

**Comitês de Estudo A3
Tema Preferencial 3****Desenvolvimento de protótipo de para-raios de tensão nominal $U_R = 828 \text{ kVef}$
para um sistema de UAT CA de $U_N = 1000 \text{ kVef}$**

**Adriano A. Dellallibera, Silvio L. M. Brito
Ind. Eletromecânica Balestro Ltda.
Brasil**

RESUMO

Em projeto de P&D desenvolvido no âmbito da ANEEL das Empresas Eletronorte e State Grid Brasil, um sistema de transmissão em corrente alternada de Ultra Alta Tensão em CA de $U_N = 1000 \text{ kVef}$ foi estudado [1]. O projeto avaliou diferentes cenários e culminou com a proposição de um sistema cruzando a região NE e terminado em Minas Gerais, com excelentes viabilidades técnicas como corredor para as gerações distribuídas da região.

Integrando o grupo executor deste projeto, nos coube apresentar protótipos conceito de isoladores e para-raios para o sistema. Este IT apresenta o protótipo do para-raios que foi desenvolvido e fabricado, que fosse viável e inovador, tomando por referências as experiências Chinesa [2] e Indiana [3], já que estes países já possuem projetos em UAT 1000 kV CA, havendo instalações já em operação na China.

O dimensionamento de para-raios para este nível de tensão inicia-se pela evidente constatação de que os para-raios convencionais de classe 5 atualmente em utilização até sistemas de $U_N = 765 \text{ kV}$ em CA não possuem desempenho elétrico viável, i.e., suas características de proteção não permitem a correta coordenação de isolamento em relação aos níveis de isolamento dos equipamentos para o nível de tensão UAT CA de 1000 kV definidos na Norma IEC 60071-1 [4]. Os demais requisitos decorrentes desta constatação elevam tais para-raios a classes superiores não previstas pela Norma IEC 60099-4:2009 [5], assim o desempenho elétrico esperado só se resolve através da construção com múltiplas colunas.

O protótipo de para-raios construído focou nas margens de segurança traçadas como objetivo do projeto [1] entre a suportabilidade dos equipamentos das SE's definidas em [4] versus valores de desempenho elétrico do para-raios. A solução foi a execução do protótipo de tensão nominal $U_R = 828 \text{ kVef}$ utilizando 6 colunas de classe 3 de descargas de LT, aproveitando módulos já de construção consolidada na empresa.

O IT apresenta também os resultados práticos obtidos na caracterização elétrica que se desenvolveu em laboratório externo, num trabalho desafiador pelo seu ineditismo e pela limitada janela de tempo disponível na ocasião. O trabalho lançou algumas novidades no laboratório, e já projeta possibilidades de continuidade futura em temas ainda não avaliados.

PALAVRAS-CHAVE

Para-raios, subestações, UAT, UAT CA,

Adriano A. Dellallibera, adrianoa@balestro.com.br

Dimensionamento dos valores objetivo dos para-raios

Para os níveis de tensão nominal e máxima operativa ($U_N = 1000$ kV e $U_M = 1100$ kV) do sistema proposto, tomando como base as recomendações da Norma IEC 60099-5 [6], o para-raios mais adequado deve possuir uma máxima tensão de operação contínua $U_C > U_M$ fase-terra do sistema.

Assim, a tensão nominal $U_R = 828$ kV foi considerada a mais adequada neste projeto, pois neste caso tem-se $U_C = 662$ kV, satisfazendo a exigência acima. A mesma solução de dimensionamento foi escolhida para os sistemas semelhantes em operação e construção na China [2]. Para o caso Indiano, para a U_M adotada naquele país (1200 kV), adotou-se para os para-raios $U_R = 850$ kV [3].

Foram estabelecidos como objetivo para este projeto os seguintes valores suportáveis para os equipamentos (em conformidade com a IEC [4]) e respectivas margens mínimas de proteção:

- a) Margem de proteção mínima de 15% para surtos de manobra suportáveis de 1800 kVp nos equipamentos, o que implica uma tensão residual do para-raios para surto de manobra a 2 kA máxima de 1530 kVp;
- b) Margem de proteção mínima de 25% para surtos de descarga atmosférica (NBI) = 2400 kVp, o que implica uma tensão residual do para-raios para surto atmosférico a 20 kA máxima de 1800 kVp.

Como já dito acima, os para-raios de coluna singela da classe 5 usuais em sistemas de tensão nominal até 765 kV não apresentam níveis de proteção adequados para as margens apontadas e para satisfazer aos níveis de isolamento propostos em [4], reproduzidos na tabela abaixo, adaptada de [4]:

Table 3 – Standard insulation levels for range II ($U_m > 245$ kV) (1 of 2)

Highest voltage for equipment, U_m kV (RMS value)	Standard rated switching impulse withstand voltage			Standard rated lightning impulse withstand voltage ^b kV (peak value)
	Longitudinal insulation ^a kV (peak value)	Phase-to-earth kV (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value)	
1 100	–	1 425 ^d	–	1 950
	1 425	1 550	1,70	2 100
	1 550	1 675	1,65	2 100
	1 675	1 800	1,6	2 250
				2 400
				2 400
				2 550

Desta maneira em projetos de sistemas de transmissão em UAT, o desempenho requerido dos para-raios torna mandatória a utilização de soluções de para-raios com múltiplas colunas em paralelo, a fim de aumentar substancialmente a área dos varistores e reduzir a densidade de correntes de descarga sobre os mesmos, reduzindo assim as tensões residuais de surto atmosférico e de manobra, provendo características de proteção dos para-raios aceitáveis para adequada coordenação de isolamento com os equipamentos das subestações.

Para obter melhores características de proteção dos para-raios, as propostas Chinesa e Indiana apontam para a utilização de 4 colunas paralelas de para-raios de classe 5, mas neste projeto buscou-se otimizar o desempenho elétrico do para-raios a uma solução com características de proteção intermediárias entre

o projetado para uma coluna de classe 5 e as soluções desenvolvidas por tais países, sintetizada na tabela abaixo:

Valores estimados de nível de proteção dos para-raios (pu de U_R)			
Surto Atmosférico		Surto de Manobra	
Relação entre Ures a 20 kA/ U_R		Relação entre Ures a 2 kA/ U_R	
Projeção: 1 coluna classe 5	2,38	Projeção: 1 coluna classe 5	1,984
Indiano [3]	2,00	Indiano [3]	1,765
Chinês [2]	1,96	Chinês [2]	1,763
Proposta Balestro: 6 colunas classe 3	2,17	Proposta Balestro: 6 colunas classe 3	1,845

A escolha por 6 colunas de classe 3 teve também como objetivo desenvolver este para-raios a partir de elementos já em fabricação e fornecimento regular pela empresa, principalmente em razão dos limites impostos pelo projeto, em especial quanto aos prazos.

