

MANUTENÇÃO PREDITIVA DE BANCOS DE CAPACITORES COM BASE NO MONITORAMENTO DA CORRENTE DE DESEQUILÍBRIO DE NEUTRO

Heldemarcio L. Ferreira (1) Marcos R. de M. Lima (2) Marcio E. C. Brito (3)

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um procedimento para monitoramento de bancos de capacitores que se baseia na medida “on-line” da corrente de desequilíbrio de neutro, utilizando a base de dados disponível no sistema supervisorio de automação. A partir desse parâmetro, é efetuada uma análise preditiva, visando inferir a degradação das células capacitivas em operação. De modo a propiciar um gerenciamento adequado das intervenções sobre a aludida instalação.

PALAVRAS CHAVE

Análise preditiva, Banco de capacitores, Célula capacitiva, Degradação, Diagnose, Monitoramento, Sistema supervisorio de automação.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o setor elétrico brasileiro vem atravessando grandes transformações, que foram intensificadas a partir de 1995 com o processo de privatização das empresas estatais de energia elétrica. Nesse contexto, a Celpe – Companhia Energética de Pernambuco – detentora da concessão dos serviços públicos de distribuição de energia elétrica para o Estado de Pernambuco, foi adquirida pelo Consórcio Guarani S.A. no dia 17 de fevereiro de 2000 e sua abrangência é sumariamente representada pelo quadro abaixo:

Quadro 1 - Dados de mercado

Área de concessão	102.745km ²
Quantidade de municípios	186
População Total do Estado	7.918.344habitantes
Total de clientes	2.340.896

Fonte : <http://www.celpe.com.br>

(1) Sócio da ABRAMAN, regional XII; Analista de Manutenção do Dep. de Eng. e Manutenção da Celpe; Eng. Eletricista, Msc. Eng. de Produção e Doutorando em Eng.Elétrica UFPE; Diretor da ENGEA; Professor do CEFET-PE e da Pós-Graduação em Gestão da Manutenção UFPE.

(2) Gestor da Unidade de Manutenção de Subestações do Sertão do Departamento de Eng. e Manutenção da Celpe, Eng. Eletricista e Especialista em Gestão da Manutenção UPE.

(3) Gestor da Unidade de Scada e Sistema integrados do Departamento de Automação e Telecomunicação da Celpe, Eng. Eletricista UPE.

Para atender a esse mercado, a Celpe conta atualmente com 117 subestações de distribuição nas tensões de 13,8, 69 e 138kV, nas quais existem 245 bancos de capacitores “shunt” nas classes de tensão de 13,8kV e 69kV instalados, cuja finalidade precípua é promover o suporte de reativos e auxiliar na regulação de tensão em barramentos de subestações.

O foco deste trabalho reside na manutenção eficiente das condições operativas desejadas para essas instalações.

2. CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES

2.1 Capacitores de Potência

Os capacitores empregados em sistemas de potência são constituídos de eletrodos de alumínio, filme de polipropileno e impregnante biodegradável. A literatura disponível e as normas técnicas NBR 10671 e NBR 12479 referentes ao assunto estabelecem que os capacitores são projetados para suportar até 144% da potência nominal (sobretensões, harmônicos e tolerâncias de fabricação), desde que não supere 110% da tensão nominal, à frequência nominal [1].

Em condições normais de operação, sob o efeito dos estresses dielétricos, o processo de degradação das células capacitivas se dá de forma lenta e gradual, através da queima das “bobinas” que são os elementos capacitivos internos (armaduras), resultando na alteração da capacitância total. Essas bobinas são montadas em conjuntos e realizadas as ligações série-paralelo, de modo que a capacitância total do capacitor, correspondente à potência reativa desejada, é expressa por:

$$(1) \quad C = \frac{p}{s} c$$

Onde: C representa a capacitância total do capacitor; p a quantidade de elementos em paralelo; s a quantidade de bobinas em série; e c a capacitância de cada elemento ou bobina do capacitor.

Portanto, à medida que as bobinas série queimam, ocorre um aumento da capacitância total da célula; o inverso ocorre quando da queima das bobinas shunt. Não obstante, na prática, o que realmente importa é a alteração da capacitância. O critério de manutenção adotado pela Celpe, com base em recomendações de fabricantes e experiência do setor, estabelece um limite de variação de 10% para a capacitância das células em operação.

Os capacitores com fusíveis externos adotados pela Celpe são monofásicos e estão em conformidade com os especificados no quadro abaixo:

Quadro 2 – Capacitores de Potência usados na Celpe

Tensão nominal (V)	Potência (kVAr)	Elo Fusível
8.660	50	6K
	100	12K
	200	25K

Fonte: Especificação de Bancos de Capacitores Coelba-Celpe-Cosern

2.2 Configuração do Banco

Os bancos de capacitores da Celpe possuem o padrão de ligação em dupla estrela isolada, conforme representado na figura seguinte, onde são destacados os principais componentes. Essa configuração é adequada para bancos de grandes potências, mas suscita maior cuidado quanto à proteção, por razões que serão discutidas mais adiante.

