

5

Avaliação de desempenho do divisor

Para avaliar o desempenho do divisor foram realizados ensaios de tipo e de rotina no divisor completo e em partes deste, com o objetivo de avaliar sua suportabilidade dielétrica e seu desempenho dinâmico para a validação como padrão para HVDC.

5.1.

Avaliação de desempenho

Os seguintes ensaios foram realizados para comprovar o desempenho do divisor: corrente de fuga, descarga parcial, termovisão, tensão aplicada, determinação do FE, linearidade e resposta ao degrau. Também para avaliar o padrão foram quantificadas as fontes individuais de incertezas e calculada a incerteza total do padrão.

5.1.1.

Corrente de fuga

Uma bucha cerâmica foi utilizada na conexão em alta tensão com o objetivo de minimizar a corrente de fuga pela estrutura isolante do divisor. Essa montagem permite a medição da corrente que circula pelo divisor e da corrente que passa pela estrutura isolante. A corrente no braço de baixa tensão é medida por meio da ligação de um resistor e de um multímetro entre a parte de baixo do resistor e o terra. Isso permite a determinação dos valores de corrente de entrada e de saída, e a diferença entre essas correntes dá-se o nome de corrente de fuga do divisor. [27]

Para se obter estabilidade e precisão da cadeia resistiva é importante que no projeto do divisor haja um valor mínimo de corrente de fuga. Correntes de fuga que ocorrem entre a bucha e os materiais isolantes causam erros de medição. Para a medição da corrente de fuga pela estrutura isolante do divisor o mesmo foi suspenso e aterrado por meio de um resistor de $1M\Omega$, sendo aplicada a tensão nominal de 50 kV. Na construção desse divisor a corrente de fuga na estrutura

isolante do divisor não excedeu a 40 ppm, ou seja, 20 nA para uma tensão aplicada de 50 kV.

5.1.2. Descarga Parcial

Para avaliação do nível de descarga parcial (DP) foi realizado um ensaio com tensão alternada a frequência industrial (60 Hz) com valores desde 7,07 kV até 35,4 kV, que correspondem aos níveis de 10 kV e 50 kV, respectivamente, em corrente contínua. A calibração foi realizada com um calibrador de 10 pC e utilizando um instrumento medidor de DP. Os resultados mostrados na Fig. 35 indicaram um nível de descarga inferior a 5 pC na tensão máxima.

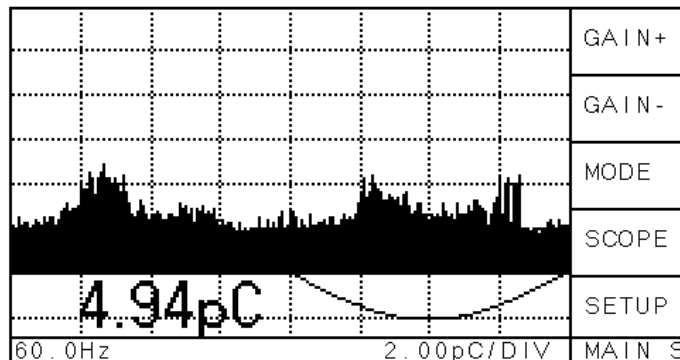


Figura 35 - Descargas parciais no padrão na tensão alternada de 35,4 kV

5.1.3. Termovisão

Para verificar a distribuição de temperatura ao longo do divisor foi realizado o ensaio de termovisão na tensão nominal de 50 kV. Os resultados considerados normais com temperaturas de $\cong 28$ °C estão mostrados na Fig. 36.

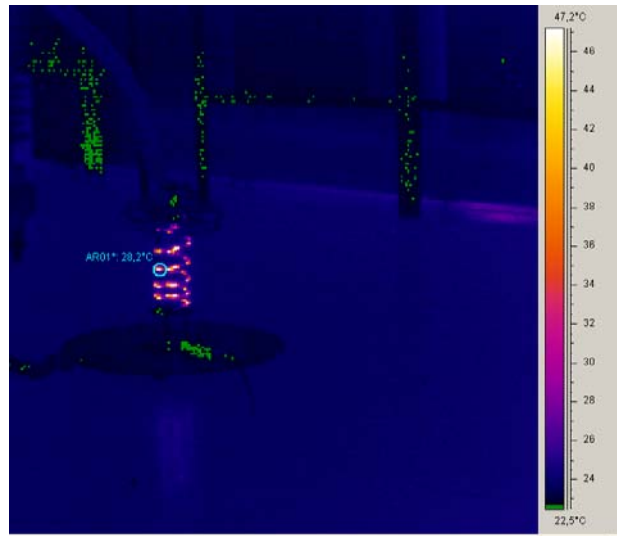


Figura 36 - Ensaio de termovisão no padrão em 50 kV em corrente contínua

5.1.4. Tensão aplicada

Para verificar a suportabilidade dielétrica do divisor foi aplicada uma tensão correspondente a $1,1xU_n$ (tensão nominal) durante 10 minutos nas duas polaridades. O divisor suportou a aplicação e nenhum dano foi verificado no padrão.

