

4 Caracterização do projeto

O método mais conhecido para medir alta tensão em corrente contínua (CC) é usar divisores de tensão resistivos. Os Laboratórios Nacionais de Metrologia devem desenvolver divisores especiais e procedimentos de calibração para permitir medições precisas e estáveis. A construção de um divisor resistivo com tensão nominal de 50 kV, que consiste em vários resistores ligados em série, requer a consideração de uma série de fatores específicos. Por exemplo, o valor da resistência do divisor pode mudar com a alta tensão aplicada por causa do aquecimento próprio, cargas eletrostáticas, ou pela corrente de fuga. O Fator de Escala (FE) do divisor deve ser conhecido com exatidão e ser independente da tensão e do tempo de aplicação para permitir medições precisas. As possíveis fontes de erros de medição em divisores para tensão HVDC são os coeficientes térmicos das resistências, aquecimento próprio de acordo com a perda I^2R e descargas corona que podem aparecer em alta tensão.

Assim, um protótipo de divisor para alta tensão em corrente contínua HVDC de precisão foi projetado e construído para ser utilizado como padrão. O padrão foi construído para ser utilizado na faixa de 1 kV até 50 kV e foi calibrado em Baixa Tensão (BT) rastreado à RBC. Em Alta Tensão (AT) será o elo na cadeia de rastreabilidade entre o padrão do INMETRO [5], com tensão nominal de 150 kV, e os divisores pertencentes aos laboratórios industriais e também na calibração de outros padrões para HVDC. O Fator de Escala do divisor deve ser conhecido com exatidão independente da tensão e do tempo de aplicação.

O divisor foi projetado de modo a minimizar a corrente de fuga por sua estrutura isolante. O eletrodo de alta tensão foi projetado para minimizar a concentração de campo elétrico e a formação de corona em alta tensão. Um instrumento de medição de referência (Fluke 8508A) com resolução de 8,5 dígitos foi utilizado em conjunto com o divisor, formando um Sistema de Medição de Referência (SMR). Considerando-se as fontes de erros, espera-se uma incerteza relativa de 150 ppm (partes por milhão), com fator de abrangência $k=2$ para

medição de HVDC até 50 kV. A Figura 24 mostra o diagrama elétrico básico do padrão em conjunto com o instrumento de medição.

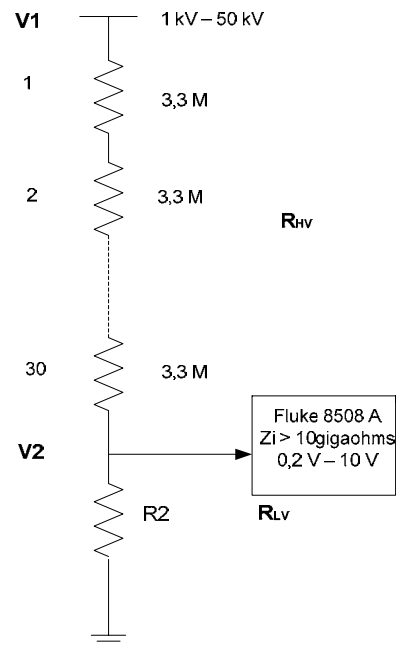


Figura 25 - Diagrama elétrico básico do padrão para HVDC

Onde:

V1 – Alta tensão a ser medida,

V2 – Fração medida da tensão,

R_{HV} – Resistores da unidade de alta tensão,

R_{LV} – Resistores da unidade de baixa tensão (R_2).

O divisor é composto por 30 resistores tipo filme não indutivos, com uma resistência total do braço de alta tensão de $\approx 100 \text{ M}\Omega$, e um resistor também de filme com resistência em torno de $20 \text{ k}\Omega$ como o braço de baixa tensão.

Como um padrão deve assegurar medições precisas e confiáveis, e também demonstrar rastreabilidade, está apresentada na Figura 26 a cadeia de rastreabilidade em AT, desde a referência primária no INM Australiano [3] até os laboratórios industriais nacionais, passando pelos padrões do INMETRO e CEPEL com suas incertezas associadas.