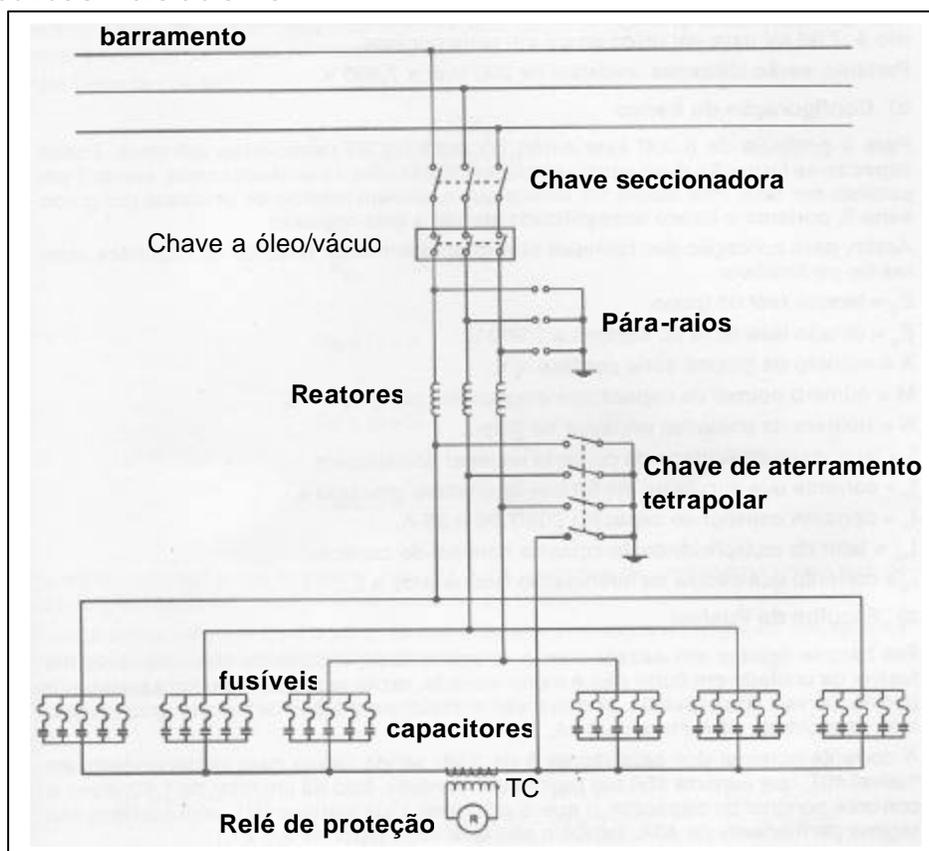


Fig. 1 - Banco de capacitores ligado em dupla estrela isolada

Cada componente da instalação possui uma função específica, resumida a seguir:

1. Chave seccionadora tripolar: Permitir as manobras de conexão e desconexão do banco ao barramento.
2. Chave a óleo/vácuo: Possibilitar a energização e desenergização do banco por comando manual ou atuação da proteção (em alguns casos utiliza-se disjuntor).
3. Pára-raios: Proteger contra as sobretensões e descargas atmosféricas.
4. Chave de aterramento tetrapolar: Promover o aterramento do banco, após a sua desenergização.
5. Reatores: Limitar a corrente de energização do banco de capacitores
6. Fusíveis: Proteger os capacitores contra curto-circuito em uma das células.
7. Capacitores: Fornecer o suporte de reativo desejado para o sistema.
8. Transformador de Corrente: Suprir a proteção contra desequilíbrio de neutro com o sinal de corrente de valor adequado.
9. Relé de Proteção: Proteger o banco contra desequilíbrio entre as fases.

2.3 A proteção dos capacitores pela supervisão da corrente de neutro

A maioria dos bancos de capacitores em operação na Celpe é constituída por células capacitivas com fusíveis externos individuais, só alguns poucos são dotados de capacitores com fusíveis internos em série com os elementos.

Como no caso de uma única estrela isolada, a configuração em dupla estrela isolada é insensível à circulação de corrente de seqüência zero. Assim, o neutro pode ser submetido à tensão de fase, quando os fusíveis abrem ou quando de manobras no banco, visto que os capacitores se comportam como um curto-circuito no momento da energização.

O dimensionamento do elo fusível é função da corrente de fase em serviço contínuo, ressaltando-se que não deve atuar durante os transitórios de descarga ou de energização do banco de capacitores. Para uma eficiente atuação dos fusíveis, recomenda-se que estes sejam atravessados por uma corrente não inferior a 10 (dez) vezes o seu valor nominal no momento da falta.

Quando o banco é ligado em estrela (única ou dupla) com neutro isolado, a corrente no fusível da fase defeituosa é limitada pela impedância das fases sãs. Dessa forma, se o fusível não interromper o circuito num tempo adequado, pode haver ruptura da caixa do capacitor defeituoso, bem como os demais capacitores provavelmente apresentarão defeito devido às condições anormais a que serão submetidos [2]. Por isso, afirmou-se que essa configuração suscita maior cuidado quanto à proteção.

Para atenuar esse problema, o trabalho propõe a supervisão da degradação das células capacitivas a partir do monitoramento da corrente de desequilíbrio de neutro. Como esse parâmetro já é monitorado pelo sistema supervisor e pela automação local que, assumindo a função do relé de proteção, atua sobre a chave a óleo/vácuo para desligamento, basta agregar a função adicional de emissão de alertas para subsidiar as análises preditivas pela engenharia de manutenção e acionar as equipes de campo para inspeções na instalação, em que se verifica a integridade dos fusíveis e são medidas as capacitâncias de todas as unidades.

3. CÁLCULO DA CORRENTE DE DESEQUILÍBRIO DE NEUTRO

3.1 O Mecanismo de degradação

O desequilíbrio do banco de capacitores ocorre em função do processo de degradação das células capacitivas, sendo agravado quando acontece rompimento de elos fusíveis eliminando capacitores. A degradação deve ser entendida como um processo de deterioração do sistema dielétrico que pode ser dividido em duas condições genéricas, cada qual com seus respectivos fenômenos, como segue [3]:

1. A primeira condição considera o capacitor sob os efeitos de sobretensões. O fenômeno típico inicia-se com a formação de gases (bolhas) na área de maior estresse dielétrico, seguida do surgimento de descargas parciais que desaparecem com o fim das sobretensões.

2. A segunda condição aborda o capacitor sob tensões operativas. O ponto fundamental desse fenômeno é a degradação do polipropileno através da ação das descargas parciais de baixos níveis, isto é, a alteração das propriedades do polipropileno após reações químicas excitadas por descargas parciais da ordem de unidades a dezenas de pC.

Após o envelhecimento e/ou surgimento de falhas, o capacitor pode apresentar valores maiores, tipicamente da ordem de centenas a milhares de pC. Essas magnitudes podem ser medidas em capacitores reais por métodos acústicos, inclusive como critério para desativação de unidades em operação.

Os transitórios gerados pela energização de banco de capacitores também aceleram a degradação das células e dependem de fatores como potência e configuração do banco, a impedância do sistema e a existência de outros bancos em operação na mesma barra. Outros fatores que concorrem para o processo de degradação são relacionados a seguir [4]:

- a. Surtos de manobras no sistema e descargas atmosféricas
- b. Energização back to back
- c. Religamento antes do tempo de descarga dos capacitores
- d. Distorção anormal de forma de onda ou harmônicos
- e. Condições ambientais agressivas (temperatura, poluição etc)
- f. Vibrações.

Com relação às distorções harmônicas, o maior problema encontrado é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias, podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas com o decorrente aumento do aquecimento e encurtamento da vida útil do capacitor.

Os bancos de capacitores são grandes absorvedores de harmônicos. Uma variação de tensão de 10% decorrente das distorções harmônicas, produz uma elevação de temperatura de 7% e perda de vida útil de 30% [5].

3.2 Procedimento de cálculo

Dependendo da configuração do banco, a sensibilidade da instalação em relação à perda de unidades capacitivas será diferente. Ou seja, o efeito do desequilíbrio subsequente pode acarretar a retirada de operação ou apenas um pequeno desbalanceamento entre os grupos, que é tolerável pela proteção do banco.

