

## 6 Conclusões e recomendações

Em termos de energia elétrica e como em todos os países de mundo as reservas naturais são cada vez mais escassas. O aumento da população requer cada vez mais energia, e por outro lado, a produção e o uso de energia estão aumentando a poluição mundial.

Nos últimos vinte anos com o crescimento da população e o consumo acelerado em todos os setores, ocorrem ações e estudos para melhoria da qualidade de vida da população em relação ao meio ambiente e práticas sustentáveis.

Sabendo que a maioria dos sistemas de transmissão de energia está utilizando com incontestável sucesso EHVAC, cabe perguntar em quais as circunstâncias dever-se-ia então usar HVDC. Nos casos de longas distâncias, sejam terrestres ou submarinas, uma das questões é de ordem econômica, ou seja, como economizar em linhas ou cabos a fim de cobrir os aumentos dos custos das estações. Entretanto, isto é, muitas vezes, um problema secundário, com relação a outras considerações, tais como impacto no meio ambiente ou a controlabilidade de HVDC. Quando se trata de distâncias mais curtas, inclusive zero, como no caso de conversores “back-to-back” (BtB), é a controlabilidade que confere a vantagem decisiva para uso de HVDC. Esta vantagem pode ser usada para enfrentar qualquer um dos inúmeros desafios encontrados com a utilização de HVDC.

Além das vantagens técnicas existem também as vantagens de ordem econômica e ambiental oferecidas por linhas ou cabos de custo mais baixos, redução de faixas de servidão e níveis mais baixos de campos eletromagnéticos.

Jardini, em seus estudos e de forma teórica, mostra na Figura 40 que a transmissão em HVDC é mais econômica que em ATCA para uma faixa de distâncias de transmissão em torno de 1000 km e superiores. Como exemplo pode-se citar a transmissão de ITAIPU (Foz do Iguaçu / Ibiúna) com 790 km.

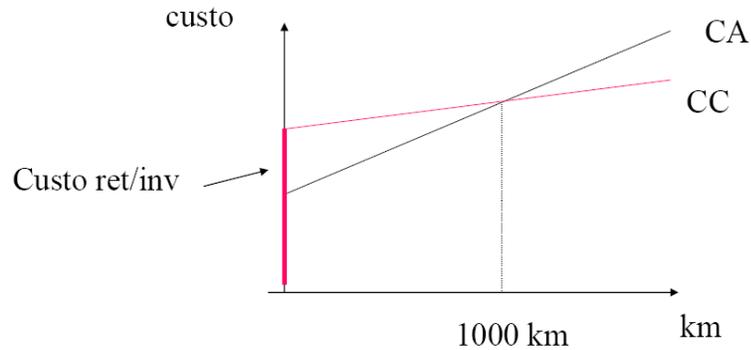


Figura 40 - Comparação de custos para a transmissão em HVDC e ATCA

Uma nova infraestrutura metrológica está em fase de desenvolvimento nos países da União Européia para apoiar a transmissão de HVDC em níveis de trabalho de 800 kV. No entanto, nenhuma infraestrutura metrológica atualmente existe para apoiar a proposta de HVDC em níveis de trabalho semelhantes. Consequentemente HVDC não pode ser mensurado com confiabilidade para efeitos de proteção ou de faturamento, a sua qualidade não pode ser monitorada com exatidão suficiente e os fabricantes de equipamentos não podem determinar com exatidão a interação na redução das perdas de energia.

Países considerados desenvolvidos possuem na Metrologia a principal arma para garantir a qualidade de produtos e serviços, promovendo o comércio justo e transformando de forma positiva a infraestrutura tecnológica de países e organizações.

CEPEL e INMETRO, em conjunto com universidades e diversos laboratórios de ensaios em alta tensão no país, estão trabalhando para fortalecer a Metrologia, especificamente com programas de Programas & Desenvolvimento + Inovação, incluindo a construção e desenvolvimento de novos padrões e também realizando trabalhos de intercomparação entre padrões para alta tensão alternada e de impulsos de tensão até 500 kV, promovendo a confiabilidade e a garantia da qualidade dos resultados.