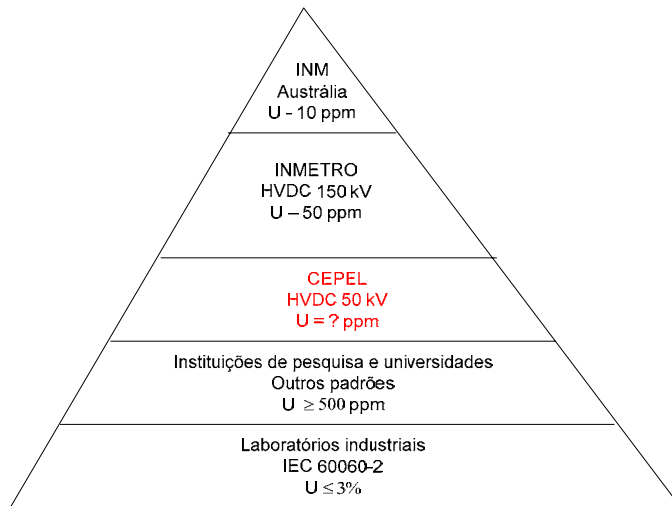


Figura 26 - Cadeia de rastreabilidade para HVDC

4.1.

Seleção dos resistores

O divisor resistivo é composto por ambos os braços de alta e baixa tensão e a transmissão do sinal é realizada por um cabo coaxial com impedância de 50Ω e 10 m de comprimento. Como já citado, o valor total da resistência nominal do braço de alta tensão é de $\approx 100 \text{ M}\Omega$ e é constituído por 30 resistores de $3,3 \text{ M}\Omega$ cada. Na tensão nominal máxima de 50 kV, cada resistor tem 1,67 kV de diferença de potencial, conduz uma corrente de $505 \mu\text{A}$, e dissipa 0,84 W de potência. Três resistores de filme em paralelo de $33 \text{ k}\Omega$, $50 \text{ k}\Omega$ e $5 \text{ M}\Omega$ são usados no braço de baixa tensão para ajustar o FE nominal do divisor em $\approx 5000:1$. A impedância do instrumento de referência (Z_i) utilizado em conjunto com o divisor pode alterar o FE, pois está em paralelo com a unidade de baixa tensão do divisor, mas neste caso sua influência é desprezível, pois Z_i é $> 10 \text{ G}\Omega$ para a faixa de tensão até 20 V. [24 e 25]

Foram selecionados para o projeto do divisor padrão resistores de filme de precisão e especiais para alta tensão, com baixo coeficiente térmico combinado com excelente estabilidade de 0,01% ao longo prazo. São resistores utilizados principalmente em instrumentos/equipamentos com alta estabilidade e precisão, como: equipamentos de raios-X, instrumentos médicos e geofísicos. Outra característica é a boa estabilidade em condições de sobrecarga momentânea.

4.2.

Avaliação da estabilidade com a temperatura e tensão

Uma câmara climática foi usada em conjunto com uma medição a quatro terminais para determinar com exatidão o coeficiente térmico (CT) e o coeficiente de tensão (CV) dos resistores que compõem o braço de alta tensão (RiHV) e de baixa tensão (RLV). [26 e 27]

O principal objetivo da seleção dos resistores é ter um coeficiente térmico no FE do divisor tão baixo quanto possível e dentro da faixa de temperatura especificada para o trabalho de $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Foram medidas as resistências dos resistores de alta e baixa tensão (RHV e RLV) em 11 pontos na faixa de operação entre $17 \text{ }^\circ\text{C}$ e $27 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme indicado na Fig. 27.