A configuração também estabelece a contribuição das células remanescentes de um mesmo grupo para a corrente que circula no fusível da unidade defeituosa. A expressão a seguir é utilizada para determinar a corrente que atravessa o fusível da unidade em curto para a configuração em dupla estrela isolada [1].

$$(2) \quad I_f = \frac{6MN}{6X - 5}$$

Onde:

I_f = fator de corrente (para cálculo da corrente que circula no fusível)*

X = número de grupos em série por fase

M = número normal de capacitores em paralelo por grupo

N = número de unidades retiradas de um grupo

* A corrente que circula no fusível da unidade em curto é igual à corrente normal multiplicada pelo fator I_f .

A figura a seguir auxilia na identificação dos parâmetros apresentados na equação (2) e nas equações subseqüentes:

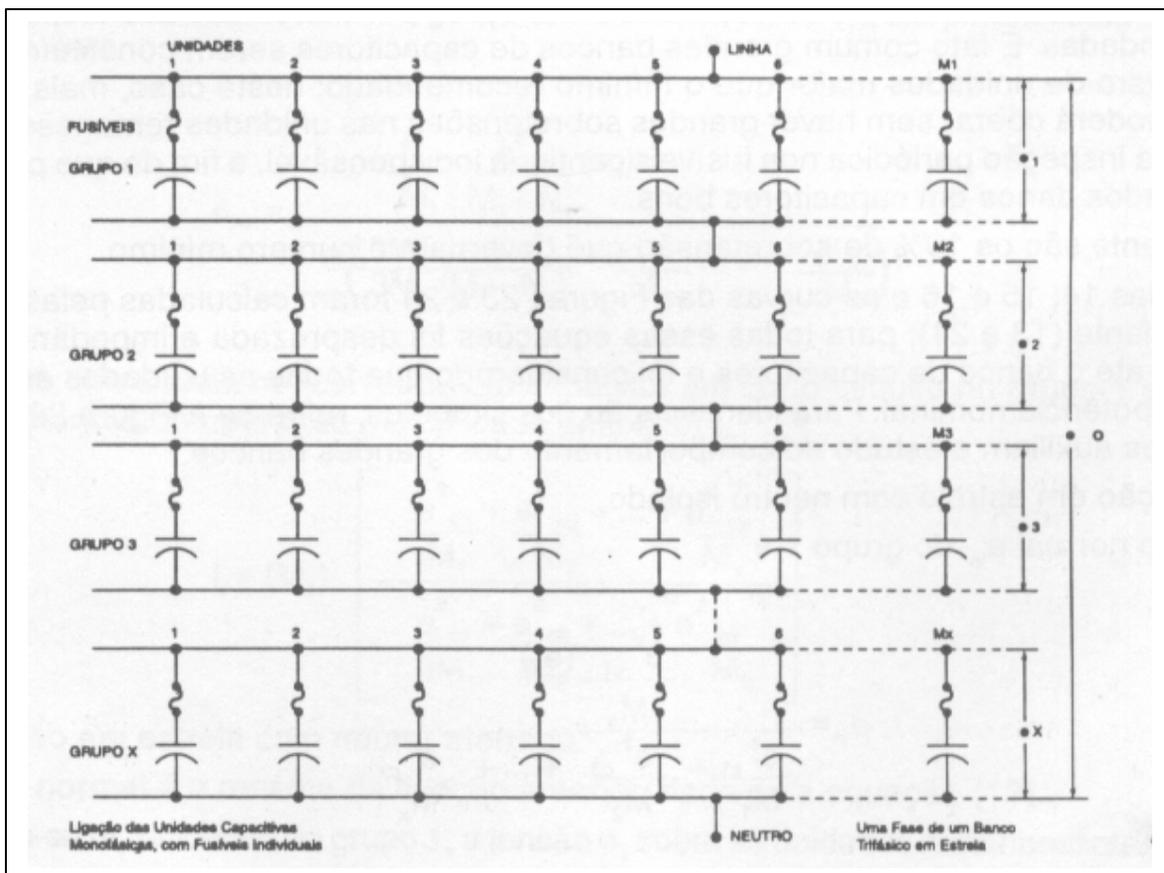


Fig.2 – Ligação das unidades capacitivas monofásicas com fusíveis individuais

O número mínimo de unidades em paralelo por grupo é definido em função da corrente necessária para assegurar a fusão do elo fusível da unidade em curto, considerando as contribuições de corrente de descarga dos demais capacitores em paralelo; e pela tensão nas unidades remanescentes quando a unidade for retirada do grupo por queima do fusível [2].

$$(3) \quad N_{mc} = \frac{11.N.(6.X - 5)}{6.X}$$

A tensão que resulta nas demais unidades sobejantes do mesmo grupo pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$(4) \quad V_{ur} = V_{fn} \times \frac{6.M.X}{6.X.(M - N) + 5.N}$$

Resultando: $V_{ur} \geq V_c$

A corrente que circula entre os neutros, após a eliminação de uma ou mais unidades capacitivas de um determinado grupo, pode ser calculada pela expressão a seguir:

$$(5) \quad I_d = I_n \frac{3.M.N}{6.X.(M - N) + 5.N}$$

Onde:

N_{mc} = número mínimo de capacitores em paralelo em cada grupo série por fase
 V_{ur} = tensão resultante nas unidades remanescentes do mesmo grupo com N_e capacitores excluídos, em kV

V_{fn} = tensão entre fase e neutro do sistema, em kV

V_c = tensão em cada grupo, quando todas as unidades estão em operação

I_d = corrente de desequilíbrio de neutro

I_n = corrente normal do capacitor

Assim, as tolerâncias operacionais que asseguram a integridade da instalação quando da perda das unidades capacitivas, correspondentes às diversas configurações existentes na Celpe são mostradas no quadro 3 a seguir:

BANCOS DE CAPACITORES 13,8kV						
POTÊNCIA (MVar)	FORMAÇÃO (kVar)	ELO FUSÍVEL	X	M	Nº. MÁX. ELOS ROMP/GRUPO	COR. DESEQ. ADMISSÍVEL
0,6	12X50	6K	1	2	1	3,4A
0,6	6X100	12K	1	1	0	0A
1,2	24X50	6K	1	4	2	6,8A
1,2	12X100	12K	1	2	1	6,8A
1,2	6X200	25K	1	1	0	0A
1,5	30X50	6K	1	5	2	6,7A
1,8	36X50	6K	1	6	3	10,25A
1,8	18X100	12K	1	3	1	6,6A
2,4	24X100	12K	1	4	2	13,6A
2,4	12X200	25K	1	2	1	13,75A
3,6	36X100	12K	1	6	3	20,5A
3,6	18X200	25K	1	3	1	13,2A
4,2	42X100	12K	1	7	3	20,2
4,8	48X100	12K	1	8	4	27,25A
4,8	24X200	25K	1	4	2	27,25A
7,2	36X200	25K	1	6	3	41A

