



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA ENSAIOS DE PERFURAÇÃO EM ISOLADORES

MÁRCIO THELIO FERNANDES DA SILVA(1); IGHOR SOUZA DOS SANTOS(2); LUIZ CARLOS DE AZEVEDO(1); VALDIR REMILSON SANTOS(1); MARCUS VINICIUS BARROS LOPES(1); CEPEL(1); Bolsista de Mestrado Cepel/PUC-Rio(2);

RESUMO

Quantificar a amplitude de um impulso de perfuração, com todas as garantias metrológicas, não é uma tarefa trivial, por se tratar de um sinal impulsivo com centenas de kV e frentes rápidas entre 100 ns e 200 ns. Embora o ensaio de perfuração seja normatizado pela IEC 61211 ainda não existem na maioria dos Institutos Nacionais de Metrologia (INM), inclusive no Brasil, padrões para rastrear sistemas de medição utilizados nesses ensaios. Além disso, divisores de tensão com alto desempenho dinâmico para essa aplicação não estão disponíveis comercialmente e são objetos de pesquisa dos próprios INM e ou instituições de P&D+I.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de Medição, Perfuração em Isoladores, Alta Tensão, Calibração, Comparação Interlaboratorial

1.0 - INTRODUÇÃO

O ensaio de impulso de perfuração em isoladores é descrito na IEC 61211: 2004 "Insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V - Impulse puncture testing in air", e é fundamental para verificar, em laboratório, a qualidade do projeto, o processo de fabricação, e os materiais utilizados em isoladores de vidro ou porcelana para linhas de transmissão e distribuição de energia. Em função da especificidade da medição de tensão neste ensaio, os requisitos para incerteza no valor de crista do impulso e para o desempenho dinâmico do Sistema de Medição de Impulso de Perfuração (SMIP), também estão descritos na IEC 61211 [1]. É recomendado que o SMIP seja calibrado e aprovado de acordo com a IEC 60060-2/2010: "High-voltage test techniques, Part 2: Measuring systems" [2].

Estudos e considerações sobre particularidades no desempenho de um SMIP, especificamente para características de desempenho dinâmico dos divisores de tensão, têm sido realizados há décadas [3]. Atualmente, o Grupo de Trabalho Cigré WG D1.60 – "Traceable measurement techniques for very fast transients", tem realizado atividades com objetivo de prover metodologias para garantir a rastreabilidade desses SMIP. Pesquisas recentes realizadas no Cepel mostraram que o parâmetro de tempo de resposta parcial T_{α} , obtido a partir da resposta ao degrau, é um dos principais requisitos para adequação desses divisores de tensão e que a calibração de um SMIP por comparação é tecnicamente adequada para fins de rastreabilidade [4].

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um SMIP e os métodos utilizados para sua caracterização e calibração, incluindo resultados de uma comparação interlaboratorial pioneira entre o SMIP do Cepel e o VTT-Mikes, que é o INM da Finlândia. Um software para aquisição, condicionamento e análise dos parâmetros do impulso de perfuração foi desenvolvido com base na transformada de wavelet multi-resolução e faz parte do SMIP do Cepel.

2.0 - OBJETIVO

Caracterizar todos os componentes do SMIP principalmente em relação ao desempenho dinâmico e Fator de Escala – FE do SMP do Cepel, com objetivo de comprovar a sua adequação para ensaios de perfuração em isoladores. Essa caracterização foi realizada pela calibração em baixa tensão dos componentes individuais, por determinação do FE em baixa tensão em corrente contínua e utilizando também calibradores de impulsos de baixa tensão. A incerteza do FE do divisor de tensão e do sistema de medição completo foi calculada e comparada com os limites normalizados.

3.0 - REQUISITOS NORMALIZADOS

A norma IEC 61211/2004 estabelece quais os requisitos técnicos devem ser utilizados em ensaios de perfuração em isoladores para adequação de um SMIP. Alguns dos principais requisitos estão apresentados a seguir. Na Figura 1 é apresentada uma comparação gráfica entre a forma de onda do ensaio de perfuração e um ensaio de impulso atmosférico pleno, para mostrar a diferença entre estes eventos na escala de tempo e o quão mais rápido é um impulso utilizado em ensaios de perfuração, exigindo assim do SMIP um alto desempenho dinâmico.

Principais requisitos:

- O SMIP deve ser calibrado e aprovado de acordo com a IEC 60060-2 (preferencialmente por comparação);
- O osciloscópio/registrador digital deve estar de acordo com a norma IEC 61083-1 [5];
- É necessário utilizar divisores de tensão especiais rápidos e compactos;
- Incerteza total do SMIP $\leq 5\%$ ($k=2$);
- Incerteza do FE do Divisor de Tensão $\leq 2\%$ ($k=2$);
- Desempenho dinâmico do SMIP sem instrumento:
 - ✓ Para resposta ao degrau com oscilação: Tempo de resposta parcial, $T_{\alpha} \leq 3$ ns;
 - ✓ Para resposta ao degrau sem oscilação: Tempo de resposta, $T \leq 5$ ns;
 - ✓ A Resposta é avaliada com o SMIP na mesma posição do arranjo de ensaio, mas sem o isolador.

