



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE 04  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO VIII**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE**

#### **MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE BUCHAS CAPACITIVAS DE TRANSFORMADORES**

**Marcos Vinicio Haas Rambo<sup>1,\*</sup> Carlos Cesar Krauss<sup>1</sup> Roberto Jasinski<sup>2</sup> Ivan Jorge Chueiri<sup>3</sup>**

<sup>(1)</sup>COPEL TRANSMISSÃO S.A.

<sup>(2)</sup>COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A.

<sup>(3)</sup>INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC

## **RESUMO**

Buchas capacitivas de alta tensão estão entre as principais fontes de falha de grandes transformadores de potência, os quais pertencem ao grupo de componentes mais caros e estrategicamente importantes de qualquer sistema de geração e transmissão de energia. Por isso, muitas empresas vêm introduzindo intensa supervisão preditiva para as buchas.

Sistemas *off-line* de monitoramento de buchas apresentam a limitação de não conseguirem detectar a tempo faltas que se desenvolvem rapidamente. Ainda, muitos deles precisam ser feitos com o equipamento fora de serviço, o que diminui a disponibilidade do transformador e onera a concessionária de energia. Por outro lado, sistemas de monitoramento em tempo real têm se mostrado como ferramentas confiáveis na avaliação do estado da isolamento das buchas capacitivas. Pela análise do fator de potência (FP) e da capacitância da isolamento, eles são capazes de detectar a maior parte dos tipos de falhas.

O presente artigo discute sobre o monitoramento em tempo real de buchas capacitivas e descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoramento integrado à automação da COPEL.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Buchas Capacitivas, Isolamento, Monitoramento, Fator de Potência, Capacitância.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

Buchas capacitivas de alta tensão são componentes críticos de qualquer planta do sistema elétrico e estão entre as principais fontes de falha de grandes transformadores de potência. Sozinhas elas podem corresponder a até 30% do total das falhas (1, 2).

O envelhecimento das buchas e os estresses térmico, elétrico e mecânico, aos quais elas estão sujeitas, são fatores que favorecem a degradação da sua isolamento. A quebra da isolamento é comumente seguida de um evento catastrófico, como a explosão da bucha, que pode causar interrupção no fornecimento de energia e destruição de outros equipamentos da subestação (SE), além de expor ao risco a integridade física de funcionários. Por isso, a manutenção e o monitoramento da condição das buchas são essenciais e têm sido realizados intensamente pelas concessionárias de energia, para minimizar o risco de falhas e evitar o desligamento forçado de transformadores de potência, os quais pertencem ao grupo de componentes mais caros e estrategicamente importantes de qualquer sistema de geração e transmissão de energia.

(\*) Rua José Izidoro Biazzetto, 158 – sala 186 – Bloco A – CEP 81200-240 Curitiba, PR – Brasil  
Tel: (+55 41) 3331-2397 – Fax: (+55 41) 3331-3660 – Email: marcos.rambo@copel.com

A avaliação do estado da isolação de buchas pode ser executada com o equipamento desconectado, *off-line*, ou conectado à rede, *on-line*. A medição *off-line* do fator de potência e da capacitância permite uma análise detalhada e é o procedimento de teste mais eficiente na detecção precoce da contaminação e da deterioração da bucha (3), porém tira o transformador de operação e onera a concessionária pela diminuição da sua disponibilidade. Entre os testes *on-line* periódicos, pode-se destacar a inspeção visual, a análise de gases dissolvidos e a varredura por infravermelho. No entanto, tanto a determinação *off-line* do fator de potência e da capacitância da bucha como os testes *on-line* não contínuos possuem limitações e, como são periódicos, compartilham a fraqueza de não conseguir detectar com confiabilidade faltas que se desenvolvem rapidamente. Em condições normais, os testes periódicos são executados com uma periodicidade superior a 2 anos. Quando as buchas apresentam algum sinal de deterioração, elas são avaliadas com uma periodicidade de 6 meses a 1 ano. Estes intervalos de tempo são suficientes para o desenvolvimento de vários tipos de falta em buchas de alta tensão. O monitoramento *on-line* contínuo, ou em tempo real, do fator de potência e da capacitância da bucha tem se mostrado como a técnica mais confiável na avaliação de buchas capacitivas de alta tensão, pois possibilita a identificação de variações do estado de isolação da bucha e a intervenção por equipes de manutenção antes que a perda da isolação possa provocar eventos catastróficos (1, 4, 5).

A competitividade, o alto custo da indisponibilidade de equipamentos e do não fornecimento de energia, os elevados custos de manutenção corretiva e os requisitos de confiabilidade são fatores que justificam a utilização de sistemas de avaliação *on-line* do estado de degradação da isolação de buchas capacitivas. Isto motivou a COPEL e o LACTEC a desenvolverem um sistema proprietário de monitoramento em tempo real, integrado ao sistema de automação da COPEL, de buchas de grandes transformadores de potência.

