. Outra dificuldade seria especificação dos transformadores de corrente, que estariam sujeitos a altas correntes térmicas e dinâmicas de curto-circuito e necessitariam de exatidão para medição de correntes com valores que não ultrapassariam unidades de miliamperes.

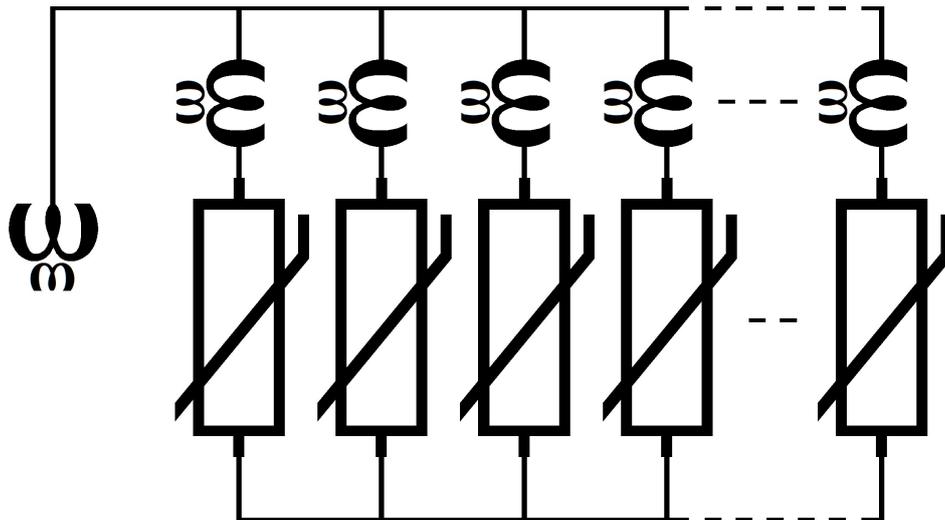


FIGURA 5 – Sistema de Medição da Corrente de Fuga dos MOVs (Ideal)

Cenários factíveis para o monitoramento destes elementos estão associados ao acompanhamento da variação da distribuição das correntes entre as diversas colunas dos MOVs (por fase) do banco, durante a condução dos mesmos. A FIGURA 6 traz alguns exemplos para esta solução e ilustra a expectativa das medições em cada cenário. Obviamente que os valores a serem perseguidos e tomados como referência não seriam estes (de projeto), mas sim os obtidos nas primeiras conduções dos MOVs, após a entrada em operação do banco de capacitores.

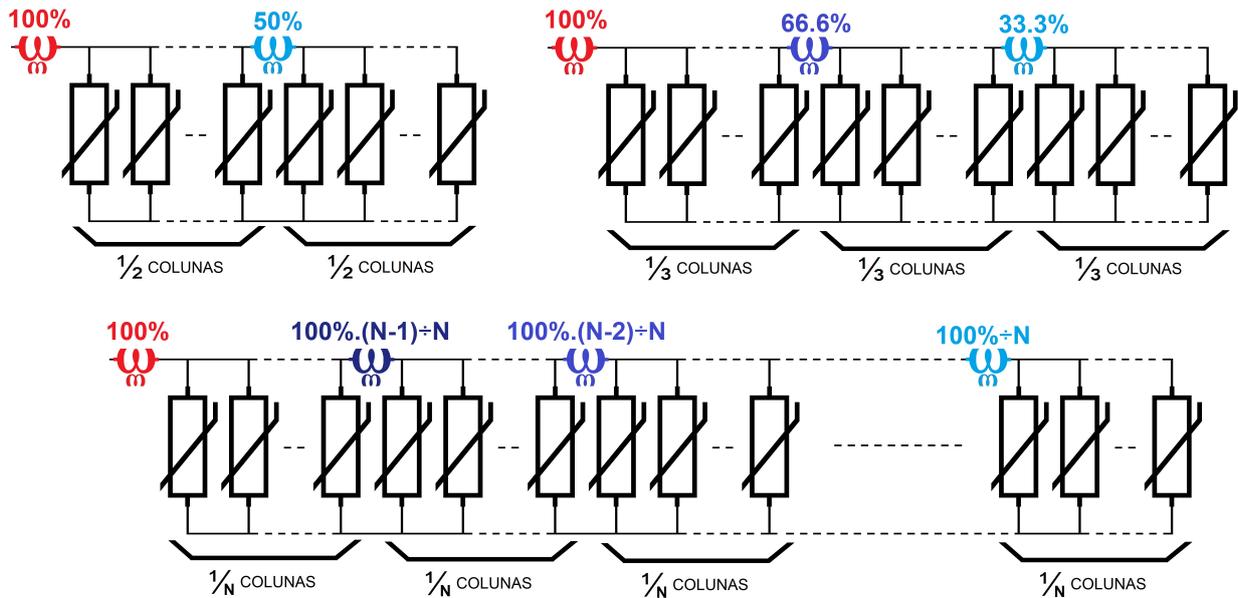


FIGURA 6 – Exemplos de Sistemas de Medição da Corrente durante Condução dos MOVs (Factíveis)

### 3.3 Monitoramento Circuito de Amortecimento

Uma maneira muito eficaz de monitorar a integridade do reator de amortecimento (“D”, FIGURA 1) seria através do acompanhamento da variação da frequência da corrente descarga, uma vez que esta depende diretamente do valor da indutância do reator de amortecimento e da capacitância do banco. Novamente, quando da entrada em operação, as primeiras manobras de by-pass do banco de capacitores trariam valores de frequência de descarga a serem tomados como referência. A partir destes valores, o projetista do banco deverá definir quais os limites máximos (superiores e inferiores) de frequência de descarga que não caracterizam eventuais curto entre espiras no(s) reator(es) de amortecimento. O algoritmo desta funcionalidade depende intrinsecamente do sistema digital adotado: algoritmo implementado exclusivamente nos IEDs, algoritmo implementado no servidor associado ao sistema de monitoramento (partir de informações distribuídas pelos IEDs), ou ainda, algoritmo de tratamento dos dados coletados das oscilografias.