BANCOS DE CAPACITORES 69kV						
POTÊNCIA (MVar)	FORMAÇÃO (kVar)	ELO FUSÍVEL	X	M	Nº. MÁX. ELOS ROMP/GRUPO	COR. DESEQ. ADMISSÍVEL
12	240X50	8K	5	8	0	0A

Quadro 3 – Tolerâncias operacionais das configurações dos bancos de capacitores da Celpe

4. MANUTENÇÃO EM CAMPO

4.1 Filosofia da Manutenção Preventiva Celpe

A manutenção preventiva dos bancos de capacitores na Celpe é constituída de três formas básicas de atuação que são denominadas de tipo A, tipo B e tipo C, nas quais são realizadas as tarefas descritas a seguir:

Manutenção tipo A: Consiste nas inspeções periódicas da instalação sem indisponibilizá-la para a operação. Nessa categoria se enquadram as inspeções visuais e termográficas e a leitura das correntes de desequilíbrio de neutro.

Manutenção tipo B: Consiste na realização de testes periódicos nos diversos componentes da instalação e substituição de elos fusíveis com periodicidade anual. Existe uma tendência de que esse prazo seja estendido para dois anos, em decorrência do monitoramento.

Manutenção tipo C: Corresponde à intervenção que envolve desmontagem de chaves e/ou do banco de capacitores para substituir peças que apresentem desgaste acentuado e efetuar pintura/restauração de estruturas e codificações, respectivamente e decorre dos resultados obtidos nos testes realizados na tipo B.

Vale ressaltar que o objetivo prioritário da manutenção é o de assegurar a disponibilidade da instalação e, no contexto do negócio abordado nesse trabalho em particular, garantir a continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica que em última análise é o papel da concessionária.

A manutenção preditiva de instalações tem conquistado significativos avanços, notadamente no setor de serviços de energia elétrica, graças à rápida difusão dos sistemas de monitoramento “on-line” que auxiliam o gerenciamento coordenado e planejado da manutenção e da operação, favorecendo a redução das interrupções não programadas do fornecimento do serviço de energia e/ou mitigando a degradação da qualidade desse serviço .

Nesse sentido, o monitoramento da instalação em foco torna-se imprescindível, uma vez que a atuação da chave a óleo/vácuo do banco de capacitores, acionada pelo sistema de automatismo local, é passível de falha. Esta falha pode acarretar a perda de suprimento às cargas, devido à atuação da proteção sobre o equipamento de disjunção geral da subestação.

Destarte, as informações disponíveis no sistema supervisório remoto das subestações da Celpe propiciam o suporte à programação das intervenções, de forma oportuna e menos onerosa, atendendo aos níveis de disponibilidade desejados pela concessionária dos serviços a custos compatíveis.

4.2 Casos Práticos

Para fins de ilustração, serão abordados dois casos práticos que são bastante didáticos para o entendimento da metodologia adotada e discussão dos resultados, sendo um deles observado na área piloto desse estudo e o outro, em um dos bancos de maior potência de uma importante subestação da Celpe:

Caso 1 - O banco de capacitores 01H2 da subestação de Campinho 69/13.8kV e 12,5MVA que provê um suporte de 2,4MVar, constituído por 24 células de 100kVar. Para o qual observou-se o seguinte cenário:

- Através do sistema supervisorio, verificou-se uma variação de corrente no neutro de 155% entre as medidas dos dias 13 e 18 de novembro de 2003.
- Após a intervenção da equipe de manutenção, detectou-se uma das células com 11% de variação de capacitância em relação ao valor de placa. Pelos critérios de manutenção da Celpe, são toleradas variações de até 10%.
- A referida célula foi substituída antes que houvesse o rompimento do elo fusível correspondente, reduzindo a corrente de neutro para os valores típicos de operação.

No caso em pauta, pode parecer que se adotou um critério de intervenção excessivamente rigoroso, uma vez que, para essa configuração, são admitidos até dois elos rompidos por grupo, conforme mostrado no quadro 3. No entanto, deve-se ressaltar alguns aspectos:

1. A variação da corrente de neutro foi significativa para um curto período de tempo, indicando a existência de uma falha progressiva em rápida evolução;
2. Pode ocorrer degradação de células nas três fases, reduzindo a potência efetiva da instalação sem desequilíbrios significativos. Porém, a configuração do banco fica modificada em relação à original prevista no quadro 3;
3. O custo e os inconvenientes decorrentes de uma intervenção preventiva condicional são significativamente menores que os de uma manutenção corretiva; e a experiência adquirida com essas manutenções possibilita estabelecer um critério custo-eficiente para as intervenções subseqüentes.

Caso 2- O banco de capacitores 01H4 da SE Boa Vista 69/13.8kV e 66MVA que provê um suporte de 4,8MVar, constituído por 24 células de 200kVar. Para o qual, foram destacados os pontos a seguir:

- Através do sistema supervisorio, verificou-se uma corrente de desequilíbrio no neutro ($\approx 3,60A$) superior à dos demais bancos daquela subestação entre as medidas dos dias 01 a 30 de março de 2004. (Os valores das capacitâncias situavam-se no interior da faixa admissível)
- Após a intervenção da equipe de manutenção, não foi detectada nenhuma anormalidade nas células e fusíveis da instalação.

No caso em pauta, a intervenção realizada confirmou as expectativas em relação às condições operativas da instalação, uma vez que a corrente encontrava-se bem abaixo do limite estabelecido para essa configuração (vide quadro 3) e não houve alterações significativas durante o período de observação.

Os exemplos apresentados comprovam a necessidade de um acompanhamento da evolução da corrente de desequilíbrio de neutro, mediante uma análise de tendência, uma vez que apenas o valor absoluto desse parâmetro é insuficiente para assegurar uma diagnose precisa da instalação.

5. SISTEMA DE MONITORAMENTO

5.1 Aquisição e armazenamento

O sistema de monitoramento consiste na coleta e processamento de dados obtidos a partir do sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System). O sistema de automação da CELPE teve início no ano de 1997 com um total de 13 subestações; hoje a CELPE possui 112 subestações automatizadas e um total de 43061 pontos monitorados. Na figura 3 é exibida a arquitetura do sistema de automação da CELPE.