## 2.0 - PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO ON-LINE DE BUCHAS CAPACITIVAS DE ALTA TENSÃO

A medição do fator de potência e da capacitância da isolação é o teste de campo mais completo para avaliação de buchas capacitivas de alta tensão. Ela é capaz de detectar a maioria dos problemas (1). Conforme a bucha se deteriora, pelo envelhecimento e danos na estrutura da sua isolação, a capacitância da bucha e o fator de potência se alteram. Desta maneira, o monitoramento de buchas em tempo real consiste em avaliar as mudanças nestas duas grandezas.

Porém, para fornecer maior confiabilidade aos dados e auxiliar na correta interpretação da variação dos valores da capacitância e do fator de potência da bucha, monitoram-se também o somatório das correntes que circulam pela isolação do conjunto trifásico de buchas, as temperaturas ambiente e do óleo do transformador, e a umidade relativa do ar.

### 2.1 Determinação do Fator de Potência e da Capacitância da Isolação

Buchas capacitivas de alta tensão são geralmente projetadas com camadas de papel celulose impregnado com óleo ou resina e camadas condutoras ou semicondutoras para controle do campo elétrico. Em uma análise aproximada, elas podem ser modeladas por duas capacitâncias,  $C_1$  e  $C_2$ . A primeira é a capacitância entre o condutor principal e a derivação de ensaio, ou tape capacitivo, e é aquela medida pelo monitoramento *on-line* de buchas capacitivas. Variações no valor de  $C_1$  indicam quebra parcial da isolação entre camadas. A segunda é a capacitância entre o tape capacitivo e o flange aterrado da bucha, Figura 1a. Em condições normais de operação, a capacitância  $C_2$  está curto-circuitada ao terra pelo aterramento do tape capacitivo e não está sujeita a estresses elétricos (3, 6).

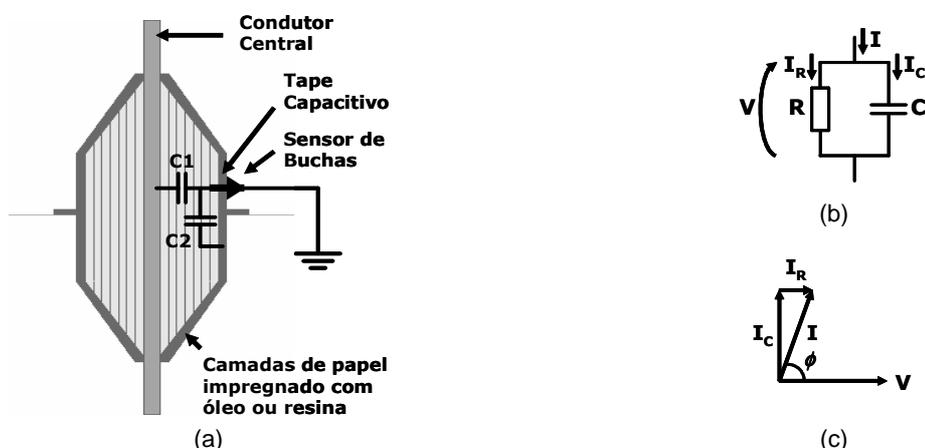


FIGURA 1 – (a) Detalhes construtivos de uma bucha capacitiva de alta tensão. (b) Circuito equivalente das perdas dielétricas. (c) Diagrama vetorial simples do fator de potência  $\cos(\phi)$ .

No entanto, a passagem de corrente pela isolação da bucha provoca a dissipação de potência ativa, a qual é representada por resistores em paralelo às capacitâncias equivalentes da bucha, Figura 1b e Figura 1c. Em buchas novas, o valor do fator de potência é pequeno, pois as perdas dielétricas são muito pequenas. Durante o mecanismo de quebra da isolação parcial entre camadas semicondutoras, o fator de potência é alterado pelo aumento da condutividade na região (2, 4). Por isso, o aumento do fator de potência é um parâmetro de interesse para a identificação de falhas na isolação da bucha.

A determinação da capacitância  $C_1$  e do fator de potência da bucha é realizada através de um sensor inserido entre a derivação de ensaio da bucha, tape capacitivo, e o flange aterrado da mesma. No sistema apresentado neste trabalho, utilizou-se um sensor previamente desenvolvido, doravante denominado sensor de bucha, específico para esta finalidade. O sensor é constituído por resistores e componentes de proteção, isto é, varistor e centelhador. O seu equivalente pode ser simplificado a um resistor de baixo valor,  $R_S$ , quando comparado à impedância da isolação da bucha. A figura 2 apresenta o diagrama elétrico equivalente dos circuitos da bucha e do sensor.