Como o valor da resistência do resistor de amortecimento interfere na amplitude de sinal da corrente de desvio e esta, por sua vez, pode variar em função de diversos outros aspectos (amplitude da corrente no momento do desvio, não-linearidade da resposta do circuito em função dos elementos não-lineares presentes no banco de capacitores), nenhum monitoramento adicional à função de proteção 49 (imagem térmica) do resistor é recomendada. Esta função de proteção requer a instalação de um TC exclusivo para o resistor de amortecimento e o modelo térmico pode exigir os valores de resistência associados a cada componente harmônico do sinal da corrente de desvio, de modo a evitar erros de algoritmo pelo efeito pelicular.

### 3.4 Monitoramento do Centelhador e do Disjuntor de Desvio

A decisão por contemplar estes equipamentos no sistema de monitoramento do banco de capacitores série está condicionado fundamentalmente à tecnologia dos mesmos e às exigências contidas nos manuais dos fabricantes. Caso o desgaste dos contatos destes equipamentos não dependa da intensidade da corrente desviada, o monitoramento recomendado é o convencional, baseado no contador de número de operações. Caso a intensidade da corrente desviada interfira no desgaste dos contatos, faz-se necessária a implementação de um monitoramento da energia acumulada “I<sup>2</sup>t” nos desvios do banco para eventual retirada para manutenção por desgaste excessivo dos contatos, ainda que não tenha sido atingido o número de operações limite.

## 4.0 - CONCLUSÃO

A consideração de um sistema de monitoramento eficaz e confiável é indispensável para que os agentes possam exercer uma operação satisfatória e uma manutenção estratégica e inteligente dos seus ativos. O avanço tecnológico exorbitante obtido nos últimos anos contribui substancialmente para a melhoria constante da gestão de ativos. Entretanto, considerando a tecnologia atual, pode-se perceber que hoje existem muitas possibilidades de reinventar o sensoriamento, o sistema de medição, o sistema digital e os algoritmos envolvidos em sistemas de monitoramento de ativos, em particular para os bancos de capacitores série.

Nesta linha de abordagem, torna-se inerente a necessidade de uma análise holística dentre todas as soluções técnicas disponíveis, definindo para cada aplicação qual seria a solução mais adequada, não sendo esta

muitas vezes a que engloba o maior conjunto de benefícios. A cada vez mais no nosso mercado existe que as soluções adotadas sejam factíveis economicamente e sustentáveis ao longo de toda vida útil do equipamento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Norma IEC 60143: "Series capacitors for power systems";
- (2) SEL-487V: "Sistema de Proteção e Controle para Bancos de Capacitores" (Manual de Instruções, Schweitzer Engineering Laboratories).
- (3) "Aplicação de Bancos de Capacitores Série na Transmissão CA de Longa Distância: o Exemplo da Interligação Tucuruí – Macapá – Manaus" - Manfredo Correia Lima

#### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Autor Principal: Rafael Augusto Mateus da Costa  
Universidade Federal de Itajubá (2005-2009) – Graduação em Engenharia Elétrica (CREA PR-109549/D)

##### Experiência Profissional:

Engenheiro de Equipamentos de Alta de Tensão (FURNAS/ELETROBRÁS): Fevereiro de 2016 - **Atualmente**  
Engenheiro de Proteção e Automação (ELEKTRO/NEOENERGIA): Dezembro de 2011 - Janeiro de 2016  
Engenheiro de Proteção e Controle (TOSHIBA): Janeiro de 2010 - Novembro de 2011

##### Publicações:

"Otimização de projetos considerando a norma IEC 61850" – STPC/CIGRÉ (2018, Foz do Iguaçu/PR – Brasil)  
"Phasors measurement synchronization through GOOSE messages (IEC 61850)" – PAC World America's Conference (2013, Raleigh/NC - USA)



Autor: Renan Mauad Bernardes  
Universidade Federal de Itajubá (2003-2007) – Graduação em Engenharia Elétrica

##### Experiência Profissional:

Engenheiro de Aplicação (SEL) – Janeiro de 2019 - **Atualmente**  
Engenheiro de Proteção e Automação da Transmissão (NEOENERGIA): Maio de 2015 – Dezembro de 2018  
Engenheiro de Proteção e Controle (SEL): Fevereiro de 2008 – Abril de 2015

##### Publicações:

"Otimização de projetos considerando a norma IEC 61850" – STPC/CIGRÉ (2018, Foz do Iguaçu/PR – Brasil)



Autor: Jefferson Oliveira Mendonça  
Universidade Federal Fluminense (2005-2009) – Graduação em Engenharia Elétrica  
Engenheiro de Equipamentos de Alta de Tensão (FURNAS/ELETROBRÁS): Março de 2012 - **Atualmente**