Além da inovação quanto as características de proteção, este projeto também inova ao propor a construção do para-raios com invólucros poliméricos com colunas abertas e equalização de potencial externa, ao contrário dos demais de colunas inseridas em tubos de porcelana únicos de grande diâmetro. Além dos para-raios poliméricos serem uma tendência em todos os níveis de tensão, a proposta de colunas abertas melhora o desempenho termodinâmico dos para-raios, já que as colunas não compartilham calor. As imagens abaixo ilustram o desenho tridimensional do para-raios e a montagem inicial do protótipo:



Execução do protótipo

Em uma construção de para-raios com esta configuração, alguns temas merecem especial atenção, tendo sido objeto de intenso trabalho, dentre outros não citados, destacamos:

- A assimetria da distribuição de tensão ao longo da altura do para-raios deve ser controlada por elementos capacitivos de equalização, no caso deste projeto a compensação é toda externa ao para-raios, resultando na intrincada geometria de anéis observada na figura acima.

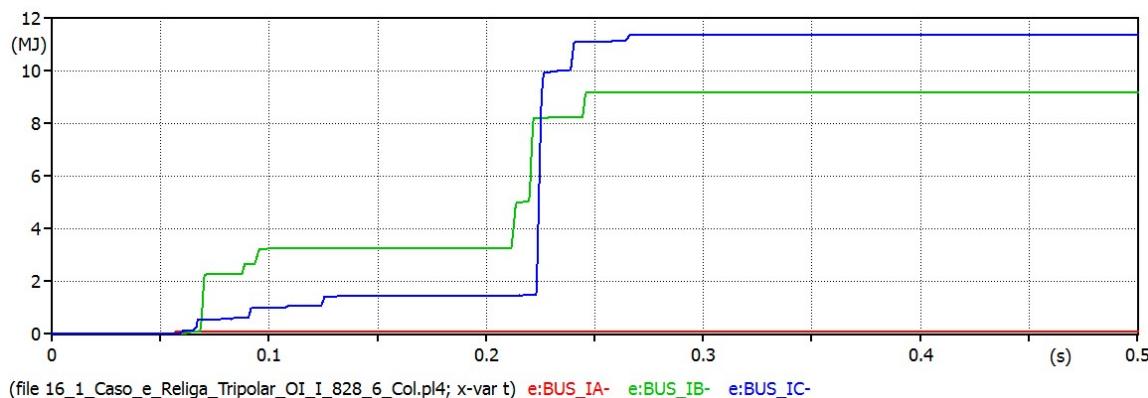
- A distribuição de correntes entre as colunas foi assumida como tendo uma assimetria máxima de $\pm 10\%$ como objetivo do projeto, e especial atenção foi dada a assimetria na região de correntes de surto de manobra, já que as maiores solicitações elétricas a que este para-raios será submetido em trabalho nas subestações ocorrem nos eventos de manobras, portanto em condições de sobretensões temporárias, como confirmam os estudos de transitórios deste projeto [1].

Segundo a publicação do CIGRÉ [7], os sistemas de transmissão em $U_M = 1100$ kV CA demandarão dos para-raios uma capacidade de absorção de energia térmica W_{TH} acima da atual classe 5 de descargas de linhas de transmissão, lembrando que as classes de descarga de linhas são um conceito em extinção na mais recente edição 3.0 da Norma IEC [5]. Os para-raios classe 5 dissipam em média 15 kJ/kV de U_R de energia térmica, e usualmente são utilizados em sistemas CA até 765 kV, no entanto o artigo mencionado aponta para energias térmicas específicas entre 25 kJ/kV e 50 kJ/kV de U_R .

Assim, considerando as assimetrias de projeto acima, e em concordância com a Norma IEC [5] mais atual, as características garantidas mais relevantes ao projeto para este para-raios são:

- Capacidade de transferência repetitiva de carga $Q_{RS} = 6,8$ C;
- Máxima energia térmica nominal $W_{TH} = 39$ kJ/kV de U_R ;
- Suportabilidade à curto-círcuito $I_{SC} = 63$ kA.

A energia térmica específica acima mostrou-se adequada nas simulações efetuadas durante os estudos de transitórios do sistema de transmissão proposto, tendo o para-raios dissipado uma máxima energia de 11,39 MJ na pior situação transitória avaliada (religamento tripolar sem sucesso após ocorrência de rejeição de carga e curto-círcuito monofásico). A figura abaixo mostra a energia absorvida no para-raios protótipo $U_R = 828$ kV com seis colunas na barra I, religamento tripolar (estudo ITAEE, em [1])



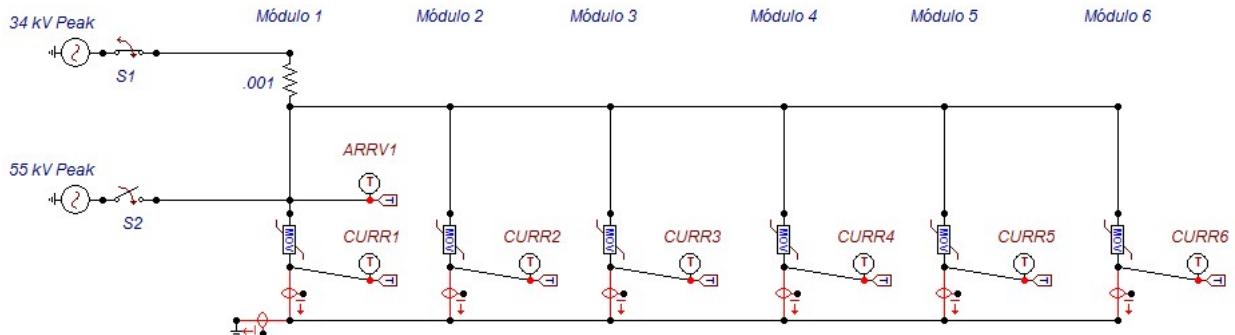
A energia térmica específica dissipada no para-raios atingiu 13,76 kJ/kV de U_R , aproximadamente 35% de sua capacidade máxima, portanto adequadamente dimensionada.