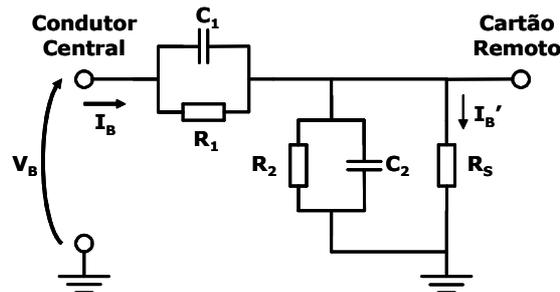


FIGURA 2 – Esboço do diagrama elétrico equivalente da isolação da bucha capacitiva de alta tensão e do sensor de buchas.

Devido ao baixo valor da resistência  $R_S$ , pode-se simplificar o circuito elétrico da figura 2, pois  $R_S \ll |X_{C2}|$  e  $R_S \ll R_2$ . Desta maneira, assume-se que a corrente passante por  $R_2$  e  $C_2$  é praticamente nula, isto é,  $I_B \approx I_B'$ . Na determinação da corrente que circula pela isolação da bucha, pode-se também desconsiderar a influência de  $R_1$ , porque o fator de potência da bucha é próximo de zero, ou seja,  $R_1 \gg |X_{C1}|$ . Obtém-se então um circuito em série de  $R_S$  com  $C_1$ . Como  $R_S \ll |X_{C1}|$ , assume-se que a corrente passante pela bucha é resultado direto da divisão da tensão da bucha por  $X_{C1}$ . Logo, a capacitância  $C_1$  pode ser determinada por:

$$C_1 = \frac{|I_B'|}{2 * \pi * f * |V_B|} \quad [1]$$

onde  $I_B'$  é a corrente que circula pelo sensor de buchas e é aproximadamente igual a corrente que circula pela isolação da bucha,  $V_B$  é a tensão da bucha,  $f$  é frequência do sistema e  $C_1$  é a capacitância entre o condutor principal e a derivação de ensaio da bucha.

$I_B'$  pode ser obtida diretamente pela lei de Ohm a partir da tensão sobre  $R_S$ . Conseqüentemente, como  $I_B \approx I_B'$ , a corrente  $I_B$  também é determinada desta maneira. Percebe-se assim, que após as simplificações discutidas acima, o sensor de buchas atua como um divisor de tensão em relação à isolação entre o condutor principal e a derivação de ensaio. Para buchas de alta tensão, o módulo da tensão sobre o sensor de buchas é da ordem de dezenas de volts, ou seja, de 1000 a 10000 vezes menor que o módulo da tensão do condutor principal. Por isso, as simplificações sugeridas não induzem a erros significativos na determinação da corrente  $I_B$ .

Com  $I_B$  e  $V_B$ , pode-se determinar o fator de potência da bucha com:

$$FP\% = \cos(\phi) * 100 \quad [2]$$

onde  $FP\%$  é o fator de potência da impedância da bucha em porcentagem e  $\phi$  é a diferença de fase entre  $I_B$  e  $V_B$ .

## 2.2 Temperaturas, Umidade e Cálculo do Somatório das Correntes

Variações na temperatura e na umidade relativa do ar provocam mudanças nos valores da capacitância e no fator de potência de buchas capacitivas (4). Sabe-se também que a relação entre a variação da temperatura da bucha e o seu fator de potência fornece uma boa indicação da deterioração da sua isolação (7). Por isso, o conhecimento da temperatura do topo do óleo do transformador, da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar é importante para a correta avaliação do estado das buchas. Ainda, a correlação entre a variação da temperatura do topo do óleo e a variação do fator de potência da bucha pode constituir uma ferramenta suplementar na identificação de problemas.

Como o conjunto trifásico de buchas de um transformador está sujeito às mesmas condições de ambiente, a influência da temperatura e da umidade nas correntes disponíveis nos tapetes capacitivos pode ser compensada pelo cálculo do somatório das correntes. Em sistemas ideais, quando as buchas são idênticas e as tensões do sistema estão perfeitamente balanceadas, o somatório das correntes é nulo. No entanto, sabe-se que as buchas nunca são idênticas e que o sistema nunca está perfeitamente balanceado. Enquanto nenhuma das buchas apresenta sinais de deterioração, o somatório das correntes é praticamente constante, possuindo uma pequena oscilação em torno de um valor médio. Desprezando-se esta oscilação, para efeito de demonstração, o somatório inicial das correntes dos tapetes capacitivos,  $I_{\Sigma}^0$ , pode ser representado como na Figura 3a. Quando alguma das buchas se deteriora, no exemplo a bucha da fase A, a sua capacitância e o seu fator de potência se modificam, fazendo com que a corrente do seu tapete capacitivo,  $I_A$ , e o somatório das correntes,  $I_{\Sigma}$ , desviem do valor inicial. A variação no somatório,  $\Delta I_{\Sigma}$ , é equivalente à variação da corrente no tapete capacitivo da bucha com problemas,  $\Delta I_A$ , Figura 3b. Decompondo a variação do somatório, Figura 3c, nas suas componentes em fase e em quadratura,  $\Delta I_{\Sigma}^R$  e  $\Delta I_{\Sigma}^Q$ , consegue-se calcular a variação do fator de potência e da capacitância, respectivamente (7).