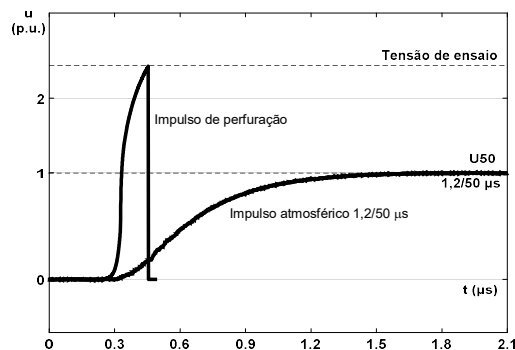


FIGURA 1 – Comparação de uma forma de onda típica para ensaio de perfuração em isoladores e a frente de um impulso atmosférico pleno padronizado.

4.0 - CARACTERIZAÇÃO DO SMIP

O SMIP do Cepel é composto por um divisor de tensão resistivo com resistores de alta e de baixa tensão construídos artesanalmente, de forma a minimizar a indutância, por um sistema de transmissão de sinal via cabo coaxial de dupla blindagem, atenuador resistivo também de indutância minimizada e sistema de aquisição e processamento de sinais.

4.1 – Componentes

Os componentes das unidades de alta e baixa tensão do divisor de tensão e do atenuador foram medidos utilizando o método a quatro terminais. É apresentado na Figura 2 o circuito elétrico básico destes componentes do SMIP, incluindo o cabo coaxial, atenuador e casador de impedância. Na Tabela 1 estão os resultados medidos utilizando instrumentos de alta resolução com 8 ½ dígitos.

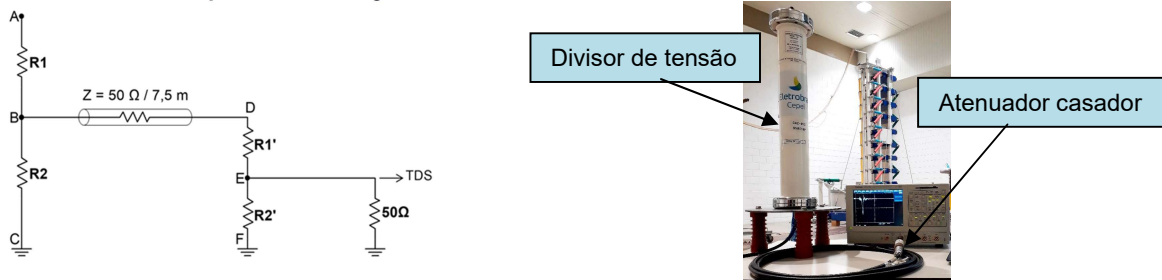


FIGURA 2 – Circuito elétrico básico e foto do SMIP completo.

Tabela 1 – Valores medidos dos componentes resistivos indicados na Figura 2 (a) e determinação do FE (b).

(a) Medição dos componentes do SMIP

Descrição	Ω
R1 = R AB	2097,4
R2 sem cabo = R BC	2,9708
R2 com cabo + Ro = R BC	2,7974
R1' = R DE	46,9021
R2' = R EF	2,8154
Ro = R DF	49,700

(b) Determinação do Fator de Escala

Descrição	Adimensional
FE - Divisor de tensão	750,77
FE - Atenuador	17,659
FE - SMIP	13258