Antes da construção do para-raios foram necessárias medições de características elétricas de rotina mais elaboradas durante a fabricação pela Balestro dos varistores de ZnO, com um procedimento de

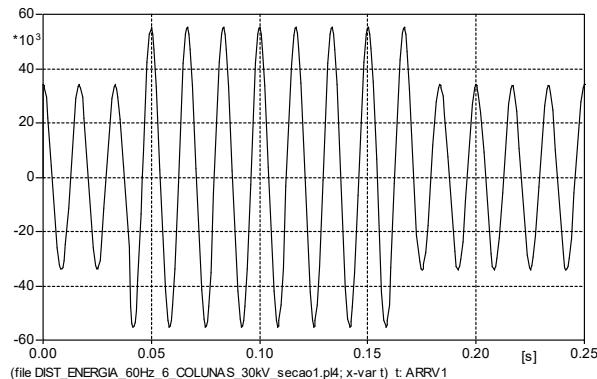
caracterização e separação estatístico, apoiado em simulações no ATP-Draw [8] para garantir que o desequilíbrio de corrente e energia entre colunas atendesse a assimetria máxima de projeto de 10%.

O para-raios protótipo possui mais de 1000 varistores em sua montagem, de modo que o procedimento acima de refinamento de valores exigiu muito cuidado, assim como muita atenção durante a montagem dos 132 módulos de para-raios que foram combinados nos arranjos série/paralelo nas 9 seções elétricas visíveis nas imagens acima.

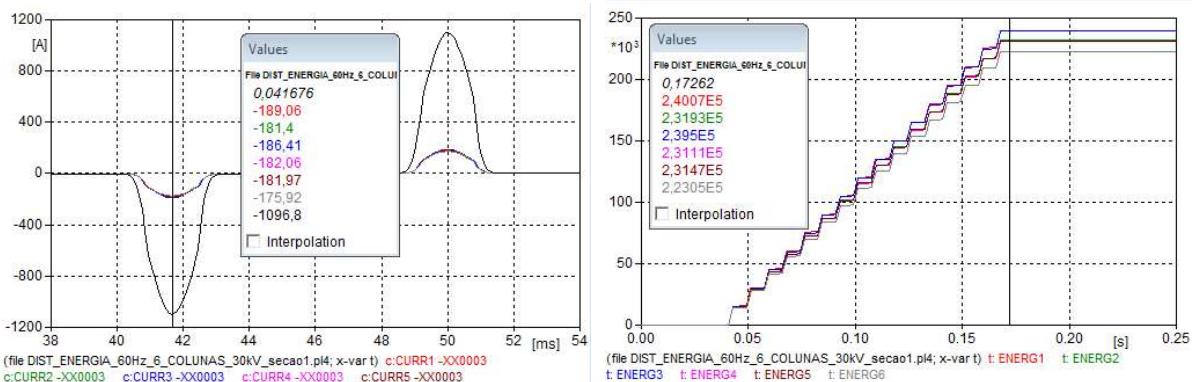
Estudos matemáticos implementados no ATP-Draw mostraram uma distribuição ainda melhor do que aquela definida como objetivo, como ilustrado no exemplo das figuras abaixo. Nesta simulação avaliou-se o desempenho elétrico de 6 seções de $U_R = 30 \text{ kV}$ em paralelo, com os valores elétricos reais dos varistores como fabricados, para uma dada situação de sobretensão transitória:



Círculo da modelagem implementado no ATP-Draw



Tensão aplicada aos módulos (1,3 p.u.)



Correntes de crista e energias dissipadas durante a sobretensão em cada seção (coluna)

A tabela abaixo apresenta de forma numérica resumida os resultados relevantes desta simulação, apontando uma assimetria máxima de 3,77% para o caso simulado.

Módulo	1	2	3	4	5	6
Corrente (Apk)	189,06	181,4	186,41	182,06	181,97	175,92
Assimetria sobre média (%)	3,42	-0,77	1,97	-0,41	-0,46	-3,77
Energia (J)	240070	231930	239500	231110	231470	223050
Porcentagem da máxima (%)	100,03	96,64	99,79	96,30	96,45	92,94
Σ Energia (J)	240070	472000	711500	942610	1174080	1397130

Nesta simulação de seis módulos conectados em paralelo de $U_R = 30$ kV, construídos a partir dos varistores classificados e selecionados para a construção do para raios protótipo, é possível observar uma melhor simetria entre as correntes, dentro dos valores objetivo de desvio, em verdade no caso destes módulos superando em muito o resultado objetivo do projeto (abaixo de 5%). Desta forma observamos que com esta menor dispersão a energia máxima injetada nestes seis módulos em paralelo atingiria 1397,1 kJ, assim equivalendo a 46,6 kJ/kV de U_R , bem acima do valor objetivo de 39 kJ/kV e muito próxima da máxima energia de seis módulos idênticos em paralelo (48 kJ/kV).

Concluindo essa seção, as imagens abaixo mostram a complexidade da montagem inicial de algo nunca efetuado antes no Brasil, as 132 seções de para-raios, bases intermediárias, anéis etc., custaram 3 dias de trabalho, o para-raios atingiu 11 metros de altura e um peso total de mais de 3000 kg:



Testes elétricos no CEPEL – RJ

Para a validação dos estudos acima, alguns ensaios elétricos foram realizados no CEPEL, num trabalho pioneiro no Brasil, e uma concordância muito boa entre os valores de ensaios de rotina e simulações foi finalmente verificada quando confrontada com os resultados medidos.



Arranjo para os ensaios do para-raios UAT em frequência industrial no CEPEL

O trabalho foi igualmente complexo, com algumas dificuldades motivadas pelo ineditismo. Até mesmo a simples medição da tensão de referência do para-raios custou muitas horas de trabalho. Os ensaios que foram possíveis na janela de tempo disponível (3 semanas) foram:

- Caracterização do para raios em frequência industrial (tensão versus corrente, potência dissipada) até a U_C (662 kVef);
- Medição da tensão de referência para $I_{ref} = 24 \text{ mApk}$;
- Medição da tensão residual para impulso de corrente 8/20 μs em uma seção elétrica do para raios (U_R seção = 90 kVef);
- Medição da distribuição de corrente de impulso em uma seção elétrica do para raios (8/20 μs , U_R seção = 90 kVef);
- Verificação da formação de efeito corona nas partes metálicas.