ARQUITETURA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

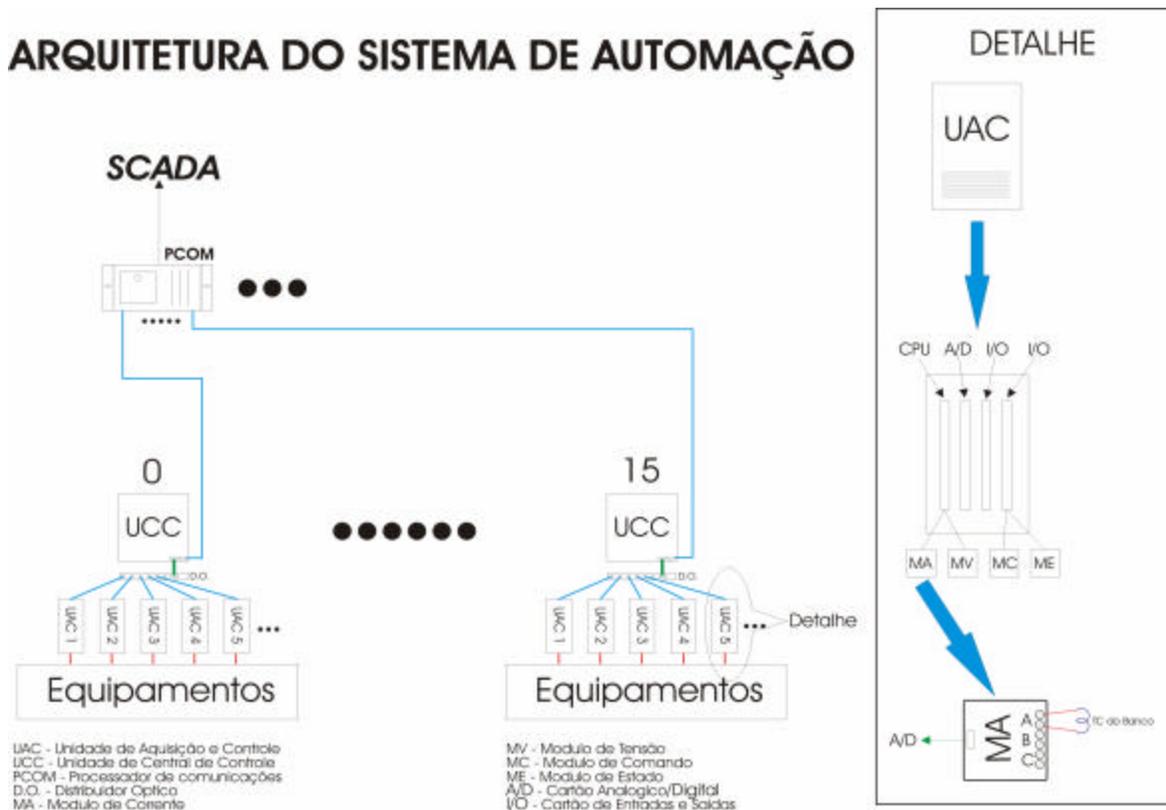


Fig. 3 – Arquitetura da rede de automação Celpe

A UAC (Unidade de Aquisição e Controle) é o componente do sistema onde se realiza a aquisição dos dados digitais (estados) e analógicos (leituras de grandezas). Uma vez coletado (através do módulo de corrente – MA, que consiste em um transdutor que converte o sinal de corrente em tensão DC) o valor da corrente de desequilíbrio da dupla estrela é adquirido pela UAC, na qual é convertido para um sinal digital que é enviado para a UCC (Unidade Central de Controle) e visualizado na Tela de Medidas, conforme a figura 4. Em seguida, segue seu caminho pelo sistema e é armazenado no PCOM (Processador de Comunicações) até ser adquirido pelo software SCADA (Action View), que é representado na figura 5, à taxa de uma amostra a cada 40s.