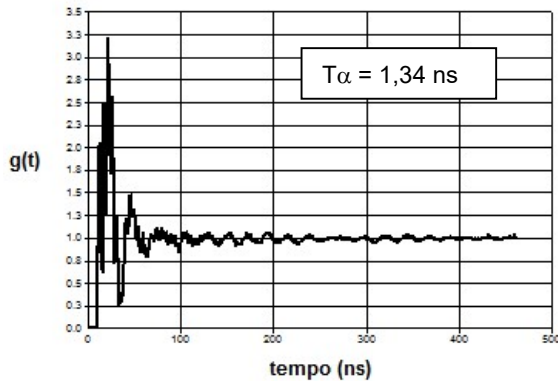
$$FE_{Div} = (R_1/R_2) + 1$$

$$FE_{At} = (R_1'/R_2') + 1$$

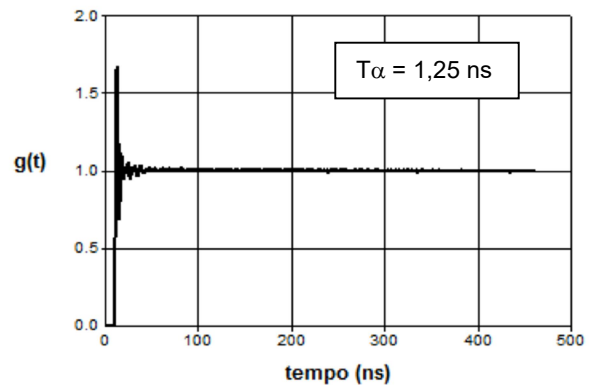
$$FE_{SMIP} = FE_{Div} \times FE_{At}$$

4.2 – Desempenho dinâmico

A avaliação do desempenho dinâmico foi realizada pela análise da resposta ao degrau. O gerador de degrau de tensão foi posicionado no lugar do isolador sob ensaio. Um osciloscópio com largura de banda (BW) plena (FULL), que para este osciloscópio é 1,0 GHz, foi utilizado na aquisição e o software do Cepel STERAL foi utilizado na análise e quantificação dos parâmetros da resposta. Estão apresentadas na Figura 3 as respostas do divisor e atenuador e o parâmetro tempo de resposta parcial (T_α) calculado. O tempo de resposta parcial é um dos requisitos específicos previstos na IEC 61211/2004 para SMIP, onde é descrita a forma de seu cálculo [2].



(a) Resposta do divisor de tensão



(b) Resposta do atenuador

FIGURA 3 – Resposta ao degrau normalizada (unitário) do divisor e do atenuador. O degrau aplicado tem amplitude de aproximadamente 90 V e tempo de subida < 5 ns.

4.3 – Fator de escala em BT

Os fatores de escala foram determinados separadamente considerando o divisor, atenuador e o sistema de medição completo. Foram utilizados dois multímetros de alta resolução com 8 ½ dígitos, um medindo o sinal aplicado e outro a saída para cada caso. Um calibrador de baixa tensão foi utilizado para gerar a tensão de ensaio. São apresentados na Tabela 2 os resultados dos fatores de escala obtidos com esta metodologia.

Tabela 2 – Fatores de escala determinados em baixa tensão corrente contínua.

Divisor de tensão			Atenuador			SMIP		
V ₁ (V)	V ₂ (mV)	FE (V ₁ /V ₂)	V ₁ (V)	V ₂ (mV)	FE (V ₁ /V ₂)	V ₁ (V)	V ₂ (mV)	FE (V ₁ /V ₂)
30,00000	39,63172	756,97	1,00000	56,34486	17,748	30,00000	2,23553	13420
	39,63152	756,97		56,34498	17,748		2,23506	13422
	39,63147	756,97		56,34515	17,748		2,23513	13422
	39,63137	756,98		56,34513	17,748		2,23502	13423
	39,63130	756,98		56,34554	17,748		2,23500	13423
	39,63132	756,98		56,34534	17,748		2,23498	13423
	39,63118	756,98		56,34562	17,748		2,23502	13423
	39,63101	756,98		56,34600	17,747		2,23493	13423
	39,63103	756,98		56,34613	17,747		2,23491	13423
	39,63087	756,99		56,34590	17,748		2,23492	13423
Média	756,98		Média	17,748		Média	13423	

4.4 - Fator de escala com impulsos em BT

Antes de determinar o fator de escala do SMIP com impulsos em baixa tensão foi necessário calibrar o FE de uma ponta de prova modelo P2220, e verificar o desempenho dinâmico referente ao parâmetro T_α . Está apresentada na Figura 4 a resposta ao degrau da ponta de prova e seu respectivo parâmetro T_α calculado.

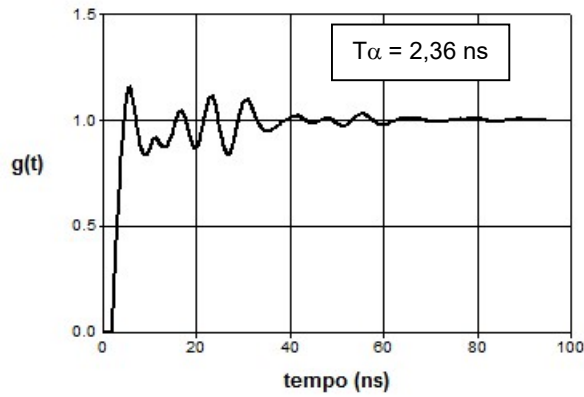


FIGURA 4 – Resposta ao degrau da ponta de prova P2220 (BW em Full).

Na análise e quantificação dos parâmetros de impulso para a calibração da ponta de prova foi utilizado um calibrador de impulsos de baixa tensão e um osciloscópio modelo TDS 540 com BW em FULL. Estão apresentados na Tabela 3 os resultados do fator de escala para calibração da ponta de prova. As condições ambientais foram mantidas em torno de 23 °C e 80 % de umidade relativa.

Tabela 3 – Fator de escala e o erro no tempo de frente T_1 determinado em baixa tensão com impulso atmosférico.