Havia a pretensão de se realizar também os ensaios de medição do nível de descargas parciais e de tensão de radiointerferência, porém não foi possível pelo fato dos valores de tensão de ensaio superar os limites do AT-1 para tais ensaios.

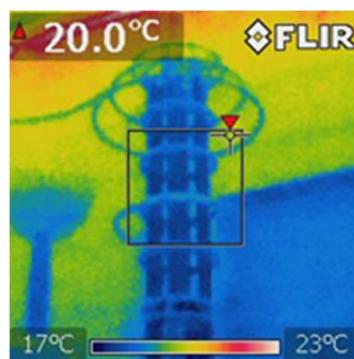


Imagen térmica do para-raios durante a realização do ensaio de Corona Visual com 700 kVef

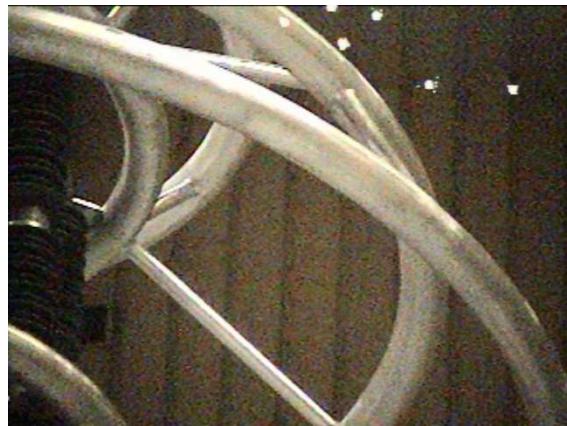


Imagen da câmera de detecção de corona do CEPEL

Dentro todos os ensaios realizados, destacamos neste trabalho um que mereceu uma maior atenção: o ensaio de tensão residual e de verificação da distribuição de corrente entre colunas do para-raios.

A importância em realizar em especial este ensaio vem de encontro com a necessidade em investigar o tema da assimetria entre as colunas no quesito distribuição das correntes de surto/correntes temporárias em regime de sobretensão, pois disso depende o sucesso no compartilhamento da energia e das cargas impostas ao para-raios nas condições de operação do sistema estudadas.

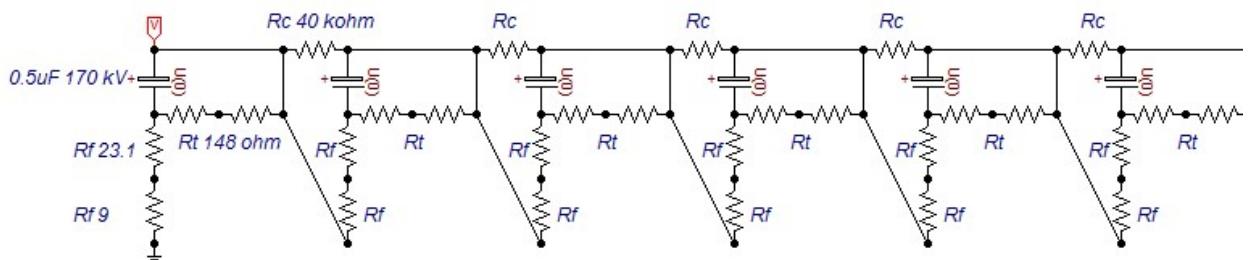
Ocorre que um gerador de impulsos de corrente capaz de aplicar correntes de surto adequadas no nível de tensão nominal de para-raios deste projeto não estava disponível, nem na Balestro, nem no CEPEL. O laboratório AT-1 do CEPEL tem, no entanto, um gerador de impulsos de tensão Haefely com uma quantidade bastante adequada de energia por estágio.

Analizando geradores de impulsos de corrente atualmente disponíveis nos portfólios dos fabricantes destes equipamentos, nos ocorreu a ideia de adaptar o gerador de impulsos de tensão do CEPEL em um gerador de impulsos de corrente com circuito de Marx (múltiplos estágios).

Mais uma vez nos valemos do ATP-Draw, agora para simular o ajuste no gerador do CEPEL, com a necessária substituição dos resistores de frente do gerador de tensão por bobinas de indutância cautelosamente calculadas, desenhadas e confeccionadas seguindo as expressões de Nagaoka [9], mais clássico do que isso impossível.

A figura abaixo é uma representação (parcial) do circuito original do gerador, em sua versão para impulsos de tensão atmosféricos 1,2/50 μ s:

GERADOR DE IMPULSOS CEPEL - AT1
Configuração usual para impulso de tensão
com 12 estágios em operação e carga "baixa"
(em verdade neste caso a carga é apenas o divisor)