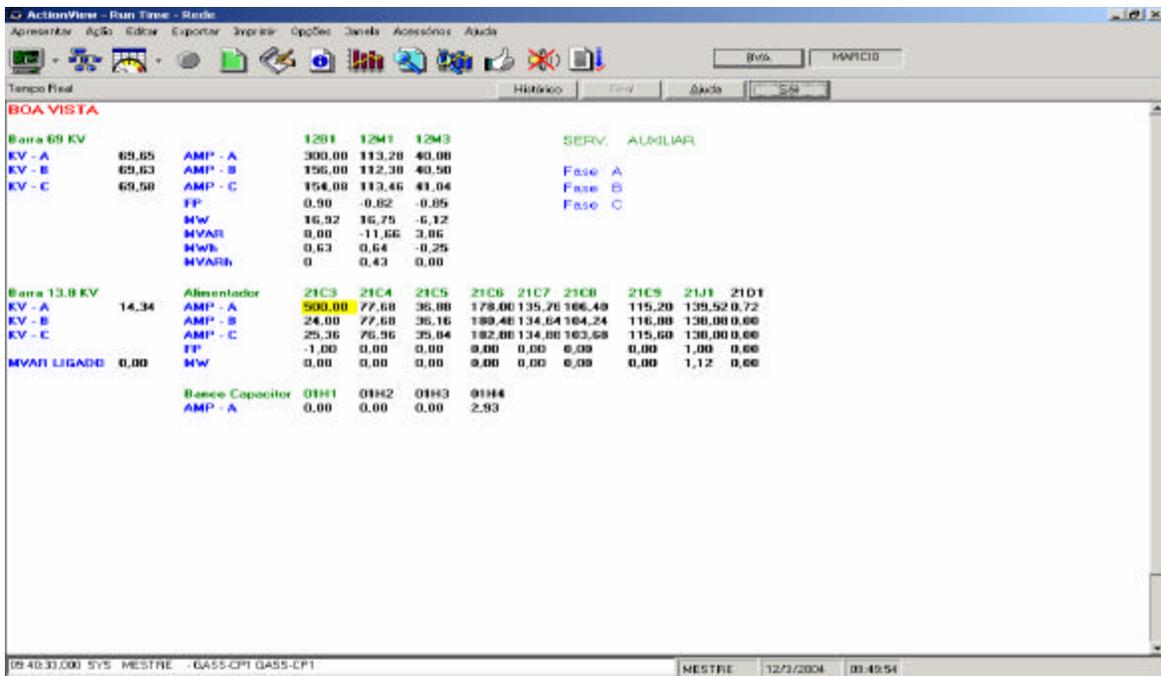


Fig. 4 - Tela de Medidas

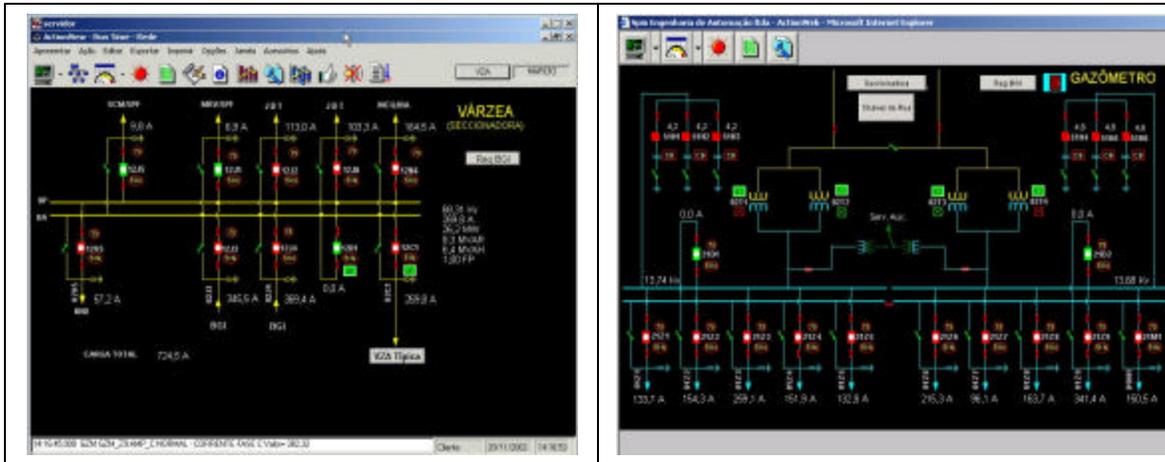


Fig. 5 - Action View (Telas do sistema)

Qualquer informação gerada pelo sistema de automação permanece disponível em nossa intranet, através de um servidor web (ACTION WEB), e pode ser consultada a qualquer tempo pelas equipes de manutenção ou por qualquer área de interesse da empresa. Por outro lado, todos os dados analógicos são armazenados em um servidor de histórico com uma taxa de um registro (para cada variável) a cada 5 (cinco) minutos, durante um período de 6 (seis) meses. Após este período, os dados são armazenados em fita e DVD por tempo indefinido. Possibilitando a formação de uma massa de dados adequada para estudos posteriores.

Nas figuras 6 e 7 a seguir é possível uma visualização da arquitetura da rede SCADA, contemplando a integração (TI) das diversas regionais e sub-sistemas operativos da Celpe.

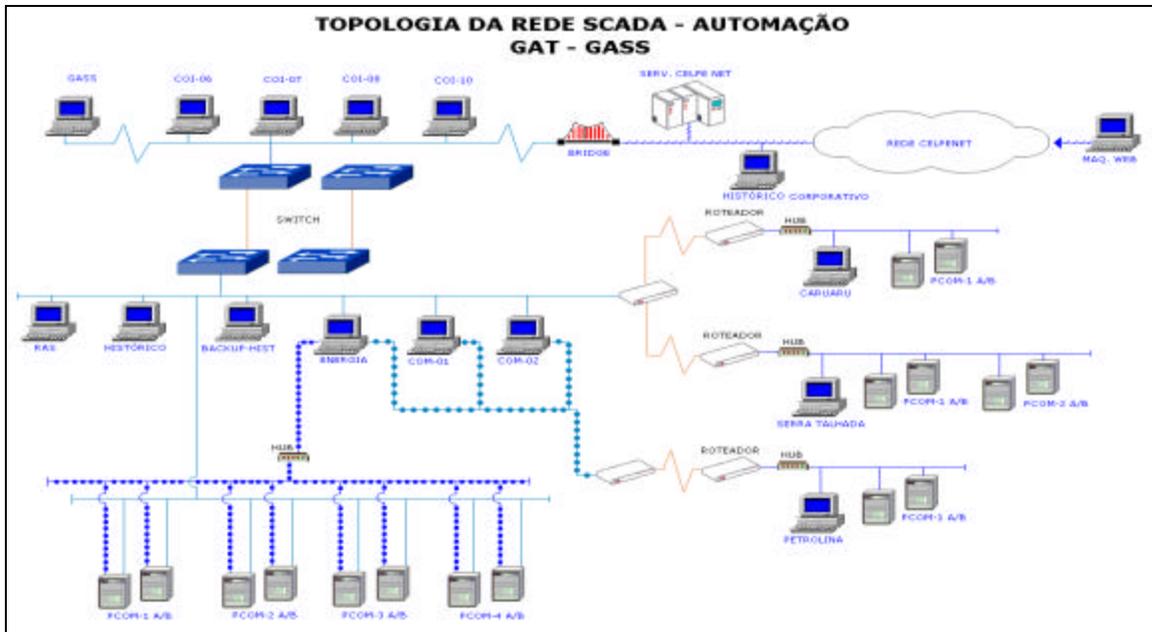


Fig. 6 - Arquitetura do SCADA

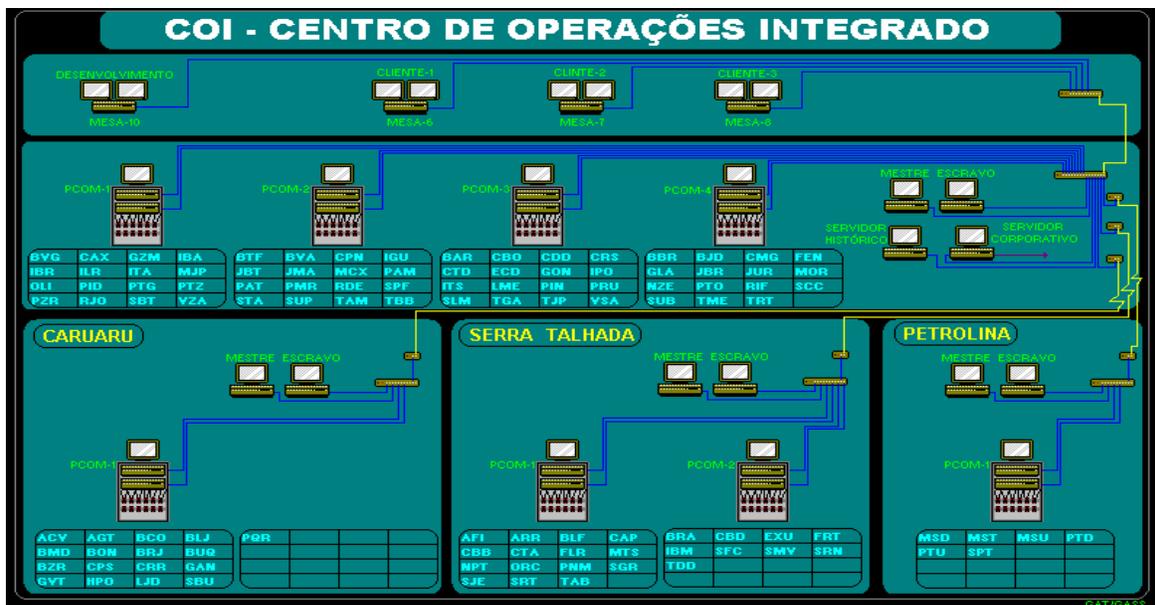


Fig. 7 - Arquitetura do SCADA

5.2 Geração de relatórios

O sistema SCADA coleta e armazena 288 (duzentos e oitenta e oito) registros de corrente de desequilíbrio por dia de cada banco de capacitores; entretanto esses dados não constituem informação. É necessário efetuar um tratamento adequado dessa massa de dados, a fim de gerar informação útil. Por isso, foi desenvolvida uma aplicação que acessa o banco de dados e realiza uma análise das medidas, visando identificar os bancos de capacitores, cujos valores das correntes de desequilíbrio encontram-se acima de um valor previamente definido para cada configuração e os armazena em um banco de dados específico. Então, é