Nesse contexto, a presente dissertação de mestrado com o desenvolvimento de um divisor padrão metrológico para alta tensão em corrente contínua vem colaborar com a Metrologia e o desenvolvimento do país. Atende também à crescente demanda por serviços acreditados de calibração/ensaios em equipamentos elétricos para HVDC, melhorando a estrutura metrológica em alta

tensão no país e atendendo também à demanda da indústria nacional, decorrente dos recentes investimentos e avanços na transmissão em linhas de HVDC. Os resultados dos ensaios de tipo e rotina realizados comprovaram a validação como padrão para HVDC.

O padrão aqui apresentado será utilizado na calibração de outros padrões para HVDC e também na calibração de sistemas de medição industriais para a faixa de 1 kV a 250 kV, garantindo a confiabilidade de acordo com a cadeia de rastreabilidade descrita na Figura 41.

Como resultado da construção e calibração do padrão, segue um resumo da aplicação e operação do Sistema de Medição de Referência (SMR).

### **Padrão para HVDC de 1 kV até 50 kV**

#### **SMR composto por um DVAT + Fluke 8508A**

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

#### **Condições ambientais:**

**Temperatura: 22 °C ± 5 °C e Umidade relativa: 55 % ± 20%**

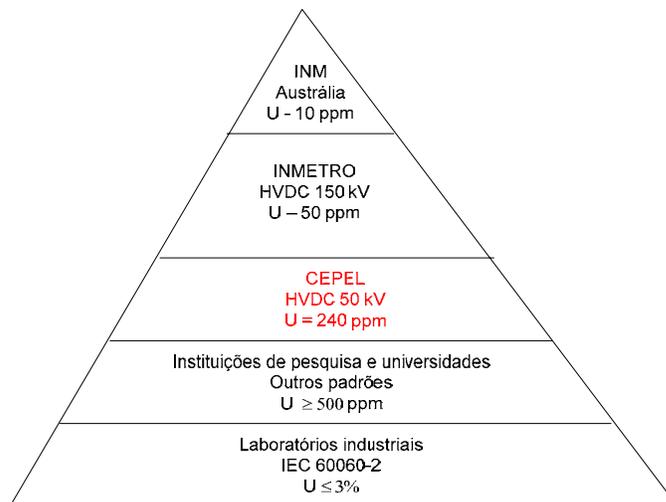


Figura 41 - Cadeia de rastreabilidade para HVDC

Fazendo uma comparação entre a incerteza do padrão para HVDC até 50 kV com a incerteza dos padrões pertencentes à INM de outros países (ver Tabela 3 – Cap. 2) pode-se observar que:

⇒ A incerteza do protótipo desenvolvido neste trabalho para HVDC é da mesma ordem de grandeza do NPLI da Índia;

⇒ A incerteza do protótipo desenvolvido neste trabalho para HVDC é 2,4 vezes maior que o INRIM da Itália;

⇒ A incerteza do protótipo desenvolvido neste trabalho para HVDC é 4,8 vezes maior que o MIKES na Finlândia e também do INMETRO no Brasil.

Como é recomendável que o padrão possua uma incerteza no mínimo 3 vezes melhor que o objeto sob calibração [33], de acordo com essa recomendação o padrão para HVDC até 50 kV pode ser calibrado tanto no INRIM, como no MIKES ou INMETRO, ou em qualquer outro INM com características semelhantes.

Analisando a contribuição individual de cada fonte de incerteza, pode-se observar que a não linearidade do padrão ( $u_{10} = 228$  ppm) foi a principal fonte responsável pelo resultado de 240 ppm. Entretanto, como serão pesquisadas, no futuro próximo, formas de redução da não-linearidade do padrão, foi realizada uma simulação do cálculo da incerteza com um valor para a incerteza associada a esta não-linearidade em torno de 20 ppm (em vermelho na Tabela 10 a seguir).

