



VERIFICAÇÃO DA EXATIDÃO E LINEARIDADE NA MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA E FATOR DE DISSIPAÇÃO.

Márcio Antônio Sens¹, Edson Ueti²

¹ Cepel/Eletróbrás - UFF, Rio de Janeiro - Niterói, Brasil, sens@cepel.br

² Cepel/Eletróbrás, Rio de Janeiro, Brasil, ueti@cepel.br

Abstract: This work describes the experimental procedures for verification of the accuracy and the linearity in the measurement of capacitance and dissipation factor for instruments and systems of measurement. The techniques are applicable to electronic instruments that operate for any principles, as well as the instruments that operate by the bridge system, balanced automatically or manually.

Palavras chave: capacitância; medição; fator de dissipação; calibração; ponte; instrumento.

1 INTRODUÇÃO

No Setor Elétrico, particularmente em sistemas de potência, envolvendo a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica, são utilizados instrumentos e sistemas de medição de capacitância com a finalidade de identificação da qualidade dos materiais e dos dispositivos elétricos. Com exceção das finalidades metrológicas, tais medições não visam propriamente a identificação da capacitância, mas sim do fator de dissipação dos materiais ou do conjunto de materiais que constituem o sistema de isolamento elétrico. Com esta finalidade são ensaiados os materiais dielétricos líquidos e sólidos, assim como os cabos elétricos isolados para instalações elétricas subterrâneas; os transformadores elétricos de medição e de potência; as barras e as bobinas magnéticas para geradores e motores elétricos.

O fator de dissipação constitui uma característica dielétrica de um material dielétrico ou de um sistema de isolamento elétrico, sendo uma indicação do grau de pureza do meio dielétrico. Representa a qualidade, ou a dissipação relativa de calor no meio dielétrico quando submetido a um campo elétrico alternado. O fator de dissipação representa a relação da potência útil pela potência reativa do sistema capacitivo, conforme mostrado na Equação 1. Os usuários precisam conhecer a incerteza das medições e se os instrumentos encontram-se como esperado ou, pelo menos, conforme a especificação nominal indicada pelo fabricante.

$$D = \tan \delta = \frac{P}{Q} \left[\frac{W}{\text{var}} \right] \quad (1)$$

Desta forma, constitui anseio dos usuários destes instrumentos, a verificação da exatidão e da linearidade na

determinação deste parâmetro indicativo da qualidade dos produtos. O Setor Elétrico tem requerido medidas do fator de dissipação em faixas entre 10 ppm e 1%, para os sistemas de isolamento elétricos típicos, enquanto a capacitância geralmente encontra-se entre 1 pF e 10 nF.

2 OBJETIVOS

As pontes e medidores de capacitâncias são instrumentos de medidas de precisão que constituem ferramentas fundamentais na análise da qualidade do conjunto de materiais que formam o isolamento elétrico dos dispositivos mais frágeis do sistema elétrico de potência, e precisam ser verificadas periodicamente quanto à sua funcionalidade, exatidão e linearidade na medição direta ou na determinação do fator de dissipação dielétrica.

As pontes de capacitância, nas diversas modalidades encontradas no mercado, sejam do tipo Schering, pontes de relação ou automáticas, incluindo os acessórios, podem custar algumas centenas de dólares, ou até algumas centenas de milhares de dólares. Entretanto, embora o custo elevado e a complexidade de seus componentes, estes não estão isentos de falhas ou de degradação com o tempo de uso, ou mesmo pelo desuso, sob condições ambientais nem sempre adequadas. Por outro lado, embora a crescente exigência dos sistemas de qualidade, bem difundidos pelo Setor, a calibração das pontes de capacitância para alta tensão ainda não encontra o merecido suporte técnico para a rastreabilidade aos padrões nacionais e internacionais.

Para atender à demanda, e suprir a lacuna até então encontrada na verificação de instrumentos de tão alta relevância, o presente informe técnico mostra uma técnica experimental que pode ser adotada para o confronto das leituras de fator de dissipação, ou de fator de potência. A técnica de verificação proposta constitui objeto adequado para a faixa de medição desde a ordem de algumas partes por milhão (ppm), até algumas dezenas de milhares de ppm, com rastreabilidade às grandezas elétricas fundamentais dos padrões de referência nacionais e internacionais.

A recomendação clara e bem definida dos sistemas da qualidade, em especial das normas ISO da série 9000, de submeter toda a instrumentação, relevante para o bom desempenho dos produtos e sistemas, às verificações periódicas, deve ser utilizada nos mais variados segmentos

do Setor Elétrico. Tal prática não pode ser negligenciada também quando o componente se refere às pontes destinadas a medição do fator de dissipação, seja para a recepção da compra do instrumento, seja para o acompanhamento da operação normal, ou após as intervenções de manutenção.

No circuito elétrico de medição proposto, destinado à verificação das pontes de capacitância, são utilizados elementos passivos, como capacitores isolados a gás, para tensões de até 200 kV, de construção corriqueira e de fácil aquisição no mercado do gênero, sendo constituído por três terminais, um deles o guarda, e resistores de precisão. O circuito não inclui capacitores de dois terminais, muito mais raros e de construção especial. O uso do capacitor padrão de três terminais, entretanto, implica cálculos bem mais complexos, que atualmente não constitui dificuldades, considerando as disponibilidades de análises computacionais.

As técnicas de análises estatísticas, baseadas na distribuição de Student, universalmente conhecidas, são adotadas para o conhecimento do desvio instrumental das leituras em relação aos valores de referência.

A técnica experimental aqui apresentada acha-se em uso freqüente nos laboratórios do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, na Unidade Sede, no Rio de Janeiro – RJ, atendendo ao Setor Elétrico desde 1988.

3 FUNDAMENTOS E SIGNIFICADO DO FATOR DE DISSIPAÇÃO

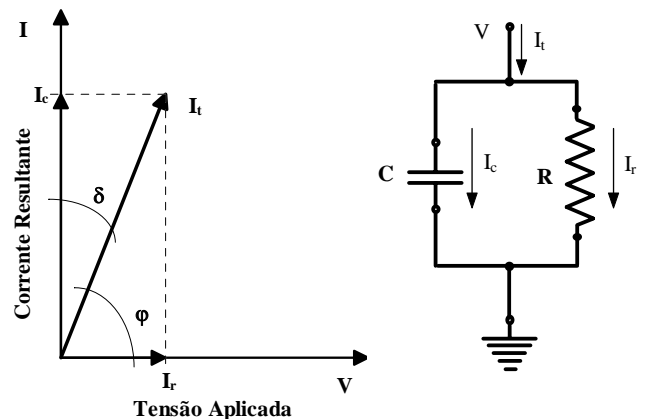
Todos os materiais isolantes elétricos possuem a característica de dissiparem alguma energia quando sob ação de campos elétricos oscilatórios, como aqueles impostos por correntes alternadas.

Referências às perdas dielétricas dos materiais dielétricos podem ser encontradas na literatura com diferentes nomenclaturas, seja como fator de perdas, fator de potência (F.P.), fator de dissipação (D , $\tan \delta$) ou simplesmente perdas. Embora diferentes nos fundamentos, estas grandezas em geral se referem às mesmas perdas e podem ser consideradas matematicamente equivalentes. Ou sejam, estes fatores representam uma característica dos materiais isolantes elétricos em dissiparem energia quando sob ação de campos elétricos alternados. O fator de dissipação, ou o fator de potência, geralmente é expresso em % ($D \times 100$ %) ou em ppm ($D \times 10^6$ ppm).

Os materiais dielétricos, quando imersos em campos elétricos alternados, comportam-se da mesma forma como um material no interior de um capacitor, que é fundamentalmente constituído por duas placas condutoras separadas por um meio isolante. Este campo elétrico aplicado ao material irá provocar uma corrente de condução, através do corpo do mesmo, e polarizará o material na direção do campo, em sentidos reversíveis, com a freqüência do campo aplicado. Esta corrente de condução irá provocar um aquecimento do material, que será adicionada à dissipação de energia provocada pela periódica reversão do campo elétrico.

Além desta corrente de condução, que é tanto menor quanto mais isolante for o material, este também será

percorrido por uma corrente de deslocamento, devido à carga e descarga do mesmo.



$$D = \tan \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{V \cdot I_r}{V \cdot I_c} = \frac{P(W)}{Q(\text{var})} \quad F.P. = \cos \varphi = \frac{I_r}{I_t} = \frac{V \cdot I_r}{V \cdot I_t} = \frac{P}{S}$$

FIGURA 1 - CIRCUITO EQUIVALENTE E DIAGRAMA VETORIAL DE UM DIELÉTRICO

Num material isolante perfeito, apenas a corrente de deslocamento aparecerá, e não haverá aquecimento, mas nos dielétricos reais sempre haverá alguma dissipação.

O fator de dissipação é definido como a relação entre duas componentes equivalentes ortogonais de correntes, a corrente resistiva, que produz as perdas, e a corrente capacitiva, de deslocamento, ou pela relação entre a potência ativa e reativa, como já mostrado na Equação 1.

Para uma determinada condição de temperatura, tensão e de freqüência aplicada ao material dielétrico, para efeitos de análise matemática e interpretação do fenômeno de perdas, pode-se obter um circuito equivalente, composto por um capacitor puro, isento de perdas, e por um resistor perfeito, hipotéticos, conforme circuito mostrado na Figura 1.

4 TÉCNICA EXPERIMENTAL

4.1 Medição da Capacitância

A verificação da habilidade de medir corretamente a capacitância por um sistema de medição requer confronto do sistema de medição com padrões de valores conhecidos e rastreáveis ao sistema internacional. Além disso, para minimizar erros e interferências neste confronto, são requeridos cuidados especiais de blindagem e de desvio das correntes parasitas dos acessórios e cabos, que constitui proeza de especialistas. Considerando apenas as técnicas para altas tensões, a melhor maneira de determinar a capacitância está na obtenção da relação entre as correntes do objeto e de um capacitor padrão, cuja capacitância é conhecida.

Para avaliações de capacitores destinados à metrologia, tanto para uso interno, quanto para uso pelas empresas do Setor Elétrico, o Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do CEPEL, na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, utiliza o sistema de ensaios mostrado na Figura 2.

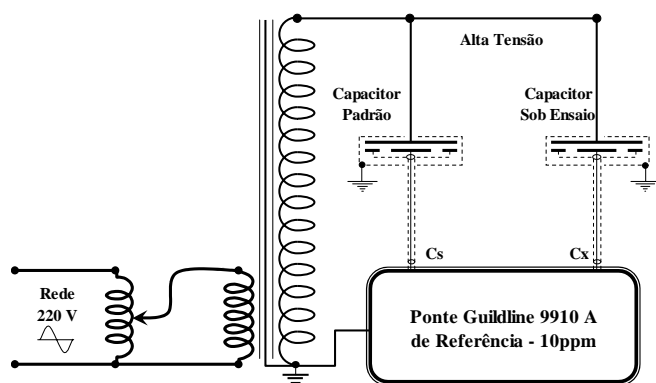


FIGURA 2 – CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIAS DE CAPACITORES PADRÕES

Para a verificação da exatidão e da linearidade na habilidade de medir capacitâncias por pontes e sistema de medição de para altas tensões, o CEPEL utiliza um banco de capacitores padrões isolados a gás, que são comparados com dois capacitores padrões de referência, de 10 e 100 pF. Estes capacitores, são da General Radio Company – USA, modelo GenRad 1408, cujos dielétricos são de sílica fundida e os eletrodos de ouro, sendo selados em nitrogênio seco. Periodicamente os mesmos são calibrados no INMETRO e são mantidos permanentemente sob temperatura de $(30 \pm 0,05) ^\circ\text{C}$. A comparação dos capacitores padrões de trabalho com os de referências é efetuada através do sistema comparador modelo GenRad 1616 incorporado ao sistema de medição GenRad 1621 do mesmo fabricante. O sistema permite a determinação da capacitância com até 12 dígitos, mas para a maioria dos propósitos determina-se com apenas 7 dígitos, e apenas na frequência de 1000 Hz.

Para a verificação da exatidão e linearidade de pontes de capacitância para baixa tensão, em frequências de até 100 kHz, no CEPEL, são utilizados diretamente os sistemas da General Radio GenRad 1616 e GenRad 1621, com os respectivos capacitores de 10 e 100 pF, anteriormente descritos.

A maioria das pontes de capacitâncias para alta tensão, por outro lado, não medem propriamente a capacitância, mas sim a relação das correntes entre dois capacitores energizados pela mesma fonte de alimentação. Desta forma, com o banco de capacitores disponível, pode-se avaliar o sistema de medição em onze distintas relações, através do circuito de ensaio mostrado na **Figura 3**.

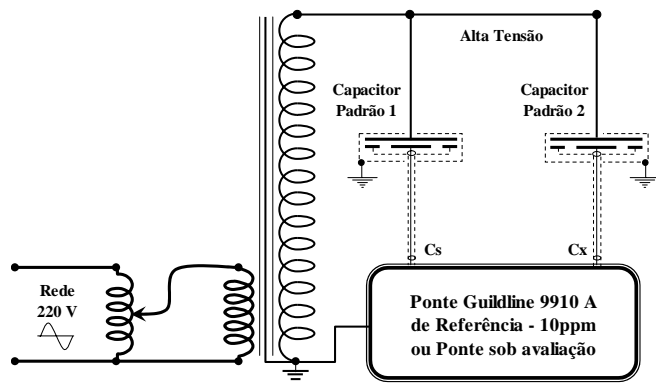


FIGURA 3 – CIRCUITO PARA AVALIAÇÃO DE PONTES DE CAPACITÂNCIA EM ALTA TENSÃO

A **Tabela 1** mostra os capacitores disponíveis e a **Tabela 2** mostra as relações obtidas entre os mesmos.

TABELA 1 – CAPACITORES PADRÕES

Capacitância nominal (pF)	Fabricante país	Modelo	Tensão máxima (kV)
10000	Tettex - Suíça	3020	2
1000	R. Jahre - Alemanha	CLP24	24
100	Micafil - Suíça	C ₁₂ -SC200	200
100	Olman - Canadá	15060	100
20	Micafil - Suíça	C ₁₃ -SC200	200

TABELA 2 – RELAÇÕES OBTIDAS COM OS CAPACITORES PADRÕES

N	Referência Cp (pF)	Amostra Cx (pF)	Relação
1	10000	20	500
2	10000	100	100
3	1000	20	50
4	1000	100	10
5	100	20	5
6	100	100	1
7	20	100	0,2
8	100	1000	0,1
9	20	1000	0,02
10	100	10000	0,01
11	20	10000	0,002

Por outro lado, para a verificação da habilidade de medir o fator de dissipação, salvo raras exceções particulares, não são encontrados padrões de referências. Pela definição do fator de dissipação, anteriormente apresentada, a construção de um padrão parece apenas um problema matemático, conforme circuito e equações mostrados na **Figura 1**, para a configuração de um capacitor associado a um resistor, seja em série ou em paralelo. Mas só parece.

4.2 Medição do Fator de Dissipação

A medição do fator de dissipação ou do fator de potência de um dielétrico pode ser efetuada com base no circuito equivalente ou no diagrama vetorial equivalente. A escolha depende dos equipamentos e técnicas disponíveis, da sensibilidade requerida e das condições de tensão e frequência aplicadas.

As pontes de capacitâncias para alta tensão são utilizadas, na maioria das vezes, apenas para se encontrar o fator de dissipação do conjunto dielétrico que constitui o sistema de isolamento do equipamento ou dispositivo sob avaliação. De fato, nestes casos, a capacitância resulta de menor importância e significado, pois não representa a qualidade do sistema de isolamento do objeto.

4.2.1 Medida do Ângulo de Perdas

Nos instrumentos de medição de capacitância eletrônicos, geralmente utilizados em baixas tensões, o princípio utilizado baseia-se na medição direta do ângulo entre a tensão aplicada e a corrente resultante. Obtendo-se este

ângulo, a determinação do fator de dissipação ou do fator de potência recai apenas em operações matemáticas trigonométricas. O ângulo de perdas δ é obtido pelo complemento para 90° do ângulo φ , mostrado no diagrama da **Figura 1**. Estes são os casos das pontes digitais, automáticas, como aquelas fabricadas pela GenRad (USA), ou Hewlett Packard (Japão) ou Wayne Kerr (UK).

4.2.2 Medida pelo Circuito Equivalente

Outro princípio utilizado para a medição do fator de dissipação se constitui na obtenção do circuito equivalente. Ou seja, o sistema de ensaio procura obter um circuito equivalente ao do objeto, que é formado por um capacitor contendo o material sob avaliação. Neste caso, o sistema confronta o objeto com capacitores e resistores considerados puros, quando comparados com a amostra. Por um sistema de balanço ou de equilíbrio entre correntes, que pode ser efetuado manual ou automaticamente, os componentes do circuito são determinados.

Este princípio é utilizado pelas pontes tipo *Schering* (1920) ou similares, como aquelas fabricadas pela Tettex (Suíça), ou Siemens (Alemanha) para alta tensão, ou pela GenRad (USA), para baixa tensão e alta frequência. Para estes casos, a determinação do fator de dissipação recai na operação matemática entre os componentes do circuito equivalente encontrado, conforme mostrado na equação seguinte.

$$D = \tan \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{\left(\frac{V}{R} \right)}{\left(\frac{V}{X_c} \right)} = \frac{X_c(\Omega)}{R(\Omega)} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}; \text{onde } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Onde f = frequência da tensão aplicada, em Hz.

4.2.3 Medição da Potência de Perdas

As perdas de um objeto energizado em corrente alternada podem ser medidas pela potência dissipada em calor, pela própria temperatura do objeto, ou pela potência elétrica consumida, em watts. Neste caso, o fator de potência - FP é determinado pela relação entre a potência dissipada (P) e a potência aparente (S) aplicada ao objeto sob análise.

Para isto, um instrumento sensível ao produto $V \cdot I$ pode ser utilizado, geralmente com um ajuste de amplitude para permitir diretamente leituras em valores percentuais. Assim, o instrumento inicialmente é ajustado para a leitura de 100%, numa determinada tensão e frequência e, numa segunda etapa, através de ajustes manuais e um circuito diferencial, uma corrente capacitiva é subtraída da corrente total, até a leitura mínima, para resultar na leitura do produto $V \cdot I_r$, correspondente ao FP já em percentagem.

A corrente capacitiva é obtida pelo uso de um capacitor a ar, de placas paralelas, variável. Este é o caso dos instrumentos fabricados pela Doble (USA). Alguns destes instrumentos têm a indicação em VA e em W, respectivamente, sendo a divisão efetuada pelo operador, após o ensaio. Esta técnica é aplicada para líquidos isolantes, sob alta tensão, com objetos numa faixa restrita de capacitâncias.

A **Figura 4** mostra um circuito diferencial destinado à medição da componente resistiva da corrente através de um dielétrico sob alta tensão.

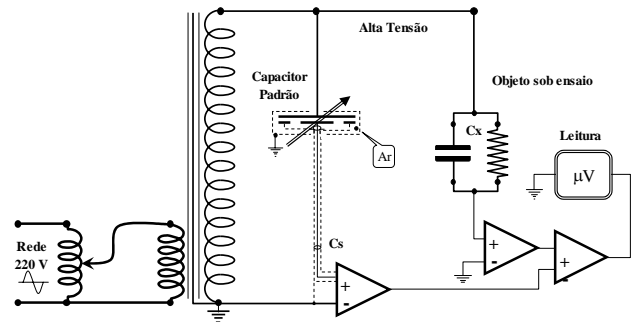


FIGURA 4 - CIRCUITO DIFERENCIAL PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE RESISTIVA E DO FP

4.2.4 Medição da Relação Entre Correntes

Nesta técnica, o objeto é comparado com um capacitor a ar ou a gás, cujas perdas podem ser consideradas desprezíveis diante das amostras sob ensaio, e a relação entre as correntes é obtida através de um transformador comparador diferencial, com relação variável. Para o equilíbrio completo da ponte de medição uma componente relativa de corrente resistiva é adicionada à corrente capacitiva do capacitor padrão, até anular o fluxo magnético do circuito detector.

Nestas condições, a ponte indicará a leitura relativa entre a corrente resistiva e a capacitiva, que representa o fator de dissipação - D. Esta técnica tem sido utilizada pelos instrumentos desenvolvidos pela Guildline (Canadá), pela Olman (Canadá) e pela Tettex (Suíça). As pontes de capacitância e fator de dissipação - C&D e que se utilizam de transformador comparador diferencial são particularmente indicadas quando altas tensões, nas frequências de 50 ou 60 Hz, são requeridas, cujos limites só dependem do capacitor padrão, a gás, sendo que são encontradas unidades de até 1,2 MV.

A **Figura 5** mostra um circuito diferencial, com transformador de três enrolamentos, utilizado para a determinação do fator de dissipação em alta tensão desde 1928 [5] até os dias atuais, após melhoramentos introduzidos pelo surgimento dos amplificadores operacionais da *Analog Device* [6].

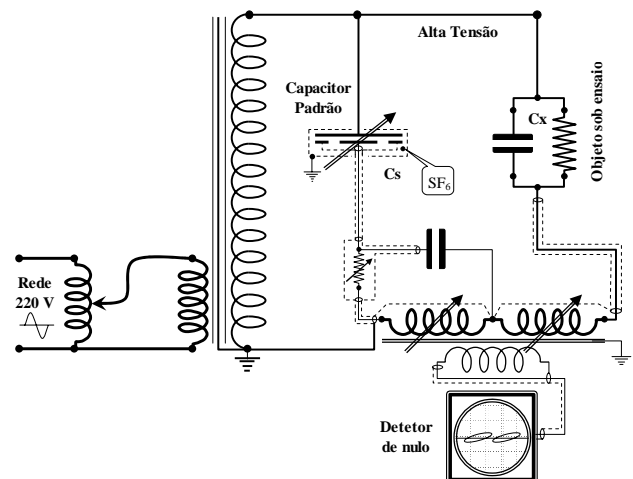


FIGURA 5 - CIRCUITO DE PONTE DE RELAÇÃO COM TRANSFORMADOR

4.3 Circuito Equivalente Série

Considerando, para uma análise matemática elementar, a associação série de dois elementos ideais, como mostrada na **Figura 6**, o fator de dissipação - D resultaria conforme Equação 2 e Equação 3.

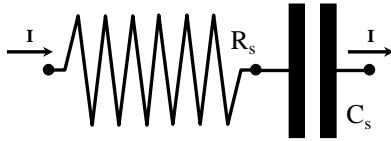


FIGURA 6 – CIRCUITO EQUIVALENTE SÉRIE

$$D = \tan \delta = \frac{P}{Q} = \frac{I^2 \cdot R_s}{I^2 \cdot X_c} = R_s \cdot \omega \cdot C_s \quad (2)$$

$$D = R_s \cdot \omega \cdot C_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_s \cdot C_s \quad (3)$$

Onde:

D = Fator de dissipação;
 P = Potência útil, em [W];
 Q = Potência reativa, em [var];
 X_c = Reatância capacitiva, em [Ω];
 I = Corrente comum ao resistor e ao capacitor em série, em [A];
 f = Frequência da corrente alternada, em [Hz];
 R_s = Resistência do elemento série, em [Ω]; e
 C_s = Capacitância do elemento série, em [F].

4.4 Circuito Equivalente Paralelo

Para o caso de uma representação de circuito equivalente de um capacitor em paralelo com um resistor, ambos ideais, conforme ilustrado na **Figura 7**, o fator de dissipação seria determinado pelas equações alternativas (4) e (5) abaixo.

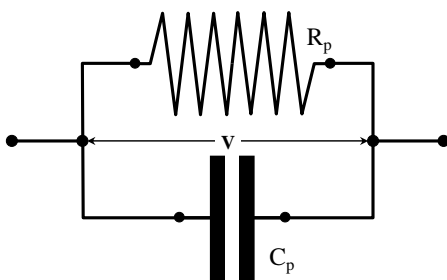


FIGURA 7 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARALELO

$$D = \tan \delta = \frac{P}{Q} = \frac{\left[\frac{V^2}{R_p} \right]}{\left[\frac{V^2}{X_c} \right]} = \frac{X_c}{R_p} \quad (4)$$

$$D = \frac{X_c}{R_p} = \frac{1}{[\omega \cdot R_p \cdot C_p]} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_p \cdot C_p} \quad (5)$$

Onde:

D = Fator de dissipação;
 P = Potência útil, em [W];
 Q = Potência reativa, em [var];
 X_c = Reatância capacitiva, em [Ω];
 V = Tensão comum ao resistor e ao capacitor em paralelo, em [V];
 f = Frequência da tensão alternada, em [Hz];
 R_p = Resistência em paralelo, em [Ω]; e
 C_p = Capacitância do elemento paralelo, em [F].

Cabe ressaltar que a razão entre as unidades W/var resulta em adimensional, pois coincide com a razão entre duas correntes ou duas tensões, uma sobre o resistor e outra sobre o capacitor. A unidade da potência reativa – **var** escreve-se com três letras minúsculas, conforme já definido na Primeira Conferência Internacional sobre Unidades e Padrões Elétricos, ocorrida em Londres de 14 a 17 de outubro de 1908^[1]. O Brasil foi representado oficialmente na citada conferência, pelo Eng^o. Leopoldo Ignácio Weiss, chefe da Seção Técnica da Repartição Geral dos Telégrafos, então pertencente ao Ministério de Viação e Obras Públicas, vindo a adotar todas as resoluções. Entretanto, atualmente, após 100 anos de adoção da unidade **var**, ainda se encontra esta unidade escrita de muitos modos incorretos, principalmente na literatura nacional e americana.

Segundo relatos do citado participante, Eng^o. Weiss, transcrito no relatório da Repartição Geral dos Telégrafos^[2], seguindo a também citada Conferência, na segunda-feira seguinte, dia 19, ocorreu a reunião do Comitê Eletrotécnico Internacional - IEC, até dia 22, sendo presidida pelo americano **Elihu Thomson**, em substituição ao britânico **Lord Kelvin**, presidente da última reunião e então falecido no ano anterior. O Brasil foi representado no comitê da IEC pelo Eng^o. H. de Vasconcellos, do Ministério de Viação e Obras.

4.5 Circuito Equivalente não Ideal – Real

Conforme anteriormente mencionado, a geração de um padrão de fator de dissipação parece apenas um problema matemático, mas de fato constitui um problema técnico muito mais complexo, não baseado em circuito simples como os mostrados na **Figura 6** ou na **Figura 7**. Os circuitos citados levam em conta elementos ideais, comportando apenas resistência elétrica e apenas capacitância, que de fato não são encontrados na prática. Além disso, o circuito leva em conta que os elementos ideais acham-se flutuantes no espaço, sem qualquer suporte físico, sem fugas, sem cabos com resistências e capacitâncias parasitas. Na prática, tais elementos estarão sempre presentes e, se conhecidos, podem ser matematicamente modelados para a determinação de um circuito ideal equivalente.

4.6 Medições em Baixa e Alta Tensão

Uma variedade de sistemas de medição, denominados com frequência de pontes de medição de capacitância e fator de dissipação, são encontrados no mercado, tanto para baixas tensões, menores que 1000 V, quanto para altas tensões. Os sistemas para baixa tensão geralmente incorporam a fonte de alimentação e o sistema de medição, enquanto os sistemas

para alta tensão geralmente se utilizam de fontes de alimentação externas e de um capacitor externo.

Para a verificação da exatidão e linearidade na medição do fator de dissipação, em baixas tensões, e em frequências de até 100 kHz, no CEPEL, são utilizados os sistemas GenRad 1616 incorporado ao sistema de medição GenRad 1621. As verificações geralmente são efetuadas na tensão de 1 ou 5 V e na frequência de 1000 Hz, com

condutâncias entre 100 aS e 100 µS, salvo solicitação distinta do interessado, podendo chegar a 150 V.

Os resultados experimentais de uma análise típica de um instrumento digital para baixa tensão são mostrados, como ilustração^[4], na Tabela 3. A Figura 8 mostra a correlação entre os valores de capacitância de referência e as leituras obtidas pelo instrumento sob avaliação, enquanto a Figura 9 mostra a mesma análise para o fator de dissipação.

TABELA 3 – RESULTADOS TÍPICOS DE CAPACITÂNCIA E FATOR DE DISSIPACÃO - C&D^[4]

GEN RAD 1659	REFERÊNCIA		LEITURAS	
	Capacitância	Fator de Dissipação	Capacitância	Fator de Dissipação
LEITURAS				
(N)	(pF)	(D)	Cp (pF)	(D)
1	50	0,0001	50,000	0,0000
2	50	0,0002	50,000	0,0002
3	50	0,0003	50,002	0,0003
4	60	0,0008	60,003	0,0008
5	60	0,0013	60,001	0,0013
6	60	0,0024	60,000	0,0025
7	70	0,0068	69,998	0,0069
8	70	0,0114	70,003	0,0114
9	70	0,0205	69,999	0,0204
10	80	0,0597	79,999	0,0597
11	80	0,0995	80,003	0,0995
12	80	0,1790	80,001	0,1791
13	90	0,5305	89,992	0,5307
14	90	0,8842	89,993	0,8845
15	90	1,5915	89,987	1,592
16	100	4,7746	99,734	4,789
17	100	7,9577	99,585	7,993
18	100	14,324	99,290	14,430
Obs.:	• O instrumento foi zerado na posição de ensaio; Ensaiado na temperatura de 23 °C.			

Como pode ser observada nos gráficos dos resultados, através da simples análise de regressão, a correlação entre as leituras de capacitância - C(pF) e os valores utilizados como referência resultou bem melhor que a mesma correlação obtida para as leituras de fator de dissipação – D.

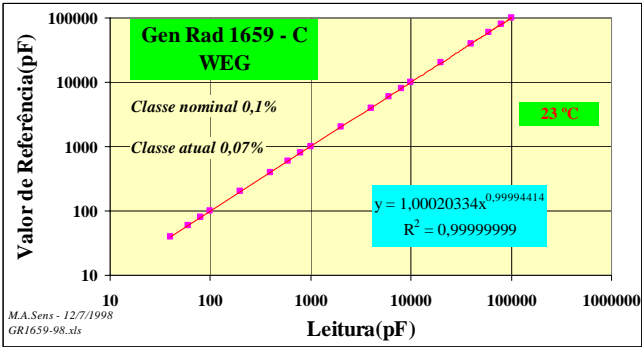


FIGURA 8 – VERIFICAÇÃO DA LINEARIDADE NA MEDIÇÃO DA CAPACITÂNCIA

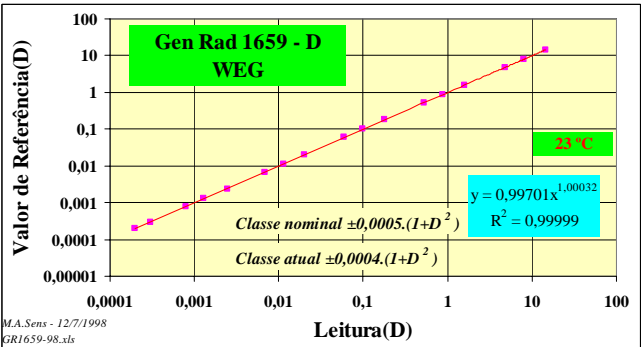


FIGURA 9 – VERIFICAÇÃO DA LINEARIDADE NA MEDIÇÃO DO FATOR DE DISSIPACÃO

Mas, mesmo assim, a classe de exatidão, representando a incerteza, declarada nominalmente pelo fabricante, foi superada pelo instrumento avaliado para ambas as grandezas medidas.

Conforme citado, a tensão de medição, no caso anterior, foi de apenas 5 V, enquanto a máxima tensão de ensaio dos sistemas de alta tensão, por outro lado, estará definida pela fonte de alimentação e pelo capacitor externo, podendo ir bem acima. Os laboratórios do CEPEL/Eletróbrás estão equipados para medições de até 1200 kV em 60 Hz.

Na prática, para a geração do fator de dissipação de referência precisa-se de uma relação conhecida, conforme Equação 1, da potência dissipada pela potência reativa, independente da tensão e da corrente aplicadas. Tal condição constitui objetivo predominante e necessário ao sistema de calibração.

Interferências de campos eletromagnéticos externos no circuito de calibração costumam constituir a principal fonte de dificuldades para a condição anteriormente estabelecida. Desta forma, blindagens adequadas e cuidados com sistemas de aterramentos são fundamentais.

A eliminação de campos magnéticos de frequência industrial no ambiente seria o ideal, mas dificilmente será obtida, mesmo no interior de uma gaiola da Faraday.

Tentativas de se produzir padrões de fator de dissipação para altas tensões, determinados matematicamente pelo equivalente série ou paralelo, são frequentemente malsucedidas pelo fato das correntes tomarem caminhos não considerados nas equações. Ou sejam, espera-se que as correntes através dos capacitores circulem integralmente pelos resistores a eles associados em série, o que dificilmente ocorrerá.

Por outro lado, uma das melhores aproximações para padrões de fator de dissipação obtém-se quando do uso de capacitores de dois terminais para altas tensões, que são bastante raros.

Por este motivo, este informe técnico apresenta o circuito equivalente, completo^[3] de dois capacitores isolados a gás, incluindo capacitâncias, resistências e indutâncias parasitas, que podem ser medidas isoladamente, para permitir a determinação matemática do fator de dissipação equivalente, como mostrado na Figura 10. No circuito observa-se que entre os terminais *H* e *L* são identificadas sete malhas com correntes distintas.

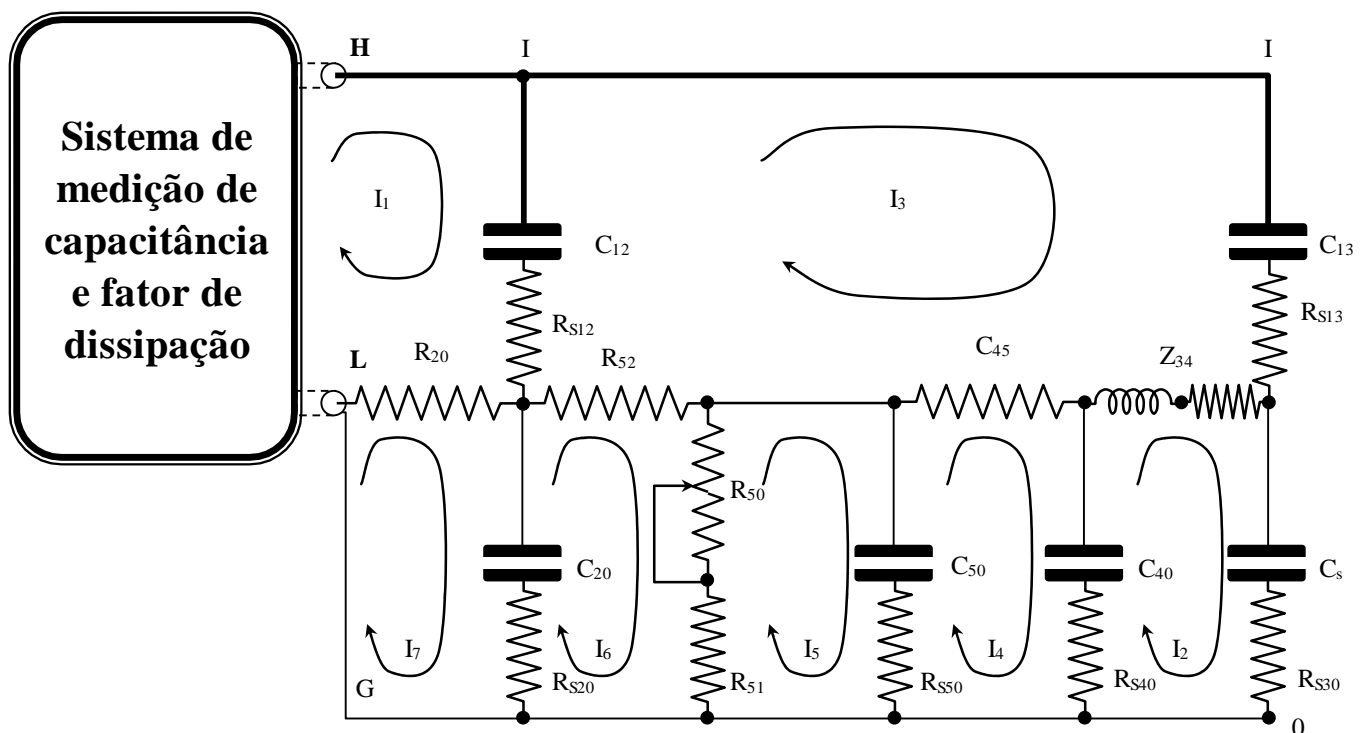


FIGURA 10 – CIRCUITO EQUIVALENTE COMPLETO PARA SIMULAÇÃO DO FATOR DE DISSIPACÃO

O circuito mostrado na Figura 10 contempla todos os elementos identificados em um capacitor padrão, isolado a gás para 200 kV, incluindo os cabos e conexões, e capacitâncias parasitas. Cada elemento foi isolado e medido para que pudesse ser modelado e analisado por cálculo numérico, em distintas frequências. Como resultado da análise, obtém-se um circuito equivalente simplificado, como aqueles mostrados na Figura 6, para uma associação série, ou na Figura 7, para associação em paralelo. De posse da equivalência citada, o fator de dissipação pode ser facilmente obtido, pela Equação 3 ou pela Equação 5, dependendo se o circuito for considerado em série ou em paralelo, respectivamente.

Por medida cautelar, e considerando uma falha ocorrida em um dos elementos do circuito mostrado na Figura 10, decidiu-se verificar a coerência da leitura do fator de dissipação a cada ensaio, independente da simulação matemática, por uma ponte de referência, uma Guildline 9910 A – Canadá, com incerteza permanente indicada pela fabricante como menor que ± 10 ppm. Assim, o circuito completo não foi mais verificado em cada elemento, mas no conjunto, para distintos valores de R_{50} . Desta forma, eventuais modificações dos cabos, das conexões ou mesmo das capacitâncias parasitas, serão percebidas por ambos os instrumento, o de referência e o sob avaliação, não representando, portanto, fontes de erros e incertezas indeterminadas.

Um circuito simplificado foi montado em caixa blindada contra interferências eletromagnéticas e provida internamente de supressores de transientes, para ser conectada aos capacitores de alta tensão sempre que necessária a utilização como padrão de fator de dissipação.

Os mesmos capacitores são utilizados para o confronto dos instrumentos na habilidade de medir capacitâncias e, da mesma forma, para a medição de capacitâncias e fator de dissipação de objetos cujos dielétricos encontram-se em análise.

A **Figura 11** mostra esquematicamente dois capacitores para alta tensão e um deles acoplado ao dispositivo que permite simular distintos valores de fator de dissipação, servindo para baixas ou altas tensões, iniciando em valores entre 8 e 15 ppm até 11,1 %. A resolução na medição de referência é de 1 ppm.

Ainda como medida cautelar, para minimizar possíveis alterações pelas variações térmicas durante as avaliações de instrumentos de C&D, para cada mudança do fator de dissipação, provocada pela mudança da década resistiva R_{50} , o conjunto calibrador é ensaiado pela ponte de referência e pela ponte sob avaliação, obtendo-se de 12 a 15 valores bem distintos, para permitir análise da linearidade das leituras.

Como propósito principal, os instrumentos são encaminhados aos laboratórios do CEPEL para a verificação da exatidão e da linearidade na medição da capacitância e do fator de dissipação. Entretanto, na prestação destes serviços, em muitas vezes os interessados levam de bônus a limpeza, a retirada de fitas adesivas antigas, a substituição ou reposição de parafusos, a pintura da caixa ou de indicadores digitais, a substituição de juntas de vedação, recarga de gás e até instruções para uso adequado.

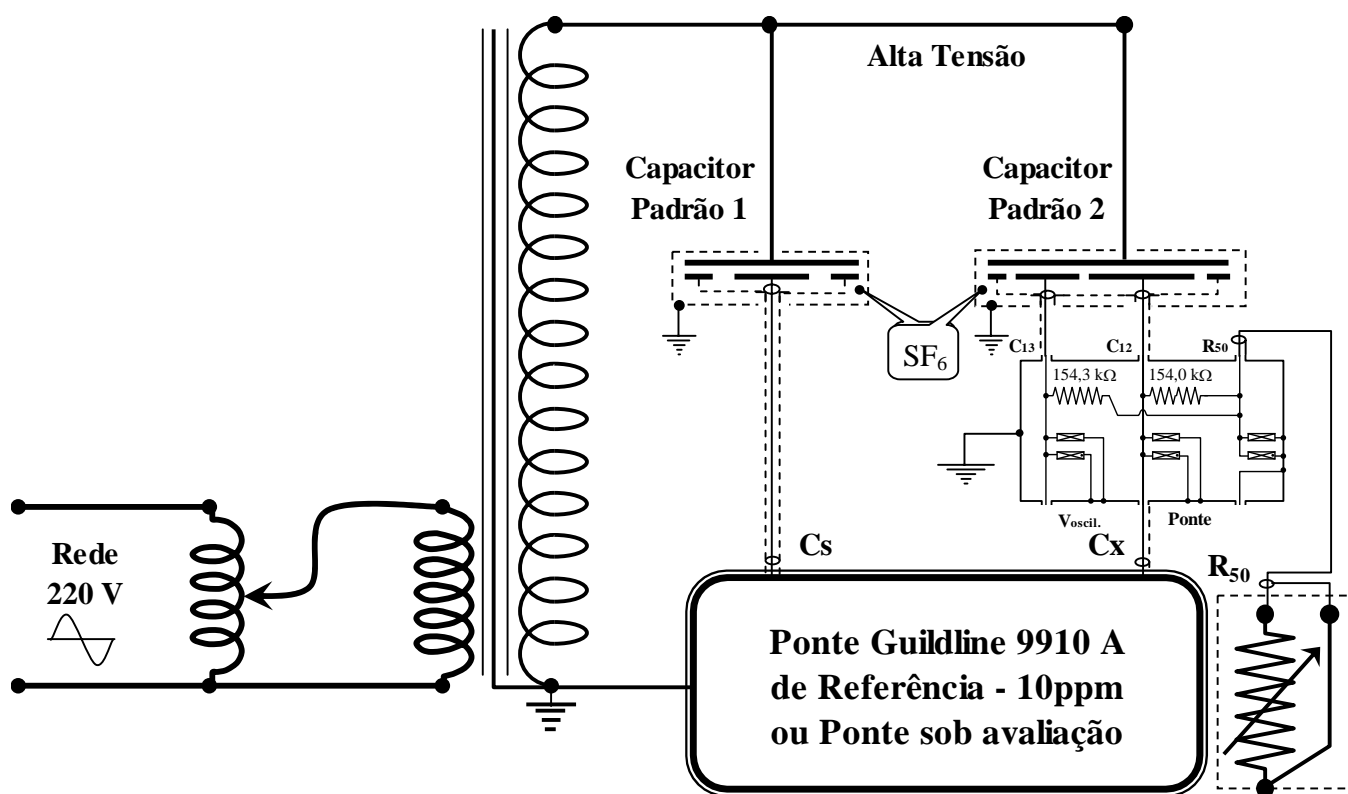


FIGURA 11 – CIRCUITO EXTERNO PARA SIMULAÇÃO DO FATOR DE DISSIPACÃO

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à WEG S.A. - Jaraguá do Sul – SC, pela liberação dos resultados de calibração de um dos instrumentos de medição avaliado no CEPEL, a título de ilustração.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Report of the International Conf. on Electrical Units and Standards, 1908, Science, Nov. 1908, page. 743.
- [2] Relatório da Repartição Geral dos Telégrafos do ano de 1909, apresentado ao Ministro da Viação e Obras Públicas pelo Diretor Geral, Major Estanisláu Vieira Pamplona, Rio de Janeiro, Imprensa Nacional, 1912, páginas 113 a 117.
- [3] Sens, Márcio Antônio, Relatório Técnico CEPEL DPMT 580/1988, “Aferição de pontes para medição de fator de dissipação em dielétricos”, 24/11/1988, 21 páginas c/anexo.
- [4] Sens, Márcio Antônio, Relatório Técnico CEPEL ACME 467/1998-R, “Verificação da exatidão e linearidade de ponte GenRad 1659” – WEG S.A., 10/07/1998, 9 páginas.
- [5] A. D. Blumlein, British Patent number 323037, 1928.
- [6] N. L. Kusters, and O. Petersons, “A transformer ratio arm bridge for high-voltage capacitance measurements”, IEEE Trans. on Communication and Electronics, pp. 606-611, November 1963.