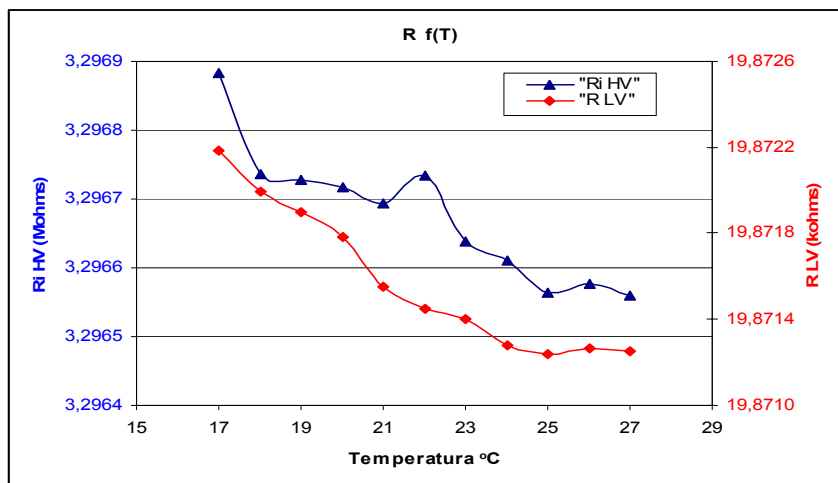


Figura 27 - Avaliação do coeficiente térmico dos resistores de alta e baixa tensão

Considerando as medidas realizadas na figura acima, o coeficiente térmico máximo foi determinado em $30 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$ para RHV e de $17 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$ para RLV (Fig. 27).

O coeficiente de tensão de um resistor é a mudança na resistência pela mudança na unidade de tensão, expressa em porcentagem da resistência em 10% da tensão nominal. O coeficiente de tensão é dado por, [27]

$$CV = \frac{R1 - R2}{R2} \times \frac{1}{v1 - v2} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

R_1 é a resistência na tensão nominal V_1

R_2 é a resistência em 10% da tensão V_2 .

Assim, foram medidas as resistências dos resistores R_{HV} e R_{LV} aplicando aos mesmos uma diferença de potencial variável, na faixa de operação de 33 V a 1,0 kV para R_{HV} e de 0,2 V a 10 V para R_{LV} . Por não ser possível a medição direta não foram avaliados os resistores do braço de AT de 1,1 kV até 1,67 kV. A temperatura foi mantida constante em 22 °C e as medidas estão mostradas nas Figuras 28 e 29.