Calibrador		Ponta		FE V_1/V_2	Delta T_1 $((T_{1L}-T_{1R})/T_{1R}) * 100$
V_1 (V)	T_{1R} (μ s)	V_2 (V)	T_{1L} (μ s)		
250,0	0,84	24,96	0,835	10,02	-0,60
250,0	0,84	24,96	0,840	10,02	0,00
250,0	0,84	24,96	0,835	10,02	-0,60
250,0	0,84	24,96	0,835	10,02	-0,60
250,0	0,84	24,96	0,835	10,02	-0,60
250,0	0,84	24,96	0,840	10,02	0,00
250,0	0,84	24,96	0,835	10,02	-0,60
250,0	0,84	24,96	0,835	10,02	-0,60
250,0	0,84	24,96	0,840	10,02	0,00
250,0	0,84	24,96	0,840	10,02	0,00
Média				10,02	-0,36
Desvio padrão %				0	0,31

A calibração do SMIP completo foi realizada aplicando-se um impulso de baixa tensão com forma de onda a mais próxima possível daquela utilizada em ensaios de perfuração em isoladores. Este impulso foi obtido por meio de um gerador de impulsos de baixa tensão. Para análise e quantificação dos parâmetros de impulso nessa calibração foi utilizado o osciloscópio TDS 540 com BW em FULL, com a ponta de prova medindo o sinal de entrada. Estão apresentados na Tabela 4 os resultados dos fatores de escala medidos na calibração do SMIP com impulsos de BT.

Tabela 4 – Fator de escala e erro no tempo de frente T_1 determinados com impulso simulado de perfuração em BT.

Ponta		SMIP		FE V_1/V_2	Delta T_1 $((T_{1L}-T_{1R})/T_{1R}) * 100$
V_1 (V)	T_{1R} (ns)	V_2 (mV)	T_{1L} (ns)		
251,2	121,2	18,96	121,3	13249	0,08
249,6	120,0	18,72	122,0	13333	1,67
249,6	121,0	18,72	123,0	13333	1,65
251,2	120,0	18,92	121,0	13277	0,83
249,6	120,8	18,96	122,9	13165	1,74
249,6	120,4	18,96	121,0	13165	0,50
251,2	122,0	18,96	123,0	13249	0,82
251,2	120,0	18,96	121,0	13249	0,83
249,6	121,0	18,96	122,0	13165	0,83
249,6	120,0	18,96	121,0	13165	0,83
Média				13235	0,98
Desvio padrão %				0,51	0,54

4.5 - Software para filtragem, aquisição e análise do impulso

Para o ensaio real de impulso de perfuração foi necessário o desenvolvimento de um filtro para minimizar os efeitos de interferências nos sinais de impulso. O conceito para esse desenvolvimento está baseado no processamento digital com foco na localização do sinal no tempo e a duração das interferências. Isso é de grande importância em situações mais críticas e complexas como impulsos de perfuração em isoladores. Com isso, o processamento do sinal a ser utilizado levou em conta as informações do sinal tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. E para isso se torna necessária e fundamental uma ferramenta específica.

A transformada de wavelet é uma ferramenta poderosa no processamento de sinal para representação de sinais digitais na frequência e no tempo. E é o melhor método para análise de sinais não estacionários, que são boa parte dos sinais relacionados a fenômenos físicos. A transformada contínua de wavelet (CWT) de $x(t)$ é dada por (1), onde a transformação divide o sinal em versões deslocadas e escaladas de uma wavelet mãe $\psi(t)$ [6].

$$CWT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

Onde:

τ e a são parâmetros de escala e translação, respectivamente.

É de conhecimento amplo e consolidado na literatura um algoritmo eficiente para executar a transformada de wavelet que é chamado de análise de multi-resolução (MRA) e foi introduzido por Mallat [7]. A MRA substitui a transformada de wavelet discreta que é usada na transformação de sinais no domínio do tempo, digitalizados durante um ensaio de impulso, no domínio da transformada wavelet.

Na prática, a técnica de análise de multi-resolução baseia-se na filtragem de um sinal por meio de filtros passa baixa e passa alta cujos coeficientes são diretamente relacionados à wavelet-mãe, fornecendo representações do sinal final em relação aos coeficientes de funções wavelet e funções de escala.

Após uma série de métodos determinísticos utilizados na seleção da wavelet mãe foi determinada a wavelet ótima aplicada especificamente ao filtro para remoção de ruídos em impulsos de perfuração em isoladores. Para tornar prática a utilização do filtro em medições realizadas no laboratório foi desenvolvido em LabVIEW um software específico denominado RAPIT [8]. O software desenvolvido para aquisição e condicionamento do sinal tem por objetivo garantir uma maior confiabilidade na medição do valor de pico do impulso de perfuração e minimizar o efeito de interferências comumente presentes no sinal a ser medido neste tipo de ensaio. Na Figura 5 é apresentada a tela principal do software com um impulso real de perfuração sem e com filtro.