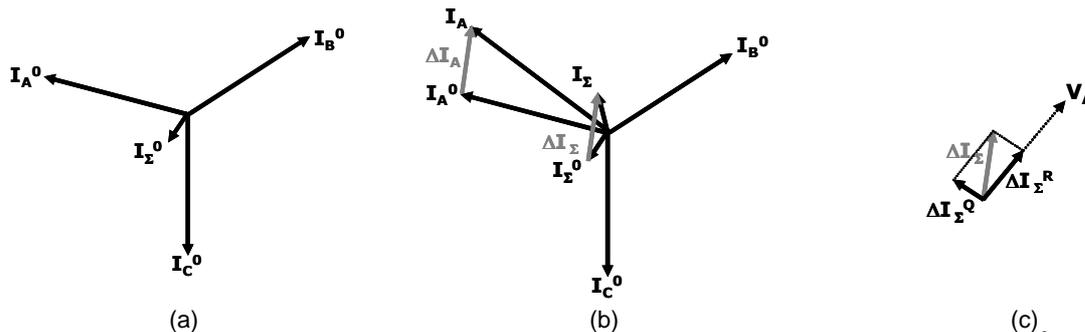


FIGURA 3 – (a) Diagrama fasorial das correntes iniciais dos tapetes capacitivos das buchas,  $I_A^0$ ,  $I_B^0$  e  $I_C^0$ , e do somatório inicial delas,  $I_{\Sigma}^0$ . (b) Variação da corrente  $I_A$ ,  $\Delta I_A$ , e conseqüente variação do somatório das correntes,  $\Delta I_{\Sigma}$ . (c) Decomposição da variação do somatório das correntes em suas componentes em fase e em quadratura,  $\Delta I_{\Sigma}^R$  e  $\Delta I_{\Sigma}^Q$ .

As variações do fator de potência e da capacitância, da bucha com problemas, obtidas com o somatório das correntes são relativas aos valores das outras buchas. Por isso, elas estão pouco sujeitas a desvios devido a mudanças de temperatura e umidade e apresentam-se como parâmetros confiáveis para a identificação de buchas problemáticas. É muito pouco provável que as três buchas do conjunto trifásico apresentem deterioração na mesma taxa. Mesmo que duas buchas apresentem problemas de isolamento ao mesmo tempo, o somatório das correntes irá indicar a ocorrência. Ele apenas identificará equivocadamente a bucha íntegra como sendo a problemática. No entanto, uma análise criteriosa do somatório das correntes dos tapetes capacitivos, da umidade e da temperatura ambientes, e dos valores da capacitância e do fator de potência de cada bucha, determinados através das equações [1] e [2], respectivamente, possibilita uma identificação confiável das buchas com problemas.

### 2.3 Limiares de Decisão

Variações na capacitância e no fator de potência da isolamento de buchas capacitivas acontecem devido à deterioração da sua isolamento, conforme discutido anteriormente. A Tabela 1 apresenta um exemplo de limiares de decisão utilizados por concessionárias no monitoramento e manutenção de buchas, indicando as faixas de variação dos parâmetros de ensaio conforme o estado da sua isolamento. Quando os limites de retirada de operação são alcançados, a operação não é mais recomendada e a segurança não pode ser garantida.

TABELA 1 – Exemplo de limiares empregados na avaliação do estado da isolamento de buchas capacitivas de alta tensão (2).

Parâmetro Medido em Ensaio	Diagnóstico		
	Aceitável	Medir com mais frequência	Retirar de Operação
Capacitância	1 ... 1,05 $C_{PLACA}$	1,05 ... 1,1 $C_{PLACA}$	> 1,1 $C_{PLACA}$
Fator de Potência	1 ... 2 $FP_{PLACA}$	2 ... 3 $FP_{PLACA}$	> 3 $FP_{PLACA}$

### 3.0 - SISTEMA PROPOSTO DE MONITORAMENTO DE BUCHAS CAPACITIVAS DE ALTA TENSÃO

A Figura 4 apresenta um esboço do sistema de automação de SEs da COPEL, ilustrando os seus dispositivos inteligentes.