5.1.5. Avaliação de desempenho dinâmico

Para a avaliação de desempenho dinâmico do divisor padrão foi utilizada uma técnica de medição já conhecida, a resposta ao degrau unitário, que consiste em avaliar a resposta do divisor quando um degrau de tensão com tempo de subida de $\cong 5$ ns é aplicado aos terminais de entrada. A resposta ao degrau medida é apresentada na Fig. 37 com os parâmetros da resposta calculados.

No caso específico de medição em tensão contínua, o item 7.1.2 da norma IEC 60060-2 (94) especifica que o parâmetro tempo de resposta experimental deve ser menor que 0,5 s, para que o divisor possa ter sensibilidade para reconhecer os incrementos da tensão. Os resultados indicaram que o tempo de resposta (T_N) foi de 0,021 ms, portanto bem inferior ao limite normalizado.

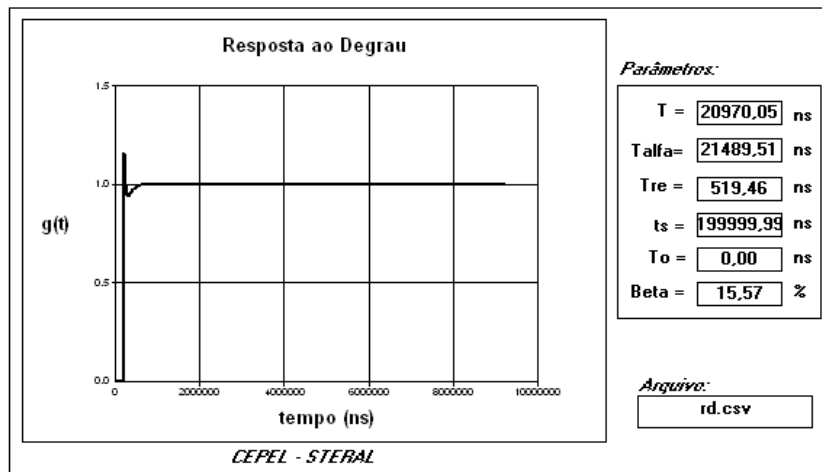


Figura 37 - Resposta ao degrau do padrão para HVDC

5.2. Incerteza de medição

Para o divisor de alta tensão descrito aqui, a incerteza de medição foi calculada com base nos ensaios realizados, considerando todas as contribuições das variáveis do sistema a partir das medições em alta e baixa tensão. [32]

Para facilitar a identificação das estimativas de entrada é mostrada na Figura 38 a localização das fontes de incerteza. As fontes de u1 até u8 estão apresentadas no diagrama, enquanto as fontes de u9 até u11 estão associadas a comparação com o padrão do INMETRO.

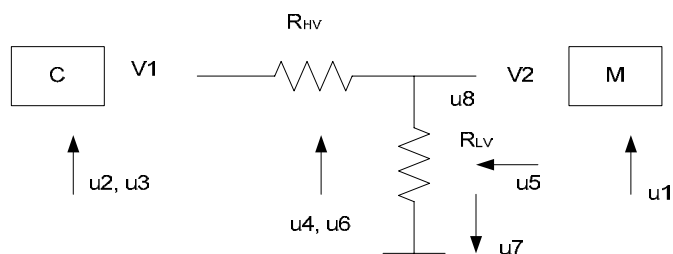


Figura 38 - Diagrama para identificação das fontes de incerteza

Onde:

C – Calibrador e M – Multímetro.

Uma análise de forma qualitativa e quantitativa foi realizada para identificar as diversas fontes de incerteza em todo o processo de construção e calibração do

padrão. Cada fonte foi identificada e quantificada e os resultados com as fontes e as incertezas estão apresentados no final desse capítulo. Na Tabela 7 são apresentados os dados obtidos na calibração do padrão nos dias 8/11 e 22/11 de 2010 no CEPEL e na Tabela 8 uma análise da estatística descritiva dos resultados.