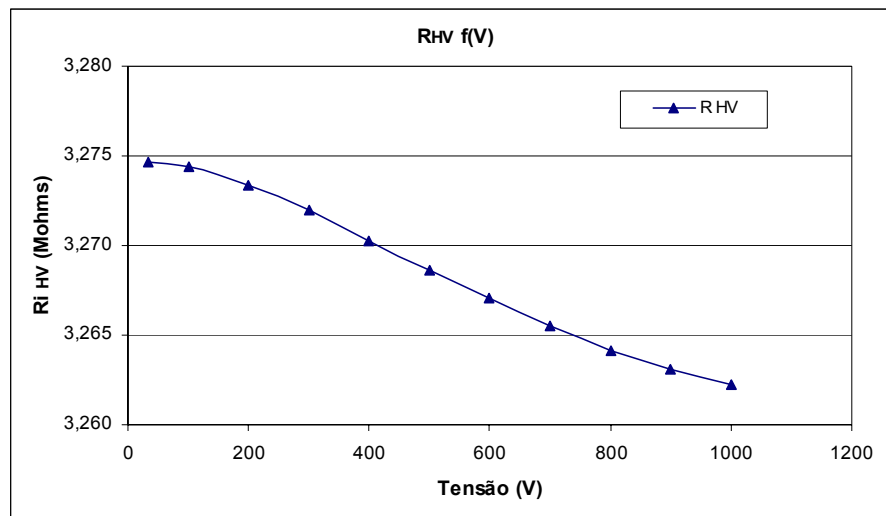


Figura 28 - Avaliação do resistor R_{HV} com variação da tensão

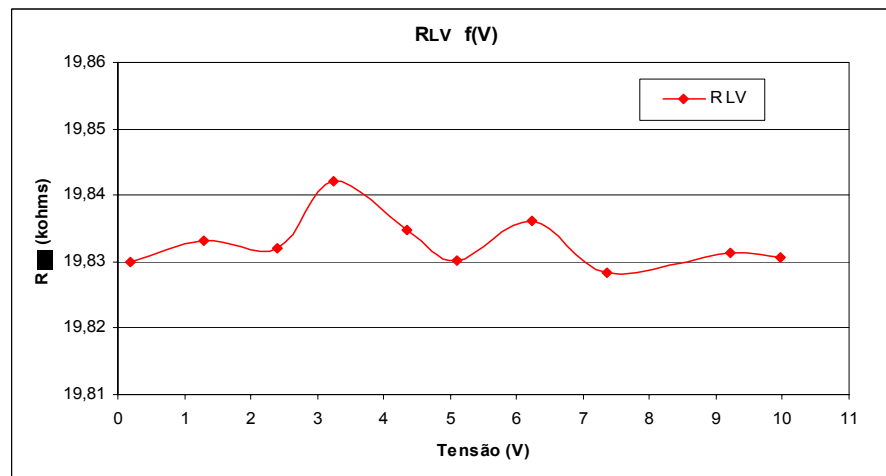


Figura 29 - Avaliação do resistor R_{LV} com variação da tensão

O coeficiente de tensão máximo no R_{HV} foi de 91 ppm/V e considerado desprezível para R_{LV} . A resistência não é sempre independente da tensão aplicada.

4.3. Construção do divisor

A corrente de fuga e a descarga corona que ocorrem no divisor causam alterações na resistência efetiva do mesmo. Estes efeitos podem ser reduzidos, considerando a distribuição de campo elétrico no divisor. [28 - 31] Os resistores do braço de alta tensão são conectados em série de uma forma helicoidal e fixados nas colunas isolantes, que por sua vez são montadas sobre um plano de terra de cobre. Uma bucha cerâmica isola a estrutura isolante da parte ativa do divisor, onde é aplicada a AT. Esta construção minimiza efeitos corona entre o eletrodo de alta tensão e a terra. Além disso, o eletrodo de alta tensão foi projetado para evitar a concentração de campo elétrico e a formação de corona.

Na estrutura isolante do divisor de alta tensão foram utilizados materiais com baixa absorção de umidade, que consistem basicamente em seis tarugos cilíndricos de acrílico com ϕ 3/16", fixados também em placas de acrílico com ϕ 120 mm e defasados de 60°.

Para projetar o eletrodo, os cálculos de campo foram realizados por meio do programa Phenix 2D V3.0 desenvolvido no CEPEL e utilizando método de elementos finitos. Nas Figuras 30 e 31 são apresentados os resultados da simulação e cálculo das linhas de campo.