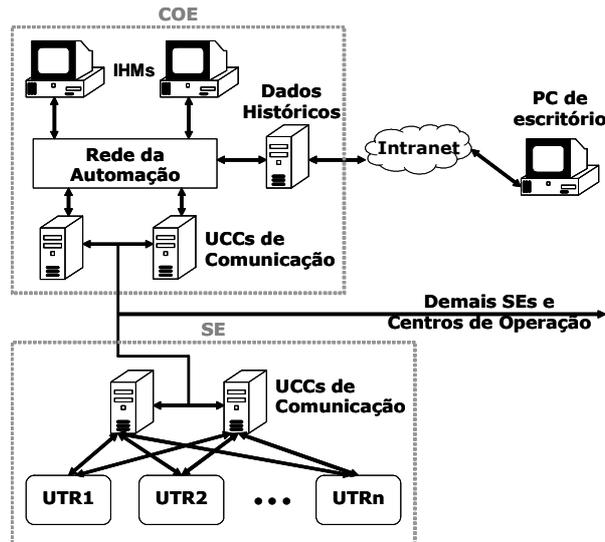


FIGURA 4 – Esboço do sistema de automação de subestações (SEs) da COPEL.

As unidades terminais remotas (UTR), sejam elas comerciais, proprietárias ou relés de proteção, realizam a aquisição de dados analógicos e de estado, controle de saídas digitais e funções de proteção. As unidades de comando e controle (UCC), presentes nas salas de comando das SE, concentram os dados de todas as UTRs de uma SE, via protocolo DNP3 ou outro qualquer, e comunicam-se com UCCs de comunicação presentes nos COEs. Nos COEs, existe uma rede de automação com no mínimo 4 UCCs: 2 para comunicação com as SEs e 2 para interface homem-máquina (IHM). Em conjunto com as UCCs, há um computador pessoal (*personal computer* - PC) com duas interfaces de rede: 1 para rede de automação e outra para a intranet. Este PC armazena dados históricos do sistema de automação e disponibiliza estas informações na rede corporativa da COPEL, para que qualquer usuário habilitado possa analisá-los.

O desenvolvimento do sistema de monitoramento de buchas proposto compreende: os sensores de bucha, um aplicativo para execução nos PCs de escritório; a configuração dos PCs que armazenam os dados históricos; e a adaptação da UTR desenvolvida pela COPEL para:

- a. Aquisição da umidade e temperatura ambiente, temperatura do topo do óleo, correntes dos tapes capacitivos e tensões do conjunto trifásico de buchas de um transformador de potência;
- b. Determinação dos fatores de potência, capacitâncias e somatório das correntes dos tapes capacitivos;

Neste contexto, as UTRs são responsáveis por disponibilizar as informações acima ao sistema de automação, e os PCs dos COEs, que armazenam os dados históricos, criam um banco de dados acessível pela intranet. Finalmente, o aplicativo dos PCs de escritório acessam o banco de dados e disponibilizam graficamente os dados aos responsáveis pela avaliação do estado das buchas capacitivas de alta tensão.

O presente trabalho tem seu foco na adaptação da UTR para a função de monitoramento de buchas, uma vez que nela está concentrada a aquisição e cálculo das grandezas desejadas. Os outros blocos, por outro lado, constituem apenas um caminho para visualização dos dados das buchas pela equipe de manutenção.

### 3.1 Unidade Terminal Remota (UTR)

No seu sistema de automação de SEs, a COPEL conta com UTR proprietárias, as quais são denominadas unidades de aquisição e controle (UAC). As UACs são constituídas de um computador industrial e de um cartão inteligente específico para a automação. Elas atuam como nível básico do sistema de automação e são responsáveis pela aquisição e controle de 16 entradas analógicas (*analog inputs* – AIN), 48 entradas binárias (*binary inputs* – BIN) e 24 saídas binárias (*binary outputs* - BOUT). Com este conjunto de entradas e saídas, elas são capazes de monitorar e comandar até dois circuitos em uma SE. Sendo dispositivos eletrônicos inteligentes (*intelligent electronic devices* – IED), as UACs realizam algumas funções inteligentes, como por exemplo: desligamento por sub-freqüência e alarmes de sobre-corrente. Elas também são capazes de determinar grandezas analógicas indiretas, como: potência ativa, potência reativa, freqüência e defasagem entre sinais de tensão.

O computador industrial realiza a comunicação da UAC com as UCCs da SE, através de um interface de rede ou interfaces seriais, o armazenamento de dados estáticos em disco, IHM, controle do cartão inteligente e interface do banco de dados do cartão com a rede de automação.