A distribuição de probabilidade (DP) foi considerada como tipo A e B. Tipo A (normal-Nor.) considera uma série de observações e a tipo B (retangular-Ret.) qualquer outra distribuição diferente da análise de uma série de observações.

Tabela 10 - Incerteza de medição considerando comportamento linear do padrão

Fontes	xi (ppm)	DP	vi	FD	Up	Up2
u1	51	Nor.	$\infty$	2	2,55E+01	6,50E+02
u2	10	Nor.	$\infty$	2	5,00E+00	2,50E+01
u3	2,0	Nor.	9	3,1623	6,32E-01	4,00E-01
u4	30	Ret.	$\infty$	1,732	1,73E+01	3,00E+02
u5	17	Ret.	$\infty$	1,732	9,82E+00	9,63E+01
u6	91	Ret.	$\infty$	1,732	5,25E+01	2,76E+03
u7	40	Ret.	$\infty$	1,732	2,31E+01	5,33E+02
u8	74	Nor.	9	3,1623	2,34E+01	5,48E+02
u9	62	Nor.	$\infty$	2,1	2,95E+01	8,72E+02
u10	20	Nor.	10	3,3166	6,03E+00	3,64E+01
u11	84	Ret.	$\infty$	1,732	4,85E+01	2,35E+03
Incerteza combinada $U_c \Rightarrow \sqrt{U_p^2}$						92
Incerteza padrão $U = k * U_c$						184

O resultado da incerteza do padrão, considerando-o linear, conforme mostrado na Tabela 10, foi de  $\cong 180$  ppm. Melhorando ainda mais a estabilidade e minimizando outras fontes de incerteza pretende-se obter resultados de até 150 ppm.

Ao longo do trabalho, além da construção e calibração do padrão, foi possível também responder a todas as questões elaboradas no capítulo 1, quais sejam:

- 1 - Quais são as dificuldades para se obter um sistema de medição padrão em HVDC? O que diferencia esse sistema de outro para alta tensão em corrente alternada (ATCA)?

Um padrão para HVDC é do tipo puramente resistivo e, como já informado no capítulo 4, as principais fontes de erros de medição em divisores de tensão HVDC são os coeficientes térmicos das resistências, o aquecimento próprio de acordo com a perda  $I^2R$ , a corrente de fuga, as descargas parciais em alta tensão e a utilização de materiais com estabilidade e linearidade inadequadas e materiais isolantes que não possuem a característica de baixa absorção de umidade, e também uma baixa incerteza de medição. Já os sistemas de medição para ATCA são fundamentalmente do tipo capacitivo, mas é possível utilizar um DVAT resistivo, porém com limitação de aplicação em torno de 100 kV.

- 2 - Quais são as pesquisas em andamento sobre HVDC (Brasil / mundo)?

O próprio desenvolvimento do padrão para HVDC já é considerada uma pesquisa para melhorar a Metrologia em AT, e as pesquisas com diferentes feixes de condutores para transmissão de grandes blocos de energia, motivados pelos investimentos em geração na região da Amazônia, etc.

Já nos países da União Européia as pesquisas se concentram na infraestrutura para a transmissão de HVDC com níveis de 800 kV.

- 3 - Como está a estrutura metrológica no Brasil em alta tensão?

O INMETRO, como INM, possui padrões para ATCA até 200 kV e HVDC até 150 kV. São apresentados na Tabela 11 os laboratórios atualmente acreditados pelo INMETRO para medição de ATCA, as faixas de aplicação e incertezas de medição.

Tabela 11 - Laboratórios acreditados pelo INMETRO para ATCA

Instituição	Faixa de aplicação	Incerteza (U)
CEPEL (CA2)	10 kV – 180 kV	0,53%
IPT	10 kV – 100 kV	0,12%
IEE/USP	1 kV – 35 kV	0,20%
LABELO/PUCRS	1,1 kV – 12 kV	0,34%
SETTING	1 kV – 40 kV	2,9%

Para HVDC até hoje não existem ainda laboratórios acreditados pelo INMETRO.

A preocupação do CEPEL é grande com a qualidade e confiabilidade dos resultados fornecidos por seus diversos laboratórios de ensaios. Portanto, sempre que possível, envia seus padrões para serem rastreados no exterior, em instituições como NIST, PTB ou HUT, para os casos onde não há rastreabilidade no país. O CEPEL já é acreditado para ATCA e está em processo de acreditação do laboratório de Referência em Medição de Alta Tensão para Impulsos atmosféricos plenos e cortados na frente até 500 kV, sendo em breve o primeiro laboratório no Brasil acreditado pelo INMETRO para calibração de impulsos de alta tensão.

#### 4 - Por que construir um divisor de tensão como padrão para HVDC?

Como Metrologia e Qualidade caminham juntas para o desenvolvimento de países e organizações, o padrão para HVDC é uma ferramenta de rastreabilidade, que aumentará a confiabilidade e a competitividade da indústria nacional de equipamentos elétricos para CC.

#### 5 - O divisor de tensão até 50 kV pode ser considerado um padrão?

De acordo com os resultados e o desempenho do padrão, (incerteza de 240 ppm, e comparando ainda o padrão com a incerteza do NPLI e INRIM), pode-se considerar o DVAT para HVDC até 50 kV como um padrão. Deve-se considerar ainda que a IEC 60060-2 recomenda que um SMR, para ser utilizado em medição de alta tensão CC, deve ter uma incerteza  $\leq 1\%$ .

Diversas dificuldades foram encontradas e superadas na fase de desenvolvimento e calibração do padrão. O protótipo construído foi desenvolvido em conformidade com os requisitos das normas IEC 60060 “High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements” e Part 2: “Measuring systems”.

Como recomendações para trabalhos futuros podem-se destacar as seguintes ações.

- ⇒ Estudo para melhorar a linearidade do padrão;
- ⇒ Software para melhorar a estabilidade do padrão e o sincronismo durante o processo de calibração;
- ⇒ Redução da incerteza do padrão para 150 ppm;
- ⇒ Acreditação do laboratório de calibração do CEPEL para HVDC de 1 kV até 50 kV;
- ⇒ Acreditação da grandeza tensão contínua acima de 50 kV no país;
- ⇒ Construção/desenvolvimento de outros padrões para tensões até 1 MV;
- ⇒ Estímulo à ampliação da rede de laboratórios acreditados em AT no país, especificamente para tensões de impulsos atmosféricos, impulsos de manobras e impulsos de corrente.

O CEPEL é uma sociedade civil sem fins lucrativos mantido pela Eletrobrás e é o maior centro de pesquisas em energia elétrica do Hemisfério Sul. O Departamento de laboratórios (DPL) do CEPEL tem a missão de gerenciar processos de laboratórios e certificação, visando à realização de pesquisa, desenvolvimento e serviços tecnológicos para o setor de energia elétrica, agregando valor para os seus associados, participantes e colaboradores gerando melhorias e inovações tecnológicas em benefício da sociedade.

Esta dissertação de Mestrado, desenvolvida dentro do programa de Metrologia para Qualidade e Inovação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PósMQI da PUC-Rio), possibilitou a construção do padrão. Com o Padrão foi possível suprir as necessidades em termos de metrologia para as indústrias de equipamentos elétricos para HVDC, garantindo exatidão, rastreabilidade, confiabilidade e também foi possível aumentar a competitividade da indústria nacional. O projeto e desenvolvimento do padrão, além de se alinhar, se encaixa diretamente na missão do Departamento de Laboratórios (DPL) do CEPEL, de pesquisa e desenvolvimento e serviços tecnológicos para o setor de energia elétrica.