Tabela 7 - Dados obtidos na avaliação do divisor

Medidas	FE CEPEL em 08/11/10	FE CEPEL em 22/11/10	FE INMETRO
1	4993,513	4993,102	4993,83
2	4993,498	4993,100	4993,83
3	4993,498	4993,097	4994,06
4	4993,493	4993,097	
5	4993,491	4993,095	
6	4993,491	4993,090	
7	4993,484	4993,087	
8	4993,484	4993,242	
9	4993,479	4993,241	
10	4993,484	4993,072	

Tabela 8 - Resultados da estatística descritiva

Parâmetros	CEPEL 08/11	CEPEL 22/11	INMETRO
Média	4993,491	4993,122	4993,91
Erro padrão	0,0032	0,020	0,07806
Mediana	4993,491	4993,097	4993,83
Moda	4993,484	4993,097	4993,83
Desvio padrão	0,0102	0,063	0,135
Variância da amostra	1,0473E-04	0,004	1,828E-02
Curtose	1,1730	1,265	-
Assimetria	0,9783	1,697	1,7321
Intervalo	0,0349	0,170	0,234
Mínimo	4993,479	4993,072	4993,83
Máximo	4993,513	4993,242	4994,06
Soma	49934,915	49931,221	14981,72
Contagem	10	10	3

5.2.1.

Baixa tensão do divisor

A tensão de saída do divisor (V_2) é medida usando um multímetro de 8,5 dígitos. Este dispositivo é referência e rastreado à Rede Brasileira de Calibração

(RBC). A incerteza de medição deste dispositivo foi determinada dentro do intervalo de 0,15 V até 10 V. A incerteza relativa do dispositivo com estabilidade a longo prazo até 10 V de acordo com o certificado de calibração CA1-345/2010, é

$$u_1 = 51 \times 10^{-6}$$

5.2.2. Medição do Fator de Escala (FE) do divisor

O Fator de Escala do divisor foi determinado em baixa tensão por meio de um calibrador para tensão contínua e de um multímetro de 8,5 dígitos, medindo as tensões de entrada (V1) e saída (V2) do divisor para o nível de 1 kV.

$$FE = (V_1 / V_2) = 4993,491:1$$

$$u_2 = 10 \times 10^{-6} \text{ (calibrador – Certificado RBC1-10/0083)}$$

$$u_3 = 2,0 \times 10^{-6} \text{ (dispersão do FE = desvio padrão / média)}$$

5.2.3. Influência da temperatura (CT)

O coeficiente térmico do braço de alta tensão do divisor foi de 30 ppm/°C e do braço de baixa tensão de 17 ppm/°C (ver Fig. 27 – Cap. 4).

$$u_4 = 30 \times 10^{-6}$$

$$u_5 = 17 \times 10^{-6}$$

5.2.4. Influência da tensão (CV)

Os coeficientes de tensão foram determinados para 5 resistores selecionados aleatoriamente. A medição foi realizada a 4 terminais com 100 V e 1000 V e durante um período de tempo muito curto para evitar os efeitos da dependência da temperatura dos resistores. A incerteza relativa devido ao coeficiente de tensão é

$$u_6 = 91 \times 10^{-6}$$

5.2.5. Corrente de fuga

A corrente de fuga na estrutura isolante do divisor não excedeu a 40 ppm, ou seja, 20 nA para uma tensão aplicada de 50 kV, correspondendo a uma incerteza de

$$u_7 = 40 \times 10^{-6}$$

5.2.6. Descarga Parcial

O ensaio de descarga parcial (DP) foi realizado em alta tensão alternada até 35,4 kV, equivalente a 50 kV em corrente contínua, e usando um detector de DP. Além disso, o circuito de ensaio foi calibrado em 10 pC com *um calibrador de DP*. O nível de descarga medido foi considerado desprezível (< 5 pC).

5.2.7. Estabilidade a curto prazo

O divisor de alta tensão foi verificado duas vezes dentro de um intervalo de um mês com o objetivo de determinar a estabilidade ao curto prazo (ver Tabela 6). A contribuição para esta incerteza relativa é de

$$u_8 = 74 \times 10^{-6}$$

5.2.8. Linearidade e comparação com INMETRO

Uma comparação com o padrão do INMETRO foi realizada para determinar o FE do divisor na polaridade negativa na faixa de operação de 1 kV até 50 kV. Esta componente de incerteza (u_9) foi quantificada e utilizada no cálculo da incerteza do padrão. Os resultados da linearidade descritos no certificado de calibração DIMCI 2296/2010 estão apresentados na Fig. 39.

$$\begin{aligned} FE_c &= 4993,491:1 \text{ (CEPEL medido em 1 kV com um calibrador)} \\ FE_1 &= 4993,91:1 \text{ (INMETRO medido em AT com padrão de 150 kV)} \\ u_9 &= 62 \times 10^{-6} \quad \text{(Incerteza do INMETRO = 0,31)} \\ u_{10} &= 228 \times 10^{-6} \quad \text{(Linearidade)} \\ u_{11} &= 84 \times 10^{-6} \quad \text{(\Delta FE entre CEPEL e INMETRO = (FE_1 - FE_c)/FE_c)} \end{aligned}$$