O cartão inteligente de aquisição e controle possui um processador digital de sinais (*digital signal processor* – DSP), um dispositivo lógico programável (*erasable programmable logical device* – EPLD), conversores analógico-digitais (*analog-to-digital converters* – ADC), reguladores de tensão e circuitos de entrada e saída. O DSP é responsável pelo controle dos demais dispositivos do cartão, cálculos matemáticos e funções inteligentes. A EPLD faz a decodificação de endereços do barramento do computador industrial, decodificação de endereços dos dispositivos do cartão, geração da frequência de amostragem dos ADCs, medição da frequência e defasagem entre AINs.

Interfaces analógicas fazem a isolamento e a conformação dos sinais provenientes do pátio da SE. Após estas interfaces, as formas de onda de tensão e corrente provenientes dos transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), respectivamente, são convertidas em formas de onda com  $2,72V_{RMS}$ , para valores nominais do TP e do TC. Além das interfaces de tensão e corrente, existem interfaces para conformação dos sinais provenientes de transdutores de monitoramento da posição do tape e da temperatura do topo do óleo de transformadores. Conversores analógico-digitais (*analog-to-digital converters* – ADC) fazem a aquisição dos sinais analógicos devidamente adequados à sua faixa de operação.

Existem ainda interfaces de estado e comando, para isolamento e adaptação das BINs e dos BOUTs do cartão inteligente aos equipamentos do pátio da SE.

### 3.2 A Unidade de Aquisição e Controle (UAC) no Sistema de Monitoramento de Buchas Capacitivas de Alta Tensão

A Figura 5 apresenta o diagrama em blocos do monitoramento na UAC de apenas uma bucha capacitiva, para que o diagrama pudesse ser simplificado, pois o monitoramento das outras duas buchas do conjunto trifásico é análogo. Estão ilustrados os equipamentos envolvidos para a medição da tensão do enrolamento principal da bucha e da corrente do tape capacitivo. Os processos para medição das temperaturas e umidade não estão representados, pois eles ocorrem de maneira semelhante à determinação da tensão das barras. Transdutores de temperatura e umidade fornecem sinais proporcionais às variáveis. Os sinais são isolados, conformados e disponibilizados ao cartão inteligente da UAC. Na figura 5, pode ser observado o cartão remoto localizado juntamente com o transformador no pátio da SE. Também podem ser visualizadas a interface de isolamento e conformação do sinal de tensão do TP, a interface de recepção e conformação do sinal digitalizado da corrente da bucha e a UAC, as quais são instaladas na sala de comando da SE.

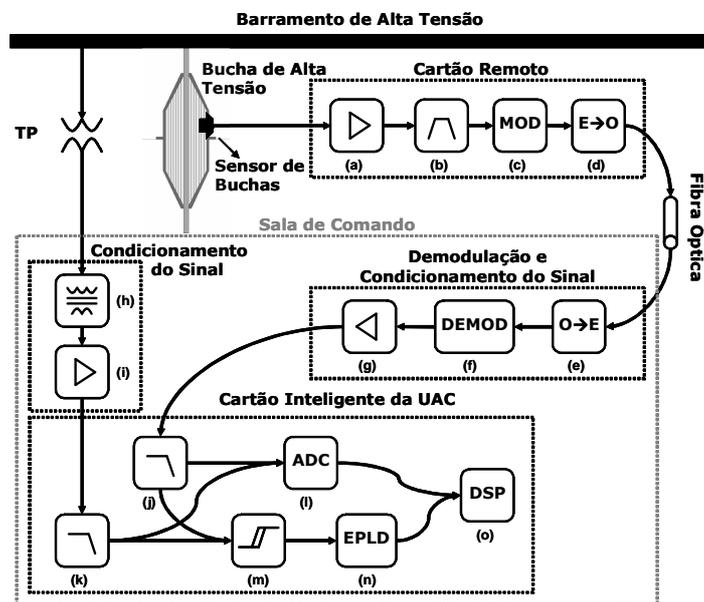


FIGURA 5 – Diagrama em blocos do monitoramento de buchas capacitivas de alta tensão na unidade de aquisição e controle (UAC).

A corrente que circula pelo tape capacitivo da bucha produz uma DDP da ordem de dezenas de volts sobre o sensor de buchas. Esta DDP é atenuada para ficar com tensão de pico (VP) na faixa de 0 a 5 V, bloco (a). A atenuação é proporcional a um fundo de escala pré-configurado a partir do valor nominal do módulo da corrente que circula pela isolamento da bucha. Após a atenuação, o sinal é filtrado pelo filtro passa-faixa (FPF) de quarta ordem do bloco (b), o qual é do tipo butterworth e tem frequência central de 60 Hz. O sinal filtrado é modulado em frequência de pulsos e convertido de elétrico para óptico, blocos (c) e (d), respectivamente. Então, o sinal é transmitido opticamente do pátio para a sala de comandos da SE. A transmissão óptica tem o objetivo de diminuir a

interferência eletromagnética sobre o sinal da corrente da bucha e, conseqüentemente, melhorar a relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* - SNR).

Desenvolveu-se uma interface analógica, semelhante às demais interfaces de conformação dos sinais de tensão, corrente e temperatura, comumente utilizadas na automação da COPEL, para receber o sinal ótico transmitido pelo cartão remoto, bloco (e), demodular o sinal de pulsos, bloco (f), e ajustar a escala da forma de onda analógica obtida após a demodulação, bloco (g), fazendo com que ela tenha uma amplitude de  $2,72 V_{RMS}$  para valores nominais de corrente de bucha.

A forma de onda de tensão do TP é isolada e atenuada por um transformador na interface analógica de tensão, bloco (h). Posteriormente, é feito um ajuste fino do ganho/atenuação, bloco (i), para que valores nominais de tensão na barra de alta tensão forneçam  $2,72 V_{RMS}$  na entrada do cartão inteligente da UAC.

Os sinais de corrente da bucha e tensão da barra são filtrados por filtros passa-baixas (FPB) *anti-aliasing*, os quais limitam os espectros na freqüência dos sinais à quinquagésima harmônica. Os sinais filtrados são amostrados e quantizados pelo ADC, com freqüência de amostragem de 6 kHz, ou seja, 100 amostras por ciclo, e resolução de 13 bits mais um de sinal. Paralelamente à conversão para digital, as formas de onda analógicas passam por retificadores com *schmitt-triggers*, transformando-se em sinais discretos e binários. Os sinais binários entram na EPLD e esta realiza a medição da diferença de fase entre eles. A diferença de fase, e as formas de onda analógicas de corrente e tensão são disponibilizadas ao DSP, o qual determina o valor RMS das formas de onda pela equação [3], o somatório fasorial das correntes da isolação das três buchas, a capacitância e o FP pelas equações [1] e [2], respectivamente.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n])^2} \quad [3]$$

onde  $N$  é o número de amostras,  $N=100$ , e  $x[n]$  é uma amostra do conjunto de 100 amostras discretas da forma de onda.

O processo de medição da diferença de fase na EPLD está ilustrado na Figura 6. As formas de onda binárias de corrente e tensão passam por blocos *anti-bouncing*. O comportamento do *anti-bouncing* não está representado na Figura 6, mas ele tem o objetivo de eliminar de repiques no limiar de decisão dos *schmitt-triggers*. As bordas de subida das formas de onda sem repiques são usadas como início e fim contagem por um contador com freqüência de *clock* de 625 kHz. A borda de subida da onda binária de tensão também é usada como pulso de registro do valor do contador, *reset* do contador e indicação ao DSP de valor disponível. O DSP fica realizando varredura contínua, com intervalo de 1 ms entre elas, verificando a disponibilidade de novos valores de diferença de fase e habilitando novas medidas. A partir do valor do contador, o DSP determina a diferença de fase em graus pela equação [4].

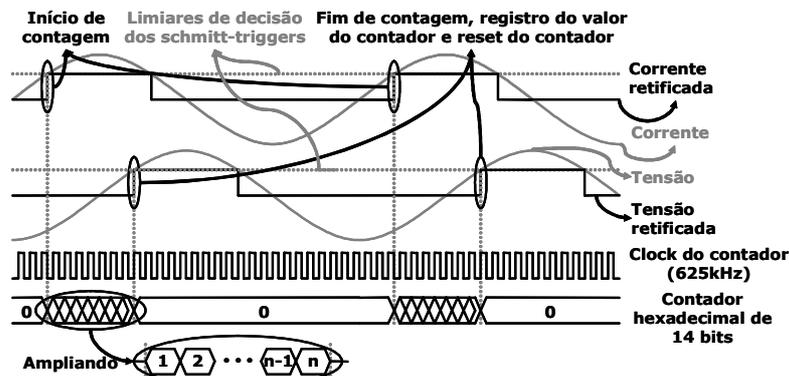


FIGURA 6 – Funcionamento da medição da diferença de fase entre o sinal de corrente do tape capacitivo e a tensão de uma bucha.

$$\Delta\phi = \frac{60 \cdot 360^\circ \cdot C}{625000} \quad [4]$$

onde  $\Delta\phi$  é a diferença de fase em graus, 60 Hz é a freqüência do sistema,  $360^\circ$  corresponde a um ciclo completo da forma de onda, 625000 Hz é a freqüência de *clock* do contador e  $C$  é o valor do contador da EPLD.

Como os parâmetros da bucha alteram-se lentamente, é realizada uma média dos valores medidos, no último segundo, da capacitância, FP e somatório das correntes, com o objetivo de fornecer uma maior fidelidade ao sistema de monitoramento.

#### 4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pequenas variações no FP e na capacitância da bucha indicam a presença de falhas na sua isolamento e podem sugerir a retirada de operação do equipamento, tabela 1. Sistemas de monitoramento em tempo real devem ser capazes de medir estas pequenas variações, para que os responsáveis pela supervisão e manutenção das buchas consigam detectar as falhas. A medida mais crítica é a do FP, pois seus valores típicos são de 0,35 a 0,7%. Desta maneira, segundo a Tabela 1, uma variação de aproximadamente  $0,2^\circ$  na diferença de fase entre a tensão e a corrente na isolamento da bucha pode implicar na mudança do diagnóstico do estado da sua isolamento. Com o circuito digital sintetizado na EPLD, consegui-se uma resolução de  $0,03456^\circ$  na medição de diferenças de fase, a qual é suficiente para o monitoramento de buchas.

O conjunto modulador/demodulador da forma de onda da corrente que circula pela isolamento da bucha introduz um *jitter* com amplitude da ordem de 25  $\mu$ s na fase da senóide, ou seja, um deslocamento randômico com valor máximo de  $\pm 0,5^\circ$  na fase do sinal. Contudo, como o *jitter* é oscilatório, o cálculo da média das medidas durante 1s, isto é, a média de 60 medidas, minimiza o erro de maneira que seja possível avaliar o FP com a precisão discutida acima. Num levantamento realizado em laboratório, com fontes de precisão e um fasímetro de referência, observou-se um erro máximo de aproximadamente  $0,07^\circ$  na medição do ângulo.

Ensaio realizados com um soprador térmico mostraram que a variação de temperatura introduz um deslocamento de até  $4^\circ$  na fase da forma de onda da corrente, devido a instabilidade dos blocos (b), (c) e (f) da Figura 5. Este deslocamento inviabiliza a medição monofásica do FP das buchas. No entanto, como os blocos estão repetidos nos mesmos cartões para a realização de medidas no conjunto trifásico de buchas, o cálculo fasorial do somatório das correntes das isolações das buchas, após calibrado para corrigir as diferenças entre os circuitos, apresentou resultados interessantes na detecção de variações no ângulo de uma das fases. Contudo, estes resultados são preliminares e devem ser analisados criteriosamente em situações com controle da temperatura ambiente.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

O sistema de monitoramento de buchas capacitivas de alta tensão apresentado neste trabalho mostrou-se como uma solução interessante para avaliação do estado da isolamento de buchas capacitivas de alta tensão. Como é realizado nas UACs, ele já está integrado ao sistema de automação da COPEL e é uma ferramenta de baixo custo, quando comparado aos sistemas de monitoramento disponíveis no mercado e ao sistema já instalado na SE Bateias, também desenvolvido em parceria pela COPEL e LACTEC, o qual faz uso de um oscilógrafo e um PC exclusivos para esta função.

As medições realizadas em laboratório pelo sistema de monitoramento proposto apresentaram precisão e exatidão desejadas. No entanto, previamente à liberação para instalação em SEs, algumas melhorias devem ser realizadas nos cartões remoto e de demodulação e condicionamento do sinal de corrente na isolamento da bucha, para que a qualidade da medição não seja comprometida por variações da temperatura ambiente.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SETAYESHMEHR, A.; AKBARI, A.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. – *A New Technique for On-Line Monitoring of Transformer Bushings* – 20<sup>th</sup> International Power System Conference (PSC 2005) – Tehran, 2005.
- (2) TEIXEIRA JÚNIOR, J. A.; SOARES, J. C.; MARTINS, C. L. L.; CHUEIRI, I. J.; JASINSKI, R.; MARQUES, D. C. – *Sistema de Monitoração de Fator de Potência e Capacitância de buchas Energizadas. Experiência Prática da COPEL e do LACTEC* – V Encontro Técnico de Manutenção de Usinas da COPEL Geração – Foz do Iguaçu, 2004.
- (3) DOBLE ENGINEERING COMPANY – *Bushing Field-Test Guide* – Doble Client Committee on Bushings, Insulators, and Instrument Transformers – Watertown, 1997.
- (4) STIRL, T.; SKRZYPEK, R.; TENBOHLEN, S.; VILAITHONG, R. – *On-line Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System* – International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2006) – Changwon, 2006.
- (5) TENBOHLEN, S.; STIRL, T.; RÖSNER, M. – *Benefit of sensors for on-line monitoring systems for power transformers* – 2<sup>nd</sup> European Conference on HV & MV Substation Equipment (MatPost 2003) – Lyon, 2003.
- (6) SETAYESHMEHR, A.; AKBARI, A.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. – *On-line Monitoring and Diagnoses of Power Transformer Bushings* – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, n.3, 2006.
- (7) LACHMAN, M. F.; WALTER, W.; GUGGENBERG, P. A. – *On-Line Diagnostics of High-Voltage Bushings and Current Transformers Using the Sum Current Method* – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, n. 1, 2000.