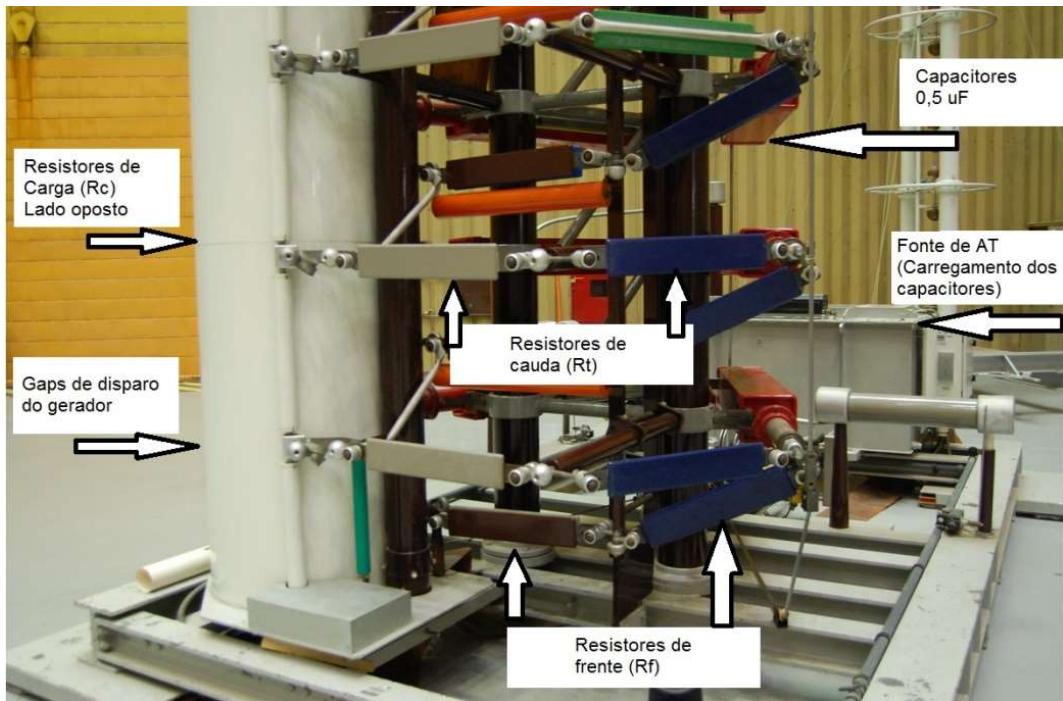
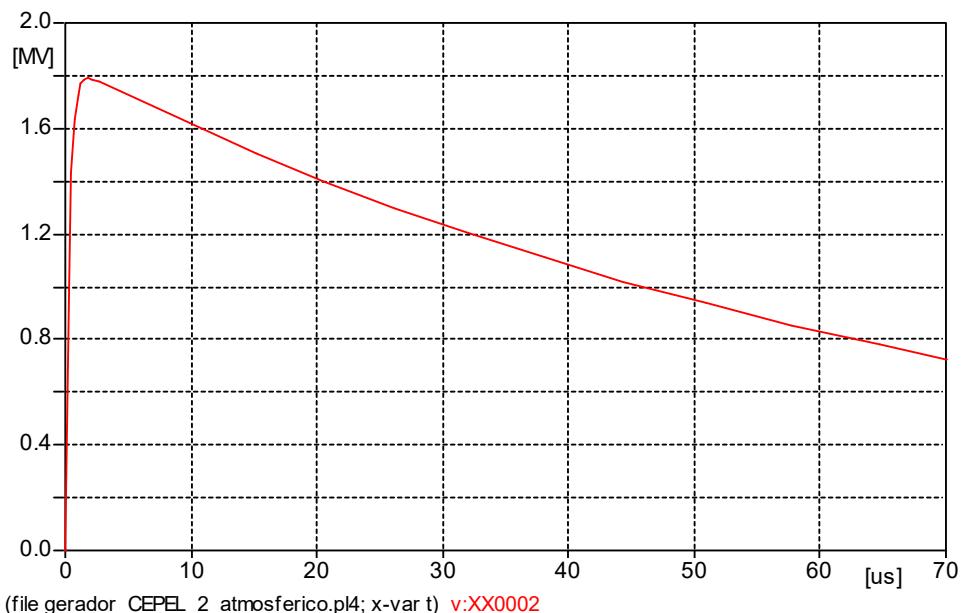


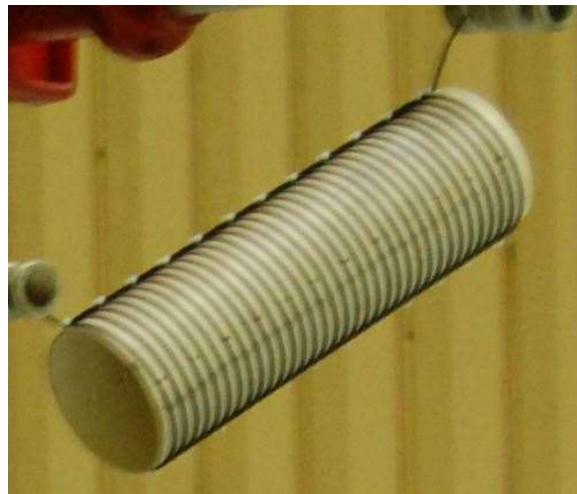
Imagen dos três primeiros estágios do gerador de impulsos do CEPEL e seus componentes usuais



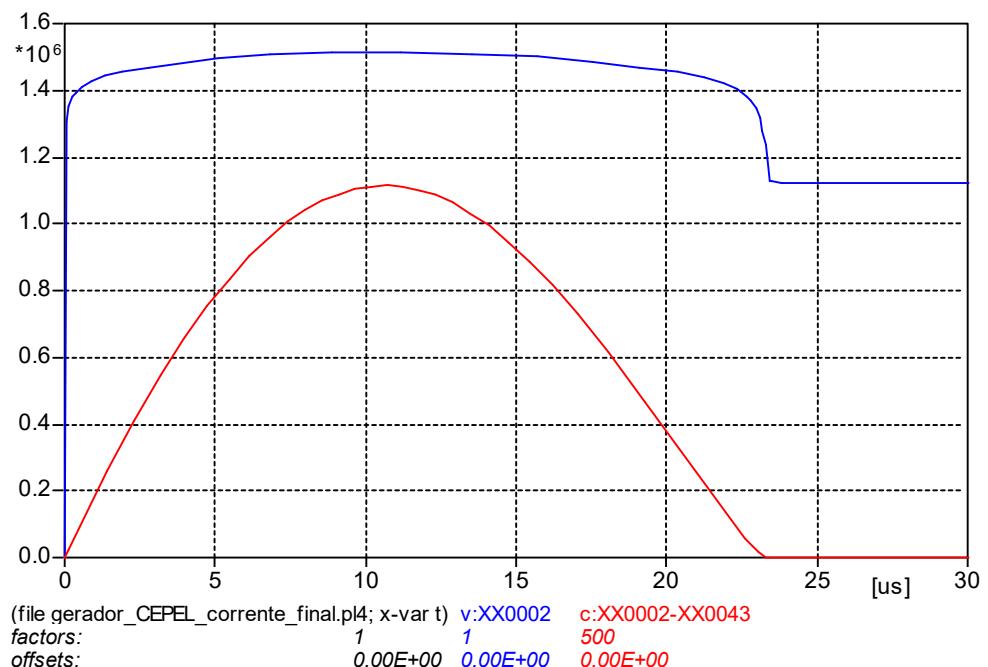
Forma de onda do impulso de tensão atmosférico obtida com uma versão de 12 estágios do gerador e
Ucarga = 170 kV, rendimento de 87,7%

A fim de transformar o gerador para impulsos de corrente de descarga atmosférica com forma de onda 8/20 μ s, os resistores de frente foram substituídos por bobinas de indutância = 50 μ H, confeccionadas conforme foto abaixo. Estas bobinas foram inseridas no modelo no ATP em substituição aos resistores, resultando em uma forma de onda 8/20 μ s dentro dos limites de tolerância especificados em Norma [6].