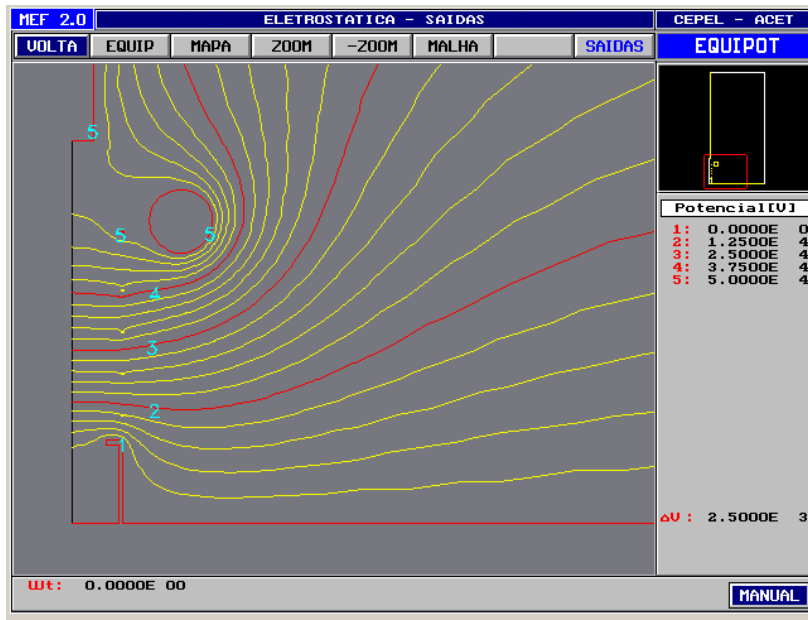


Figura 30 - Distribuição das linhas de campo elétrico ao longo do divisor

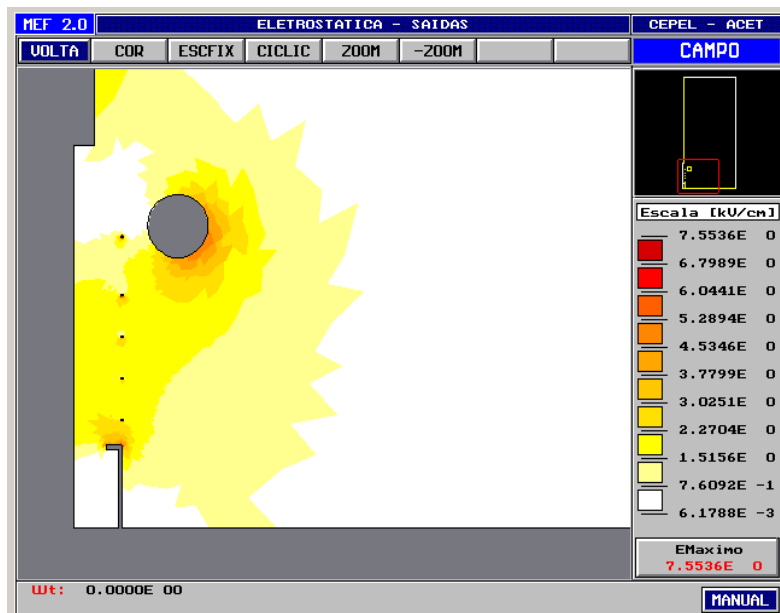


Figura 31 - Cálculo da distribuição das linhas de campo elétrico ao longo do divisor

Como o divisor foi projetado com uma estrutura simétrica, ela é adequada e eficaz para adotar um modelo simétrico bidimensional para modelar e analisar o divisor. A intensidade de campo elétrico máximo nos terminais do resistor próximo ao toróide foi de $7,5 \text{ kV/cm}$ na primeira espira e 4 kV/cm nas demais. O resistor de baixa tensão em torno de $\approx 20 \text{ k}\Omega$ está localizado em um invólucro de metal com um conector de saída tipo BNC. O eletrodo anticorona é feito de

alumínio com ϕ 75 mm e projetado para gerar um campo homogêneo (Fig. 32 e 33). Na Figura 34 é mostrada uma foto do divisor padrão para HVDC até 50 kV.

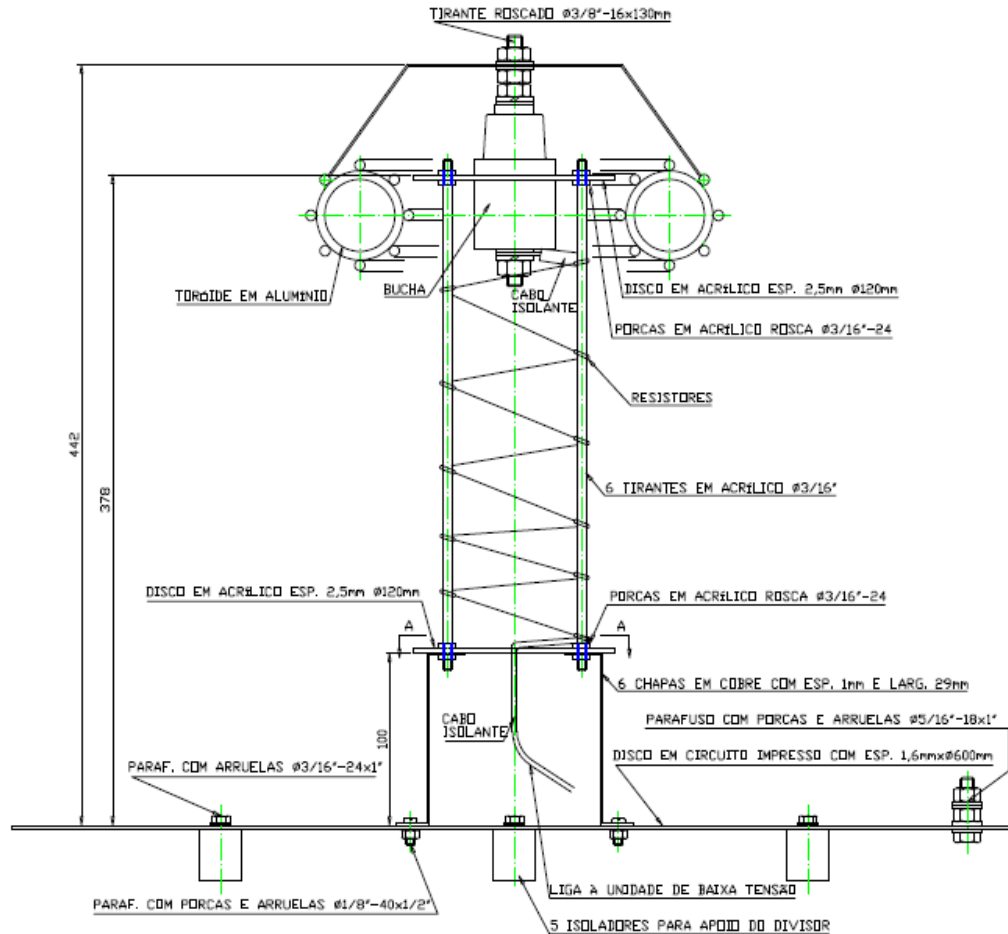


Figura 32 - Detalhes da estrutura com as dimensões do divisor

Com peso em torno de 2,5 kg, altura de 50 cm e diâmetro da base de 60 cm o divisor pode ser considerado leve e de fácil transporte, principalmente em função dos materiais utilizados.

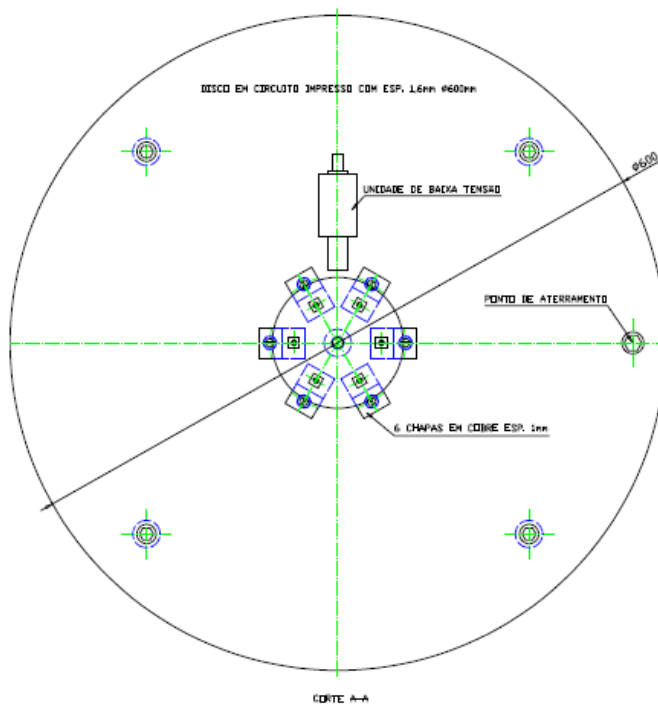


Figura 33 - Corte "A-A" com a vista da base do divisor



Figura 34 - Foto do divisor para HVDC até 50 kV