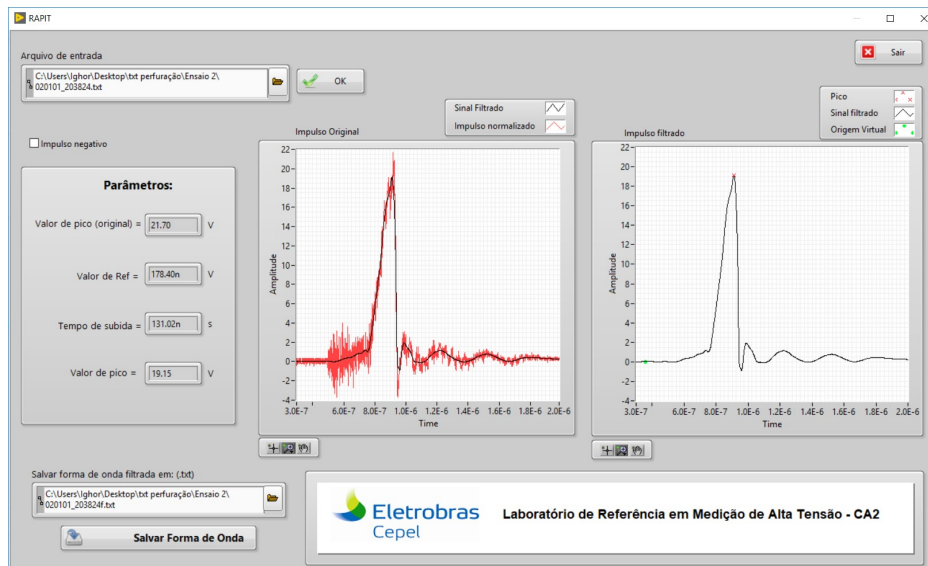


FIGURA 5 – Interface com o usuário do software RAPIT.

4.6 - Incerteza de medição

Com base no ISO GUM [9] e em procedimentos internos foram calculadas as incertezas do divisor de tensão e do sistema de medição completo. Foram consideradas também no cálculo como fontes de incerteza, as incertezas dos instrumentos, resolução, exatidão, desvio padrão das medidas e estabilidade. Os resultados indicaram uma incerteza de 1,7 % ($k=2$) para o divisor de tensão, e de 2,8 % para o SMIP. Esses valores estão dentro dos limites normalizados pela IEC 61211.

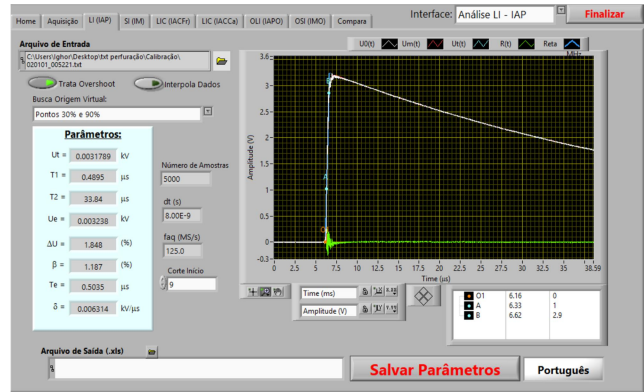
5.0 - COMPARAÇÃO COM IMPULSOS DE ALTA TENSÃO

Antes da comparação interlaboratorial entre os SMIP para ensaios de perfuração em isoladores foi realizado pelo VTT - Technical Research Centre of Finland uma calibração em alta tensão com impulsos atmosféricos rápidos não normatizados com amplitude de ≈ 40 kV e tempos $T_1 \approx 0,5 \mu\text{s}$ e $T_2 \approx 30 \mu\text{s}$. Foi utilizado na calibração o divisor de referência HUT400 do VTT para a determinação do fator de escala do SMIP do Cepel. O "Steeping gap" do Cepel foi utilizado no arranjo de ensaio e foi curto-circuitado mantendo os divisores do Cepel e VTT na mesma posição, assim como os seus respectivos pontos de aterramento.

Foram realizadas 10 aplicação na polaridade positiva e medido o valor de crista da referência e a saída do SMIP do Cepel. Os parâmetros medidos no SMIP do Cepel foram quantificados pelo software IMPREAL de acordo com a IEC 60060-1 [10]. São apresentados na Figura 6 o arranjo de ensaio e os parâmetros medidos pelo SMIP do Cepel, respectivamente. Na Tabela 5 são apresentados todos os valores medidos.



(a) Arranjo de ensaio no laboratório



(b) Medição do impulso com o IMPREAL

FIGURA 6 – Arranjo de ensaio para calibração do SMIP no laboratório de AT do VTT.

Tabela 5 – Calibração pelo VTT do SMIP do Cepel com impulsos rápidos na polaridade positiva.