produzido um relatório que relaciona os bancos de capacitores excederam o limite de corrente estabelecido. Este relatório é gerado diariamente e disponibilizado no site da automação. A figura 8 apresenta um exemplo de relatório disponibilizado pelo sistema.

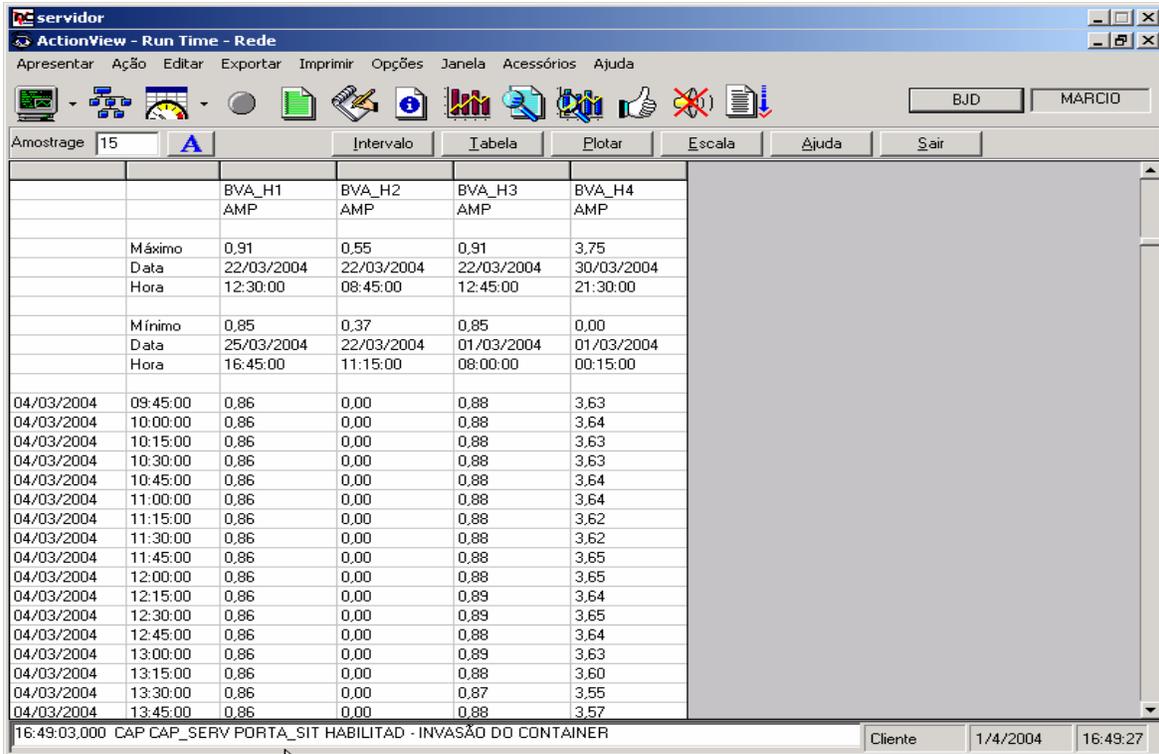


Figura 8 – Relatório de leituras

5.3 Geração de alarmes e mensagens

Atualmente, embora os dados de corrente de desequilíbrio estejam disponíveis online, ainda é necessário consultá-los periodicamente para fazer um diagnóstico. Assim, o próximo passo lógico do sistema será gerar alertas automaticamente para a área de manutenção. Estes sinais de alerta devem contemplar vários níveis de severidade, classificados conforme a taxa de variação no tempo e o desvio do valor limite em: crítico, alarme e emergencial. É considerado crítico um sinal produzido a partir de uma variação significativa da corrente de neutro; o alarme é produzido sempre que for atingido o valor limite admissível para operação do banco (vide quadro 3); e o sinal emergencial é emitido quando ocorre a atuação do sistema de proteção por desequilíbrio.

Encontra-se em fase de conclusão o módulo que conversa com o sistema SCADA e gera automaticamente e-mails ou mensagens (SMS) para o celular do responsável pela manutenção, agilizando bastante o processo de detecção de possíveis defeitos e correção de falhas consequentes.

A figura 9 a seguir apresenta um gráfico que é produzido pelo sistema, a partir das leituras obtidas durante um período de observação, para subsidiar a análise de tendência. Futuramente, a incorporação de ferramentas de inteligência artificial (lógica fuzzy e redes neurais) poderá auxiliar essa análise e o processo decisório.

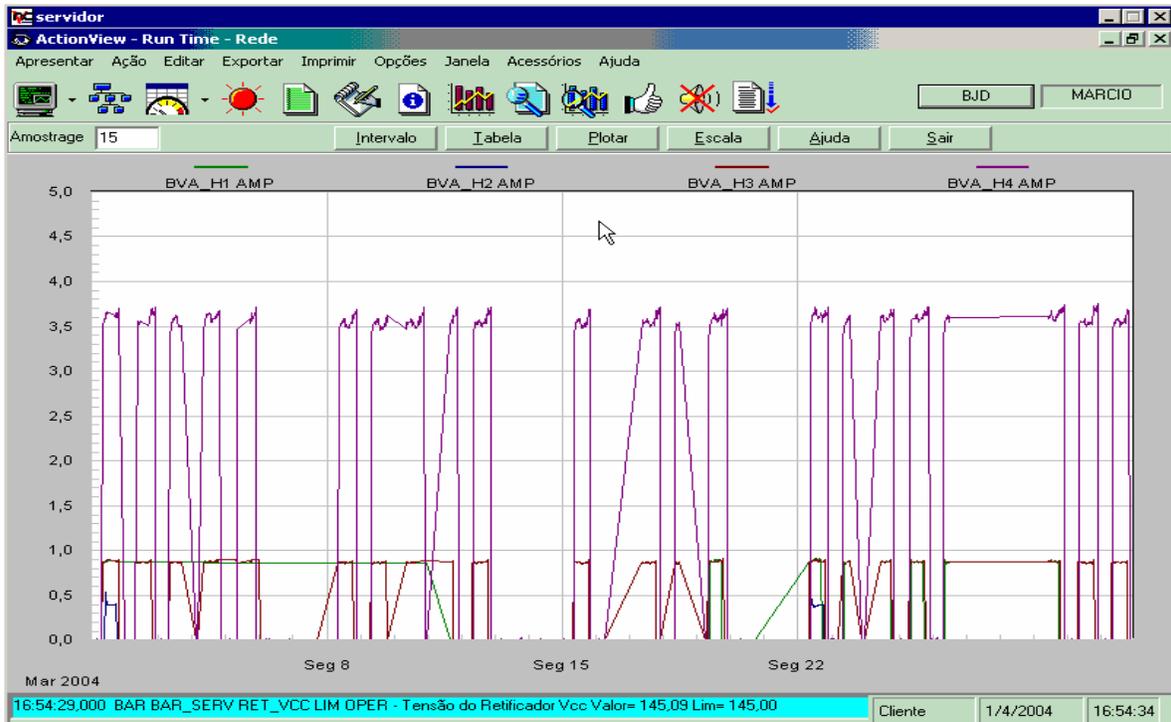


Figura 9 – Gráfico para subsidiar a análise de tendência

6. ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

Para uma análise qualitativa de custo-benefício da implantação da metodologia proposta neste trabalho, devem ser considerados alguns aspectos relevantes da estrutura de custos de difícil mensuração, sob o ponto de vista geral, dada a diversidade das configurações e as peculiaridades de cada instalação específica, mas que são facilmente apurados para cada caso em particular. Deve-se salientar também que embora alguns custos sejam de natureza intangível, ensejam fortes impactos sobre as receitas e despesas da concessionária.

Assim, considera-se a estrutura de custos relativa a cada forma de atuação da manutenção, de maneira a efetuar uma análise comparativa, segundo um critério qualitativo de custo-benefício.

6.1 Custos da manutenção corretiva

Os custos associados a um reparo contemplam duas grandes parcelas:

a. Custo da interrupção no fornecimento - envolve os custos abaixo discriminados:

Para a concessionária:

- Risco de perda da concessão: custo de natureza intangível de grande impacto.
- Perda de imagem comercial: custo de natureza intangível com grande impacto a médio prazo.
- Perdas financeiras relativas à diminuição do faturamento: devido a critérios de revisão tarifária adotados pelo órgão regulador e ao lucro cessante.

Para os consumidores:

- Custos decorrentes da perda de produção - cuja mensuração depende do processo produtivo associado, podendo assumir proporções bem superiores aos da concessionária.
- Custos internos devido a danos em equipamentos - Depende do perfil do cliente considerado.
- Desconforto

b. Custo da intervenção - envolve os custos abaixo discriminados:

- Custo do atendimento operacional: constituído pelos custos de deslocamento, material aplicado e mão de obra.
- Custo das perdas técnicas: decorrentes da indisponibilidade e degradação dos capacitores remanescentes.

6.2 Custos da manutenção preventiva baseada no tempo de operação

Envolve os custos resultantes de uma intervenção de grande porte, na qual é seguido um roteiro predeterminado que contempla a troca de componentes que podem ainda se encontrar em bom estado e que geralmente demanda muito tempo de indisponibilidade da instalação. Para fins de apuração, devem ser considerados os custos citados para um atendimento de natureza preventiva.

6.3 Custos da manutenção preditiva

Os custos associados à implantação da metodologia proposta incorrem em duas parcelas:

- a. Custo do monitoramento: reduzido, uma vez que o sistema supervisório de automação já foi implementado e o parâmetro de interesse está monitorado.
- b. Custo da intervenção: reduzido, pois as tarefas são otimizadas e demandam um tempo menor de execução, desse modo podendo ser associadas a outras atividades na mesma subestação.

Obviamente, desde que a diagnose seja efetiva para evitar eventuais intervenções corretivas, a manutenção preditiva irá fornecer a melhor relação custo-benefício dentre todas as alternativas apresentadas, uma vez que a falha do banco de capacitores pode causar a indisponibilidade da instalação, com a conseqüente interrupção do fornecimento do serviço de energia elétrica.

7. CONCLUSÃO

Considerando uma expectativa de vida útil de 20 anos para os capacitores de potência, segundo as fórmulas empíricas desenvolvidas e constantes na literatura para estimar esse parâmetro, observou-se que cerca de 55% das células capacitivas em operação na área piloto desse estudo encontravam-se com mais de 10 anos de operação.

Esse fato poderia suscitar a necessidade de uma substituição em bloco desses componentes em caráter de urgência; todavia, as atuais restrições orçamentárias nas empresas do setor impõem a necessidade de priorização dos investimentos. Não obstante, mesmo em capacitores novos existe o risco de falhas dielétricas advindas de imperfeições intrínsecas de fabricação ou de solicitações externas (sobretensões de regime, surtos, harmônicas) que vêm se tornando cada vez mais freqüentes com a complexidade dos sistemas e das cargas. Ademais, o ensaio de durabilidade para capacitores novos, prescrito na norma ABNT [4], é considerado especial, devido principalmente ao custo envolvido na execução.

Diante do exposto, torna-se evidente a necessidade de um sistema de alarme e proteção que, além de ser confiável e seletivo, também permita alto grau de disponibilidade por facilitar as interfaces das equipes de operação e manutenção. Os sistemas de monitoramento, se aplicados com critérios objetivos, podem ser uma valiosa ferramenta de apoio à manutenção para redução de custos e de desligamentos forçados criando a oportunidade para se alterar gradativamente a filosofia de manutenção com base no tempo de operação para manutenção preditiva.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual Inducon de Capacitores de Potência - 3ª edição - abril, 1999.
- [2] FILHO, J. M., Manual de Equipamentos Elétricos Vol.2 – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1993.
- [3] PASSOS, A. C., DUARTE, L. H. S., NOVAIS, M. S., ALVES, M. F. – Teoria e Proposta Para Avaliação da Degradação de Longa Duração (Envelhecimento) de Capacitores de Potência SNPTEE, 2003.
- [4] ABNT NBR 5282, Capacitores de Potência em Derivação para Sistema de Tensão nominal acima de 1.000V – Especificação, 1988.
- [5] DIAS, G. A. D. – Harmônicas em Sistemas Industriais. EDIPUCRS, 1998