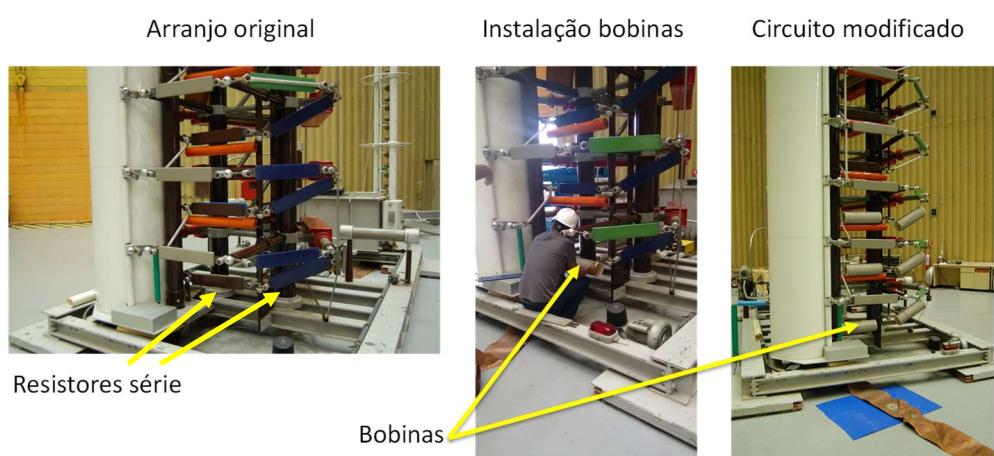
O oscilograma seguinte mostra um impulso de 2229 Apk aplicado no para-raios completo, e ilustra uma tensão residual de 1514 kVpk, valores apenas simulados no ATP-Draw.



Indutor de 50 uH



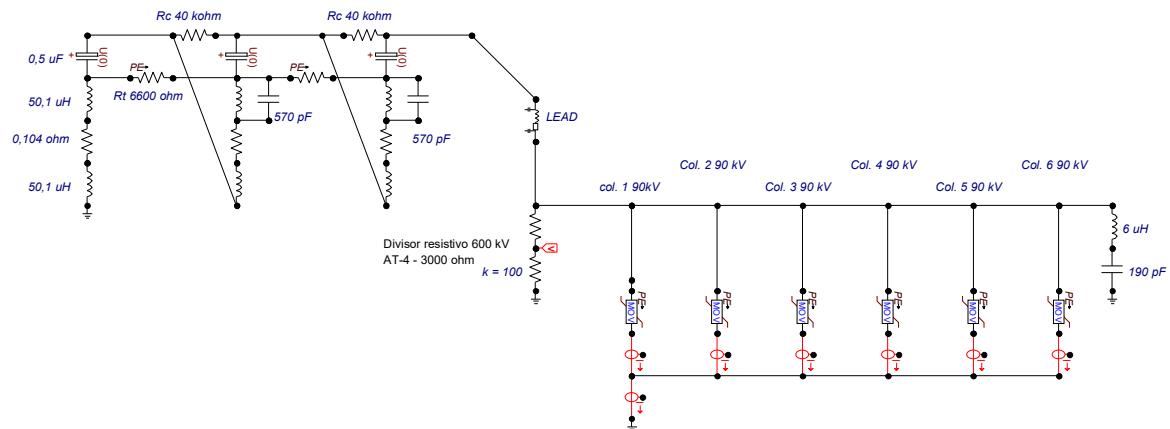
Impulso de corrente simulado, aplicação de $I_p = 2229$ A no para-raios completo



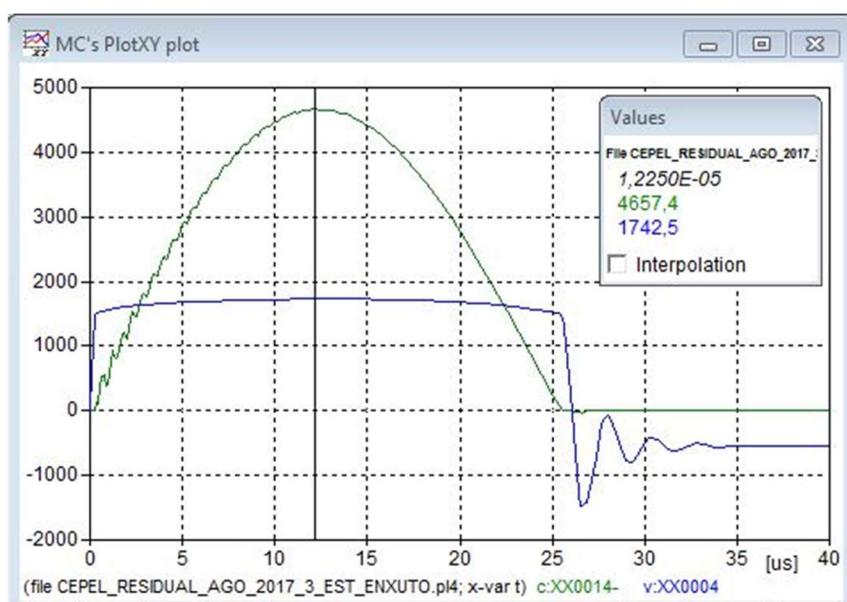
Por conta da dificuldade em se verificar todas as seções e/ou o para-raios completo, pelos recursos disponíveis e a limitação de tempo, focamos o trabalho na seção elétrica inferior do para-raios. Esta seção é composta de 3 módulos de tensão nominal $U_R = 30 \text{ kV}$ em série, 6 colunas em paralelo. As simulações acima foram utilizadas para apresentar aos técnicos do CEPEL a viabilidade em realizar estas alterações, e enviamos ao CEPEL 12 bobinas como as mostradas acima para os testes.