Cepel - SMIP		HUT 400		FE Vp ref / Vp
Arquivo (CSV)	Vp (V)	Arquivo (CSV)	Vp ref (V)	
3924	3,168	12580	42731	13488
4139	3,167	12581	42725	13491
4352	3,167	12582	42744	13497
4448	3,166	12583	42718	13493
4540	3,183	12584	42932	13488
4944	3,185	12586	42960	13488
5029	3,181	12587	42936	13498
5103	3,179	12588	42901	13495
5141	3,182	12589	42923	13489
5221	3,179	12590	42909	13498
Média				13492
Desvio padrão				4
Desvio padrão percentual				0,03%

6.0 - COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL ENTRE SMIP

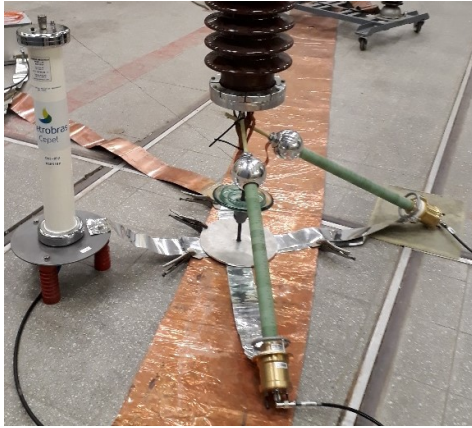
Para essa comparação interlaboratorial, que também é uma atividade no âmbito do Cigré Working Group D1.60: Traceable measurement techniques for very fast transients, foi desenvolvido um software específico para ensaios de perfuração em isoladores para garantir uma maior confiabilidade na medição do valor de pico do impulso e minimizar o efeito de interferências inerentes ao ensaio.

O software foi desenvolvido especificamente para o processamento e análise de formas de onda de impulso de perfuração em isoladores do Cepel. O software permite quantificar os seguintes parâmetros: Valor de pico original do impulso, valor de referência definido na origem virtual, que é o instante em que o sinal do impulso começa a aumentar acima do patamar inicial de base, o tempo de subida e o valor de pico descontado o valor de referência. Todos estes parâmetros são determinados após a remoção do ruído.

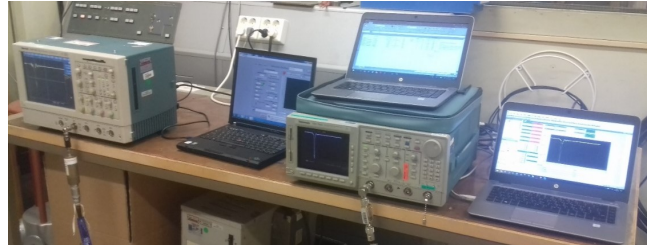
Nesta comparação realizada nas instalações do VTT, o sistema de medição utilizado pelo Cepel foi composto pelo divisor de tensão de 600 kV do tipo resistivo de baixa resistência e mínima indutância, um sistema de transmissão

do sinal por cabo coaxial de dupla blindagem, com 7,5 m de comprimento e impedância de 50Ω , um atenuador resistivo e o registrador digital modelo TDS 5104B. O software RAPIT utilizado no registrador para quantificar os parâmetros do ensaio também faz parte do SMIP, conforme mostrado na Figura 7.

No arranjo compacto de ensaio para a comparação o divisor do VTT, que é o Instituto Nacional de Metrologia da Finlândia, foi utilizado em posição diagonal conectado diretamente ao objeto sob ensaio, um isolador de vidro, enquanto o divisor do Cepel foi colocado na posição vertical conectado ao isolador através de um condutor de alta tensão, já que esta é a posição original de uso deste divisor e na qual foi caracterizado pelo Cepel. Um outro divisor com características similares ao do VTT também foi utilizado na comparação de SMIP [11]. Esse arranjo de ensaio está de acordo com as recomendações da IEC 61211.



(a) Arranjo de ensaio para comparação de SMIP.



(b) Detalhes da instrumentação utilizada na comparação entre SMIP.

FIGURA 7 – Arranjo de ensaio no hall de alta tensão do VTT para comparação entre SMIP.

A forma de onda filtrada pelo software RAPIT obteve uma maior correlação em termos de amplitude e forma de onda com o sinal medido pelos SMIP do VTT. São apresentados na Figura 8 dois impulsos de perfuração em isoladores, um medido pelo VTT e outro pelo Cepel. Embora os dois SMIP utilizem osciloscópios com 8 bits de resolução vertical os modelos são diferentes, para o VTT foi utilizado o TDS 784C e para o Cepel o TDS 5104B. Nesse caso as características principais dos instrumentos utilizados são, para o VTT, uma taxa de amostragem de 1,0 GS/s e largura de banda de 0,5 GHz, enquanto para o Cepel foi utilizada 1,25 GS/s de taxa de amostragem e 1 GHz de largura de banda.