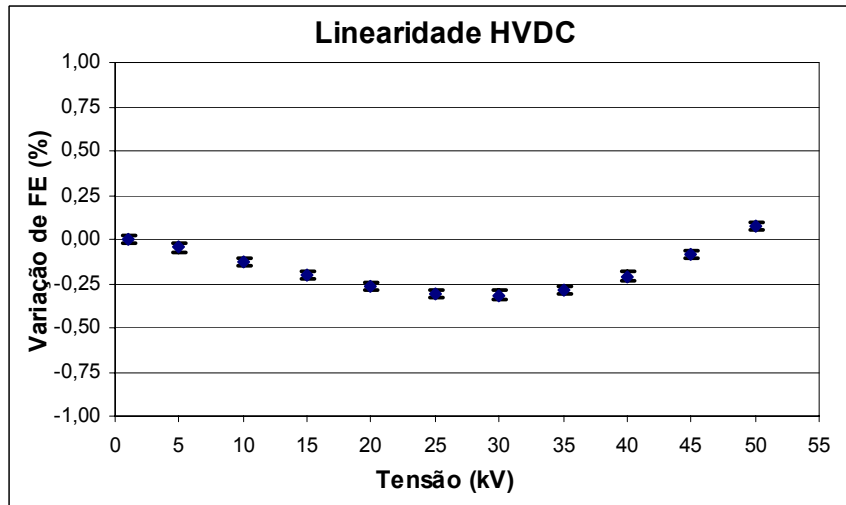


Figura 39 - Linearidade do padrão para HVDC até 50 kV

5.2.9. Graus de liberdade efetivos

É um valor numérico obtido por meio da equação de **WELCH-SATTERTHWAITE**, que com o auxílio da Tabela da distribuição t student, determina o fator de abrangência de acordo com o nível de confiança que se deseja declarar a incerteza. Aplicando-se a fórmula nos dados da Tabela 8 calcula-se o $V_{eff} = 75$.

$$v_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i(y)^4}{v_i}} \quad (8)$$

5.2.10. Incerteza Combinada de Medição

A incerteza combinada (U_c) do SMR para HVDC é derivada das incertezas individuais e também da fonte de comparação com o padrão do INMETRO.

$$U_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (9)$$

A Tabela 9 mostra as fontes, os cálculos da estimativa da incerteza do padrão para HVDC, e a análise da distribuição de probabilidade.

Tabela 9 - Incerteza de medição

Fontes	xi (ppm)	DP	vi	FD	Up	Up ²
u1	51	Nor.	∞	2	2,55E+01	6,50E+02
u2	10	Nor.	∞	2	5,00E+00	2,50E+01
u3	2,0	Nor.	9	3,1623	6,32E-01	4,00E-01
u4	30	Ret.	∞	1,732	1,73E+01	3,00E+02
u5	17	Ret.	∞	1,732	9,82E+00	9,63E+01
u6	91	Ret.	∞	1,732	5,25E+01	2,76E+03
u7	40	Ret.	∞	1,732	2,31E+01	5,33E+02
u8	74	Nor.	9	3,1623	2,34E+01	5,48E+02
u9	62	Nor.	∞	2,1	2,95E+01	8,72E+02
u10	228	Nor.	10	3,3166	6,87E+01	4,73E+03
u11	84	Ret.	∞	1,732	4,85E+01	2,35E+03
Incerteza combinada $U_c \Rightarrow \sqrt{U_p^2}$						115
Incerteza padrão $U = k * U_c$						235

Xi – Estimativa de entrada

DP – Tipo de distribuição de probabilidade

Vi – Grau de liberdade individual

FD – Fator divisor

Up – Incerteza padronizada

Up² – Incerteza padronizada ao quadrado

Uc – Incerteza combinada; U – Incerteza padrão.

Veff – Graus de liberdade efetivo = 75; utilizando a tabela t-student $\Rightarrow k = 2,05$.

O resultado do cálculo da incerteza expandida relativa do padrão é de $\cong 240$ ppm para um fator de abrangência $k=2,05$ com 95,45% de nível de confiança.

Resultado:

DVAT Padrão para HVDC de 1 kV até 50 kV

FE = 4993,491:1; U=240 ppm (k=2,05) com 95,45% de confiança

Condições ambientais:

Temperatura: 22 °C \pm 5 °C e Umidade: 55% \pm 20%