Durante a evolução dos trabalhos foram implementadas melhorias ao modelo, inserindo elementos adicionais efetivamente encontrados no circuito de ensaios, como a impedância complexa do circuito de descarga e do sistema de medição, a fim de aumentar a exatidão e inserir nas simulações os efeitos destas componentes. A partir da definição do método de trabalho, após a concordância dos técnicos do CEPEL, as modelagens daqui por diante sempre consideraram a seção elétrica de $U_R = 90 \text{ kV}$.

Vale lembrar que os valores elétricos adotados no elemento MOV92 no ATP-Draw foram sempre aqueles oriundos do trabalho de testes de rotina e classificação efetuado na Balestro.

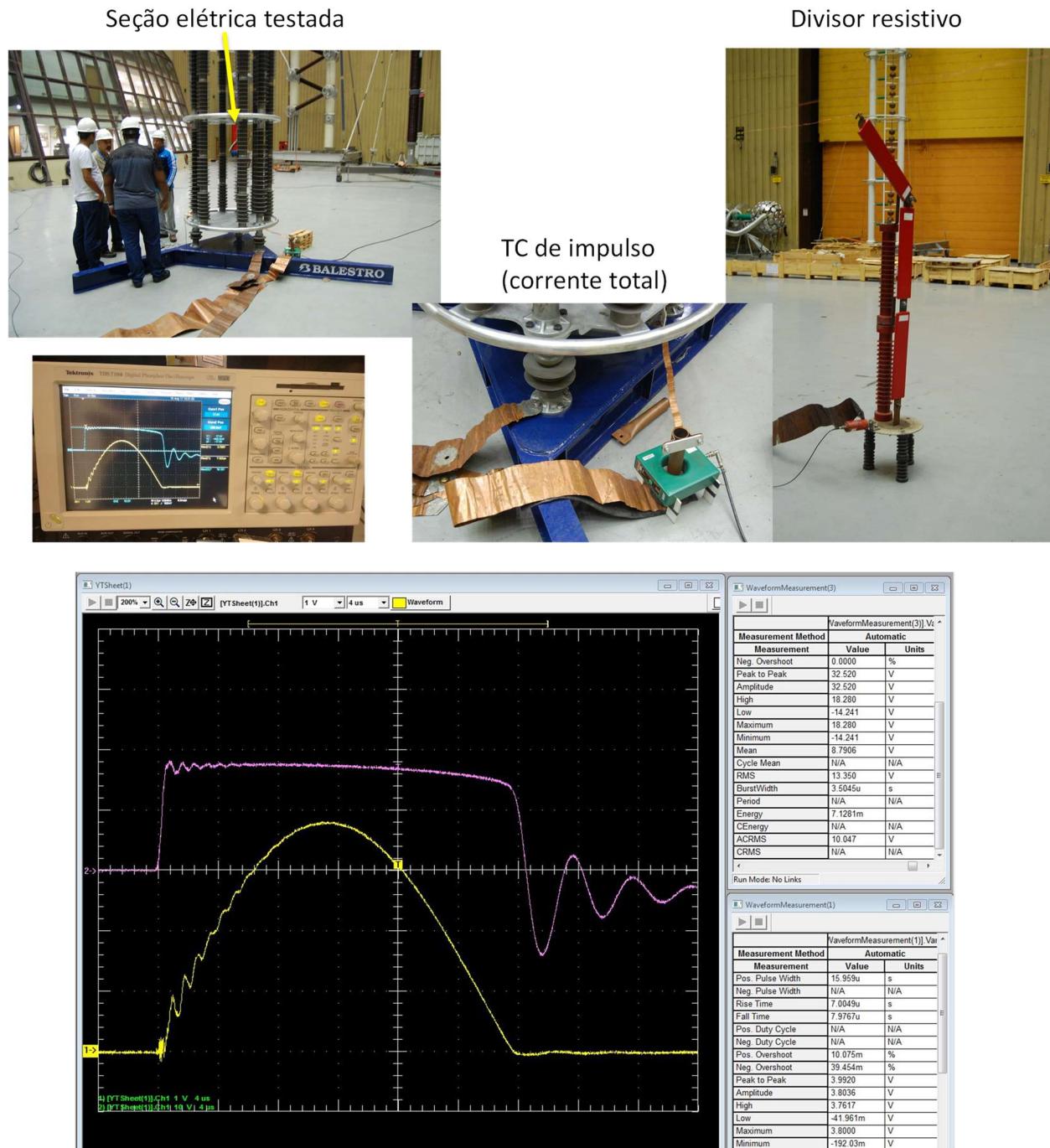


Circuito implementado no ATP-Draw com melhorias



Simulação da tensão residual da seção completa para uma corrente total fluindo pela mesma de 4,66 kApk – Tensão residual obtida na simulação = 174,3 kVpk

A imagem abaixo mostra detalhes da execução real do simulado acima, mostrando os elementos de medição utilizados, enquanto o oscilograma seguinte é a aquisição do impulso de corrente total e da tensão residual da seção de $U_R = 90$ kV:



Impulso de corrente de 4,63 kApk forma de onda 8,8/19,8 μ s aplicado na seção elétrica de $U_R = 90$ kV, tensão residual total medida = 174,8 kVpk

Observamos um desvio entre os valores simulados e medidos bastante pequeno (< 0,5%), em verdade inferior às incertezas de medição envolvidas em ensaios de alta tensão, como definidos na IEC 60060-1 [10].

Finalmente foi verificada a distribuição de corrente entre as colunas, realizando-se a medição de duas em duas por razão da quantidade de TC's de impulso Pearson disponíveis, foi utilizado sempre um deles na corrente total, e outros dois a cada duas colunas, alternando entre colunas.