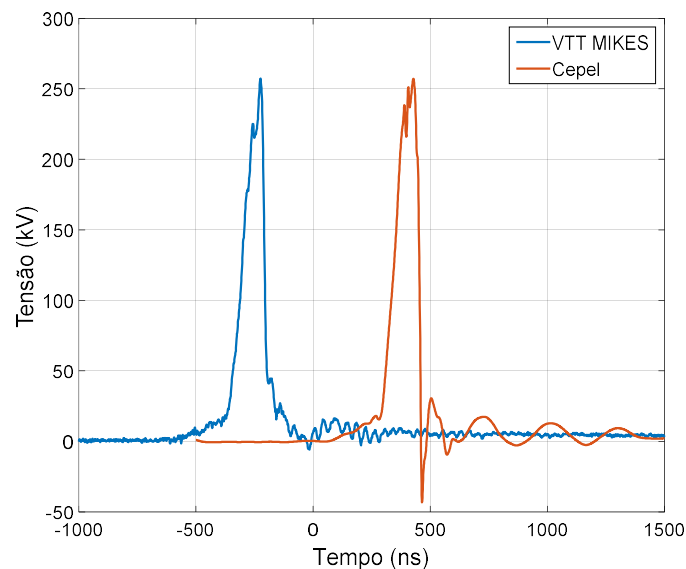


FIGURA 8 – Formas de onda medidas pelos SMIP do VTT MIKES e Cepel.

Estão apresentados na Tabela 6 todos os resultados da comparação interlaboratorial em AT entre VTT e Cepel, considerando 10 aplicações em cada polaridade para o arranjo de ensaio mostrado na Figura 7. São apresentadas também informações do Fator de Escala (SF) do SMIP do Cepel, os arquivos e o desempenho do SMIP com e sem filtro. Nesse sentido, observa-se uma redução significativa do erro médio entre os dois SMIP, assim como o desvio padrão máximo de 2%.

Tabela 6 – Resultados da comparação interlaboratorial para SMIP em AT entre VTT MIKES e Cepel.

MIKES		CEPEL	SF: 13492					SF: 13492				
file	Up [V]	Arquive (CSV)	Vpk, TEK (V)	Up [V]	From MIKES value	avg.	stdev.	Vpk, TEK (V) Filtered	Up [V], filtered	From MIKES value	avg.	stdev.
Llcal_12txt.txt	260936	11528	21.60	291437	11.7%	13%	3%	20.03	270253	3.6%	-0.4%	2.0%
Llcal_13txt.txt	252665	11930	21.70	292786	15.9%			19.02	256626	1.6%		
Llcal_14txt.txt	262415	12503	22.10	298183	13.6%			19.08	257436	-1.9%		
Llcal_15txt.txt	259069	12724	21.70	292786	13.0%			19.00	256356	-1.0%		
Llcal_16txt.txt	257435	12816	22.80	307627	19.5%			19.56	263912	2.5%		
Llcal_17txt.txt	256983	12924	21.60	291437	13.4%			18.84	254197	-1.1%		
Llcal_18txt.txt	259445	13014	20.70	279293	7.7%			18.99	256221	-1.2%		
Llcal_19txt.txt	264369	13055	22.20	299532	13.3%			19.28	260134	-1.6%		
Llcal_20txt.txt	266051	13137	22.40	302230	13.6%			19.29	260269	-2.2%		
Llcal_21txt.txt	263471	13205	21.70	292786	11.1%			19.05	257031	-2.4%		
Llcal_26txt.txt	-268338	21047	22.50	-303580	13.1%	12%	5%	19.73	-266206	-0.8%	0.2%	0.7%
Llcal_27txt.txt	-271300	21240	22.50	-303580	11.9%			20.12	-271468	0.1%		
Llcal_28txt.txt	-265264	21322	21.20	-286040	7.8%			19.90	-268499	1.2%		
Llcal_29txt.txt	-273851	21405	22.10	-298183	8.9%			20.38	-274976	0.4%		
Llcal_30txt.txt	-270739	21445	20.90	-281992	4.2%			20.14	-271738	0.4%		
Llcal_31txt.txt	-272709	21542	24.10	-325168	19.2%			20.18	-272277	-0.2%		
Llcal_32txt.txt	-271823	21628	22.80	-307627	13.2%			20.04	-270388	-0.5%		
Llcal_33txt.txt	-269876	21744	24.30	-327866	21.5%			20.16	-272007	0.8%		
Llcal_34txt.txt	-272825	21850	22.10	-298183	9.3%			20.48	-276325	1.3%		
Llcal_35txt.txt	-271852	21956	23.00	-310326	14.2%			19.97	-269444	-0.9%		

7.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um resumo dos resultados obtidos com os diferentes métodos para determinação do Fator de Escala é apresentado na Tabela 7. O FE com impulsos em AT foi determinado no nível de +42 kV e utilizando um impulso atmosférico não normalizado com tempo de frente em torno de 0,5 μ s. Observa-se na Tabela 7 uma diferença no FE inferior a 2% considerando todos os métodos para determinação do FE. Utilizando o FE determinado em AT pelo VTT para a comparação interlaboratorial entre SMIP, a diferença na amplitude do ensaio foi inferior a 0,5% conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 7 – Resumo de diferentes métodos para determinação do FE.

Descrição	Componentes (R)	CC _{BT}	IMP _{BT}	IMP _{AT}	Diferença (%)
FE DIVISOR	750,77	756,98	-	-	-0,82
FE ATENUADOR	17,659	17,748	-	-	-0,50
FE TOTAL	13258	13423	13235	13492	-1,7 (R/IMP _{AT})
					-0,51 (CC _{BT} /IMP _{AT})
					-1,9 (IMP _{BT} /IMP _{AT})

8.0 - OBSERVAÇÃO, COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO

O SMIP do Cepel foi todo caracterizado em BT e comparado em AT e está de acordo com os requisitos normalizados, tanto em termos de desempenho dinâmico ($T\alpha < 3$ ns) como nas incertezas calculadas do divisor (< 2%) e para o sistema de medição completo (< 5%) e, portanto, está adequado para calibração de outros SMIP.

Em relação à estabilidade do FE pode-se observar uma diferença inferior a 0,3% entre os FE determinados em 2015 (13458) e o atual (13423). O método comparativo para determinar o FE do SMIP que apresentou resultados com a menor diferença foi o método de calibração do FE utilizando baixa tensão em CC. A incerteza calculada do SMIP para ensaios de perfuração é de 2,8% (k=2) para um FE de 13492.

Com base nos resultados da caracterização do SMIP em BT e complementado com a comparação interlaboratorial entre Cepel e VTT-Mikes, pode-se comprovar a confiabilidade dos resultados de ensaios de perfuração em isoladores realizados nos laboratórios do Cepel, e que o SMIP é composto pelo divisor de tensão resistivo de 600 kV, sistema de transmissão do sinal, atenuador, casador de impedância e o registrador digital com o software RAPIT. Nesse sentido, todo o SMIP do Cepel, incluindo o software, está rastreado a referência de um INM do exterior (VTT) e de acordo com os requisitos da IEC 61211.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC 61211: 2004 "Insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V - Impulse puncture testing in air".
- (2) IEC 60060-2:2010 "High voltage test technique, Part 2: Measuring systems".
- (3) Martti Aro (FINLAND) and Robert C. Hughes (UNITED KINGDOM) on behalf of Cigré Working Group 33.03, TF 33.03.01, "Puncture testing of ceramic and glass insulators", *Electra* 136, 1991.
- (4) Orsino Borges Filho, M. T. Fernandes, Azevedo L. C. and Oliveira Y. R., "Comparison of measuring systems used in impulse puncture withstand test", CIGRÉ Winnipeg 2017 Colloquium; Winnipeg, Canada, 2017.
- (5) IEC 61083-1: 2001 "Instruments and software used for measurements in high-voltage impulse tests, Part 1: Requirements for instruments".
- (6) Onal, Emel, Ozcan Kalenderli, and Serhat Seker. "Multi-resolution wavelet analysis for chopped impulse voltage measurements and feature extraction." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 15.3, 2008.
- (7) S. Mallat, "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Press, London, 1999.
- (8) Ighor Souza dos Santos, Carlos R. Hall Barbosa, M. T. Fernandes e Orsino Borges Filho., "Multi-resolution Wavelet Analysis for Noise Reduction in Impulse Puncture Voltage Measurements", artigo em análise para publicação no IEEE "Transactions on Instrumentation and Measurement" em 2019.
- (9) ISO - GUM: "Guide to the expression of uncertainty in measurements".
- (10) IEC 60060-1: 2010 "High Voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Test Requirements".
- (11) Jari Hällström, Jussi Havunen, Wei Yan, Yi Li, Márcio Thelio F. Silva, Marcus V. B. Lopes, Orsino Borges Filho, Mika Laiho – "Comparison of Measuring Systems for Puncture Test According to IEC 61211", artigo em análise para publicação no ISH "International Symposium on High Voltage Engineering" em 2019.

Agradecimentos:

Os autores agradecem ao Centre for Metrology MIKES do VTT Technical Research Centre of Finland por ter disponibilizado e autorizado o uso dos resultados em alta tensão apresentados nas Tabelas 5 e 6 deste informe técnico.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Márcio Thelio Fernandes da Silva nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1965. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Gama Filho, Rio de Janeiro, Brasil, em 1995 e obteve o título de Mestre em Metrologia pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, em 2011. Atua no Laboratório de calibração de alta tensão do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) da Eletrobrás com pesquisas, normatização e metrologia em alta tensão, usando e desenvolvendo dispositivos para ensaios em equipamentos elétricos para alta tensão CA, CC e impulsos de tensão e corrente. Márcio Thelio vem trabalhando com técnicas de ensaio e calibração em alta tensão por mais de 30 anos.