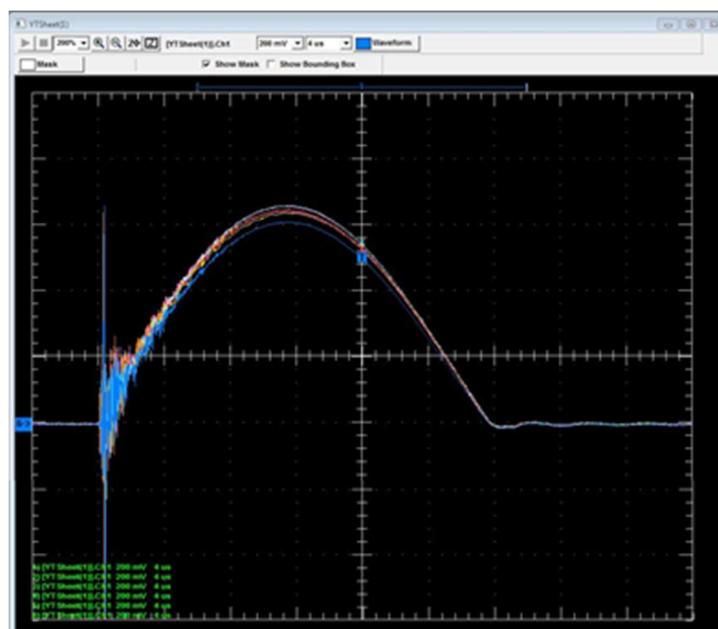
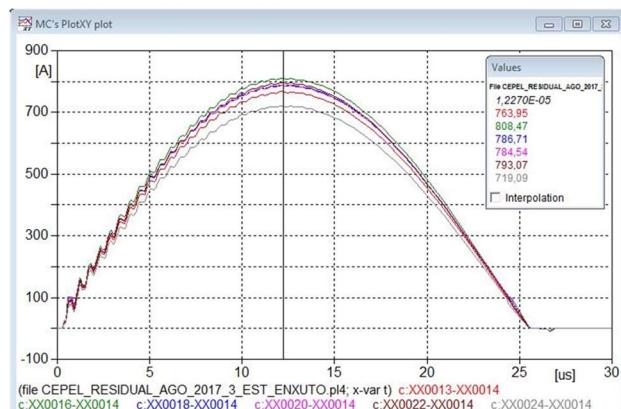
Aqui houveram maiores diferenças entre os valores simulados x medidos, porém neste caso favoráveis, i.e., o desequilíbrio entre as colunas foi inferior aos valores simulados. Observa-se também uma concordância muito boa entre os oscilogramas simulado x medido:

Valores de corrente por coluna
Simulados no ATP-Draw

Ip média = 776,0 Apk

Maiores desvios da média
= 4,2% e -7,3%

Ip total = 4,65 kApk



Oscilograma das correntes em cada uma das 6 seções (medição CEPEL)

Coluna do para-raios	I total kApk	I coluna Apk	I média Apk	Desvio %
1	4,68	782,34		0,10
2	4,68	802,56		2,69
3	4,68	787,20		0,73
4	4,68	766,10		-1,97
5	4,72	806,70		3,22
6	4,72	744,20		-4,78

Maiores desvios

Resultados da medições efetuadas nos ensaios no CEPEL

Conclusão

Este trabalho apresentou de modo sintético as ações desenvolvidas dentro do projeto de P&D “Transmissão em Ultra Alta Tensão em Corrente Alternada – Pesquisa Aplicada no Sistema Elétrico Brasileiro” por nossa empresa, para demonstrar a viabilidade e o domínio tecnológico necessário a fabricação de equipamentos para um possível sistema de transmissão em corrente alternada de $U_N = 1000 \text{ kVef}$ no Sistema Interligado Brasileiro (SIN).

O trabalho completo do P&D foi sintetizado e tornado público no livro referenciado em [1].

Existe know-how nacional para desenvolver todas as etapas do projeto, e também a disponibilidade dos demais equipamentos necessários no mercado internacional. Existe também a expertise dos fabricantes das máquinas das subestações, dentre os renomados fabricantes de transformadores, com possibilidade desta fabricação igualmente no Brasil.

Há também já hoje a realidade de semelhantes sistemas implantados na China e em operação.

O projeto apontou para a viabilidade deste sistema, que pode ser um importante reforço para o corredor de transmissão em formação NE – SE, lembrando que a capacidade de geração das fontes alternativas na região Nordeste cresce a passos vertiginosos nestes últimos anos.

A transmissão em UAT CA possui maior “capilaridade” que no HVDC, o que pode ser decisivamente favorável numa análise de viabilidade. O tema foi levado pelos coordenadores ao conhecimento do MME, para possível encaminhamento de estudo na EPE.

Gostaríamos de agradecer em particular ao pessoal da Eletronorte, na figura do colega Geraldo Nicola, ao colega José Antonio Jardini (ITAE) e ao Sergio de Oliveira Frontin (FDTE) pela grande oportunidade que foi para nós e para a Balestro a participação neste projeto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Projeto de P&D ANEEL “Transmissão em Ultra Alta Tensão em Corrente Alternada - Pesquisa Aplicada no Sistema Elétrico Brasileiro” - Jose Antonio Jardini, Sergio de Oliveira Frontin, Geraldo Luiz Costa Nicola, John Francis Graham, Wang Yuanhang, Liu Guijun (organizadores), et all, – Brasilia – Editora Casa 73, 2018 – ISBN: 978-85-88041-14-1
- [2] Bao-shan Wang; Shao-wu Wang; Yi Xiong; Xiao-ning Wang; Lin Tang and Zhong-qiu Zuo; The development of the UHV a.c. arresters – from State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China and State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China – European Trans. Electr. Power 2012; 22:94 – 107
- [3] R. N. Nayak; M. C. Bhatnagar; B. N. De. Bhowmick; R. K. Tyagi: 1200 kV Transmission System and Status of Development of Substation Equipment/ Transmission Line Material in India – Power Grid Corporation of India Limited – India – IEC/CIGRÉ Second International Symposium on Standards for Ultra High Voltage Transmission, 2009, New Delhi, India.
- [4] Norma IEC 60071-1:2019 – Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules
- [5] Norma IEC 60099-4 – Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems – Editions 2.2 (2009) and 3.0 (2014) – both cited on texts.
- [6] Norma IEC 60099-5:2018 – Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations
- [7] B. Richter, M. de Nigris, V. Hinrichsen, on behalf of CIGRÉ WG A3.17, CIGRÉ WG A3.21 and IEC TC 37 MT4: MO surge arresters for systems above 550 kV – Experience and challenges for

- the future – IEC/CIGRÉ UHV First International Symposium on Standards for Ultra High Voltage Transmission, 2007, Beijing, China
- [8] Høidalen, H. K. (1994-2015) ATPDraw- Graphical Preprocessor to ATP. Windows version – NTNU/SINTEF, Norway, version 6.1p1.
 - [9] NAGAOKA, Jour. Coil. Sci. Tokyo 27, 18-33, art. 6 (1909); B. of S. Sci. Paper 169, 64.
 - [10] Norma IEC 60060-1:2010 – High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements