

P&D Medição Impedância SLTE | SMTE – CESI



Rio de Janeiro, 05/06/2023

PALESTRANTES



Francesco Rizzo

Diretor CESI do Brasil Consultoria



Antonio Ardito

Engenheiro Eletricista
especialista em modelagem



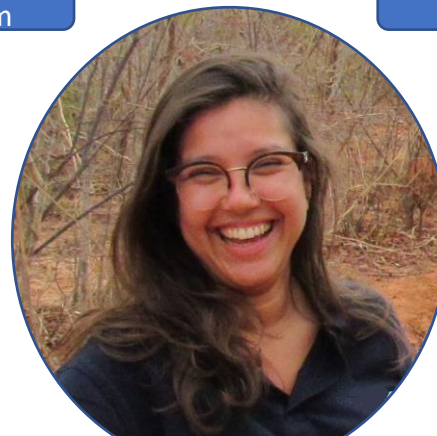
Guilherme Ferraz

CEO HVEX



Artur Hoff

Gerente de Engenharia SLTE



Beatriz Vieira

Engenheira Eletricista



Antonio Delgado

Pesquisador especialista em
projetos P&D

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

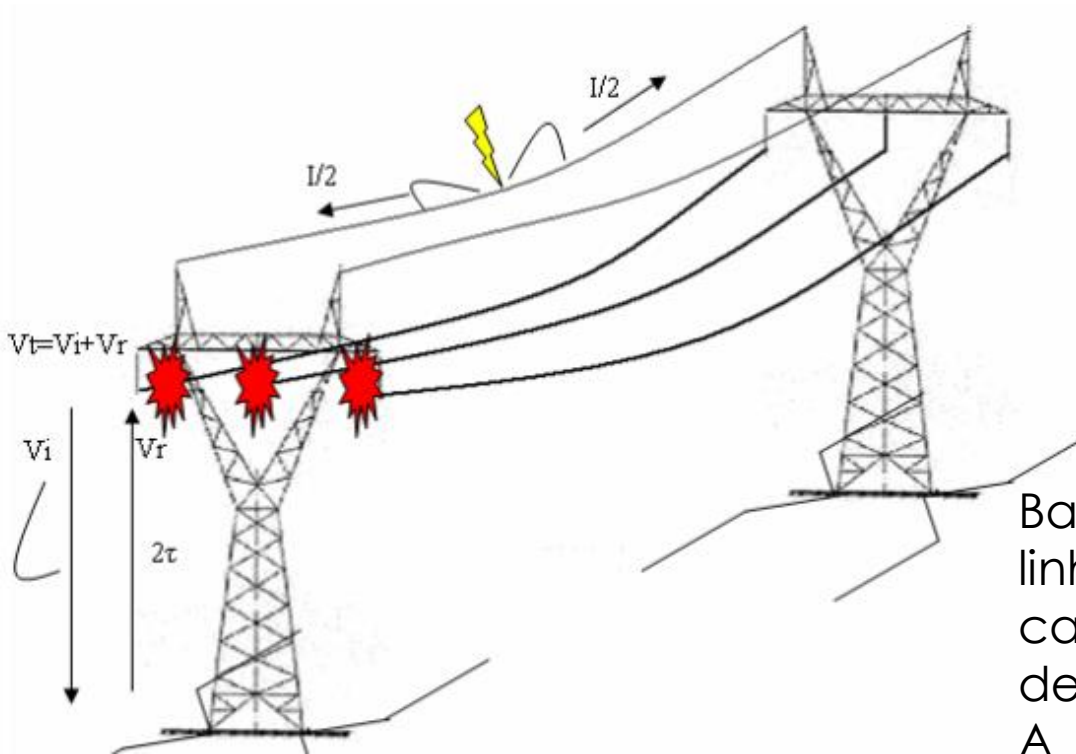
➤ Resultados

➤ Conclusões

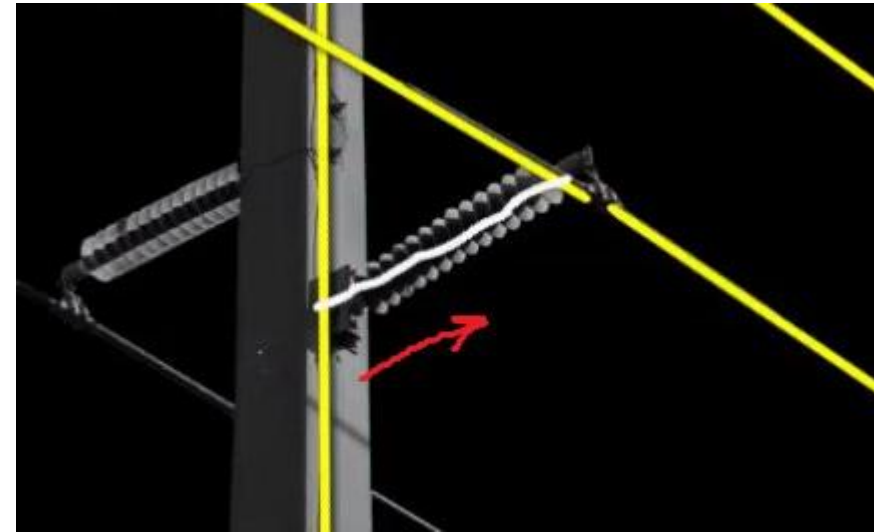
- Descrição do Problema
- Escopo do Projeto
- Requisitos ANEEL
- Desenvolvimento do Projeto
- Resultados
- Conclusões

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

- A impedância de aterramento das torres é de suma importância no desempenho contra descargas atmosféricas das linhas de transmissão aéreas. Ela desempenha um papel fundamental no fenômeno de backflashover, quando um raio atinge os cabos de aterramento ou o topo das torres e a corrente de impulso de descarga atmosférica flui em direção à Terra.



Fonte: PPGEE UFMG



Backflashover é a ruptura do isolamento de uma linha provocada pela sobretensão resultante na cadeia de isoladores decorrente da incidência direta de descargas no cabo de blindagem ou na torre. A ionização do ar em torno do isolador (secondary BackFlashover) pode provocar trip da linha.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

- Particularmente, na área de concessão da Santa Lucia/Santa Maria se evidenciam as condições do solo, que possuem como característica alta resistência, e afetam negativamente a confiabilidade de serviço das linhas.
- Essa condição reflete a dificuldade que os projetistas enfrentam em representar adequadamente os sistemas de proteção contra os distúrbios causados pelas descargas atmosféricas, devido à falta de dados confiáveis sobre as características da impedância de aterramento das torres de linhas de transmissão em função da frequência e das soluções de aterramento adotadas (diferentes tipos de eletrodos e dimensionamento).
- O mau dimensionamento dos sistemas de aterramento pode resultar em perdas sérias para a transmissora e para toda a sociedade, devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

- Esta pesquisa foi direcionada para obter um modelo de aterramento da torre que seja adequado para simular o desempenho da linha real e verificar o efeito das recomendações de melhoria do desempenho às descargas atmosféricas, reduzindo a probabilidade de interrupção ao serviço da linha.
- Este modelo é baseado em testes de campo e medição do comportamento da impedância de aterramento de torres específicas, tanto torres autoportantes quanto torres estaiadas de linhas de 500 kV.
- Tal teste é concebido para ser feito com a linha em operação normal.

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

➤ Resultados

➤ Conclusões

ESCOPO DO PROJETO

- No entanto, nesta pesquisa, o escopo é ter:
 - um conjunto de ferramentas e uma configuração de teste e medição, além de um procedimento para possíveis medições extensas em campo e
 - uma metodologia/procedimento simples e ferramenta SW para avaliar o desempenho às descargas da torre específica e do comprimento da linha associada.
- O conjunto de ferramentas para a campanha de teste e medição é adequado para ser facilmente levado à campo e é constituído pelas ferramentas e instrumentos de medição mas também por eletrodos auxiliares e cabos devidamente isolados da terra.
- O teste deve ser realizado feito em duas etapas, com base em:
 - um impulso de alta corrente injetado no aterramento da torre (tanto autoportante quanto estaiada) em sua operação normal, registrando formas de onda de tensão e corrente.
 - uma varredura de frequência (como uma análise de resposta de frequência) aplicada aos mesmos eletrodos para obter a impedância de aterramento versus frequência, mas com valores de pico muito mais baixos de tensão e correntes.

ESCOPO DO PROJETO

- Os resultados da medição foram então elaborados por uma ferramenta matemática que fornece a impedância do eletrodo de aterramento da torre versus frequência e foi definido um modelo para a impedância de aterramento a ser aplicado no simulador de transientes eletromagnéticos no domínio do tempo, ATPDraw.
- Duas abordagens básicas de modelagem foram analisadas e desenvolvidas na pesquisa:
 - um primeiro baseado no conhecimento do tipo/forma do eletrodo de aterramento, que se supõe ser um “contrapeso” ou um “conjunto de contrapesos”, cada um constituído por um cabo de aterramento colocado horizontalmente no solo a uma pequena profundidade (da ordem de um metro)
 - um segundo baseado apenas nos resultados da medição e um melhor ajuste que fornece um “objeto” ATPDraw adequado para representar a admitância versus frequência (complexo, ou seja, módulo e ângulo de fase).
- A primeira abordagem permite considerar a ionização do solo devido as correntes de pico típicas do backflashover. Devido a questões de segurança durante as execuções em campo, não foi realizado medições com a ferramenta de impulso de alta corrente o que impediu a obtenção de picos de corrente injetados altos o suficiente para atingir a ionização (não linearidade da impedância de aterramento versus amplitude da corrente, como um efeito de “saturação”).

ESCOPO DO PROJETO

- Contudo, a segunda abordagem permite ficar do lado seguro (conservador) na avaliação das tensões de sobretensão causadas por backflashover. Esta abordagem (varredura de frequência e modelo ATPDraw) foi aplicada para simular o desempenho da linha aérea real em operação com as torres que foram testadas/medidas em campo.
- O efeito de duas disposições diferentes para melhorar o comportamento das torres e da linha foi verificado por simulação:
 - Uma primeira providência consiste em acrescentar contrapesos, semelhantes aos já instalados, mas dispostos ortogonalmente ao eixo da linha, enquanto os atuais contrapesos são dispostos paralelamente ao eixo (sob o vão da linha).
 - Uma segunda disposição consiste em aplicar um enchimento condutor adequado em torno dos presentes contrapesos.
- Os resultados da investigação são opostos para as duas torres examinadas, uma autoportante (241) e uma estaiada (237). As melhores soluções foram:
 - a aplicação do aterro da torre 241
 - a adição de dois contrapesos ortogonais ao eixo da linha para a torre 237
- A razão de tais resultados opostos não é conhecida, se eles dependem do arranjo diferente dos contrapesos dos dois tipos de torre, ou do tipo de solo.

ESCOPO DO PROJETO

- A execução dos testes e medições, conforme projetado aqui nesta pesquisa, é recomendada nas torres das linhas onde os eventos de backflashover (estimado a partir das estatísticas de ocorrência de disparo do relé de distância da linha de faltas transitórias com religamento bem-sucedido) são frequentes.
- As soluções concebidos e testados por simulação aqui são de dois tipos e eventualmente aplicados também em conjunto:
 - adicionando contrapesos, possivelmente colocados ortogonalmente ao eixo da linha
 - aplicação de um preenchimento condutivo (filler) em torno dos contrapesos existentes.
- Como recomendação, propomos executar novamente os testes e medições em campo além das simulações, após a aplicação das soluções recomendadas, para avaliar a eficácia no desempenho do aterramento das torres às descargas atmosféricas.
- Recomendamos também que seja realizado um estudo investigativo para avaliar se os resultados encontrados dependem de um arranjo diferente dos contrapesos ou se é uma questão relacionada ao tipo do solo.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Cronograma

Etapa		Cronograma																																																			
		2019			2020												2021												2022												2023												
FASE	Descrição	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5								
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º	13º	14º	15º	16º	17º	18º	19º	20º	21º	22º	23º	24º	25º	26º	27º	28º	29º	30º	31º	32º	33º	34º	35º	36º	37º	38º	39º	40º	41º	42º	43º	44º								
1	FASE 1: Metodologia de medição da impedância																																																				
1.1	Desenvolvimento do Estado da Arte do Projeto																																																				
1.2	Desenvolvimento da metodologia de medição da impedância																																																				
1.3	Seleção e compra dos equipamentos																																																				
1.4	Produção e entrega dos equipamentos																																																				
1.5	Entrega Relatório de ETAPA 1																																																				
2	FASE 2: Execução de medições em caso de linha em áreas com alta resistência do solo																																																				
2.1	Produção e entrega dos equipamentos																																																				
2.2	Testes dos equipamentos em fábrica																																																				
2.3	Desenvolvimento das metodologias de campo																																																				
2.4	Execução das atividades em campo - Campanha 1																																																				
2.5	Elaboração e entrega relatório de campo - Campanha 1																																																				
2.6	Reparos e entrega dos equipamentos																																																				
2.7	Execução das atividades em campo - Campanha 2																																																				
2.8	Elaboração e entrega relatório de campo - Campanha 2																																																				
3	FASE 3: Implementação e validação de modelo eletromagnéticos para o estudo do sistema de aterramento																																																				
3.1	Implementação e validação de modelo																																																				
3.2	Entrega relatório de fase 3																																																				
4	FASE 4: Workshop de disseminação																																																				
4.1	Submissão de artigo																																																				
4.2	Realização do Workshop de disseminação																																																				

AGENDA

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ **Requisitos ANEEL**

➤ Desenvolvimento do Projeto

➤ Resultados

➤ Conclusões

REQUISITOS ANEEL: Originalidade

➤ Projeto na fase de inovação: PA – Pesquisa Aplicada

Produto esperado do projeto:

- Metodologia ou técnica
- Protótipo
- Projeto demonstrativo (piloto)

➤ Conforme Manual PROP&D – ANEEL 2016 (5 quesitos)

4.1.1.7 O conceito final do projeto, decorrente da média da pontuação obtida, está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Conceito do projeto em função da média da pontuação obtida.

Média do Projeto (N)	Conceito do Projeto
$1,0 < N < 2,0$	Inadequado
$2,0 \leq N < 3,0$	Insuficiente
$3,0 \leq N < 3,5$	Aceitável
$3,5 \leq N < 4,5$	Bom
$4,5 \leq N \leq 5,0$	Excelente

REQUISITOS ANEEL: Originalidade

- **Ineditismo:** nas buscas realizadas (2 e 3/08/2019) nos Bancos de Patentes do INPI e do USPTO, no Banco de Projetos P&D/ANEEL, nos Bancos de Dissertações e Teses Acadêmicas CAPES, BDTD e Google Scholar, e nos artigos apresentados nos Seminários e Congressos do Setor Elétrico Nacional não foram encontrados trabalhos antecedentes aos objetivos do projeto.
- **Componentes de originalidade:** Produto - i) metodologia (medições e simulações) para realizar o projeto ótimo do sistema de aterramento de LTs de AT e AET; ii) especificação de kit de ferramentas para a medição da impedância de aterramento em torres de LTs – com injeção SFRA e ondas impulsivas; e iii) modelos do conjunto torre-eletrodo para estudos do impacto dos fenômenos atmosféricos em LTs, atendendo a NBRIEC60060-1 “Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão - Parte 1: Definições Gerais e Requisitos de Ensaio”.
- **Geração de Metodologia:** Técnica - metodologia desenvolvida com representação do sistema de aterramento dos conjuntos torre-eletrodos das LTs no SW ATPDraw da NTNU, Norway.
 - * Não foi produzida produções acadêmicas originais, incluindo teses de doutorado.

REQUISITOS ANEEL: Originalidade

- **Propriedade Industrial:** Registro de Patente – PI intitulada “Método e Processo para Medição e Modelagem da Impedância de Aterramento para o Projeto Ótimo dos Sistemas de Aterramento das Linhas de Alta e Extra Alta Tensão” dos inventores Francesco Rizzo, Beatriz Vieira, Artur Hoff e Antonio Ardito.
- **Produção Acadêmica:** Publicações classificadas na lista Qualis Periódicos como A1, A2 ou B1.
- **Conclusão:** nota 3,5 ou 4 (Bom)

Tabela 2 - Análise do critério Originalidade conforme as fases da cadeia de inovação.

Fase da Cadeia	Critério Originalidade
Pesquisa Básica Dirigida	Eliminatório caso inferior a 3
Pesquisa Aplicada	Eliminatório caso inferior a 3
Desenvolvimento Experimental	Eliminatório caso inferior a 3

REQUISITOS ANEEL: Aplicabilidade

- Real potencial de adoção e utilização dos resultados do projeto e a extensão do campo de ação em que o produto ou técnica é aplicável.
- **Extensão:** a metodologia obtida deverá ser utilizada pela empresa proponente SLTE e cooperada SMTE em suas LTs; poderá ser aplicável nas linhas de AT e EAT das empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.
- **Segmento:** geração, transmissão, distribuição.
- **Setor econômico:** aplicação além do setor elétrico, nos ramais de entrada de transmissão e sub-transmissão das Ucs dos subgrupos A1 (≥ 230 kV), A2 (88 kV a 138 kV) e A3 (69 kV).
- **Classe de consumo:** classes industriais, comerciais e rurais dos subgrupos A1 (≥ 230 kV), A2 (88 kV a 138 kV) e A3 (69 kV) conectadas as linhas de transmissão e de sub-transmissão..
- **Número de consumidores:** nas classes A1, A2 e A3 existem cerca de 12.000 UCs que estão diretamente conectados nas linhas de transmissão e sub-transmissão.
- **Potenciais usuários:** no SEN a metodologia poderá ser utilizada pelas 70 empresas transmissoras e pelas 131 distribuidoras e permissionárias de energia elétrica.

REQUISITOS ANEEL: Aplicabilidade

- Testes de funcionalidade.

Projeto Piloto nas instalações da SLTE (LT Jauru – Cuiabá) e posteriormente em simulações em SW nas instalações do CESI do Brasil.

- **Kit de Medição:** em duas Campanhas de Medição, a 1ª de 18 a 22/10/2021 e a 2ª de 6/6/2022 a 10/6/2022).
- **Metodologia de Medição para Obter Modelos do Conjunto Torre-eletrodo,** na 2ª Campanha.

REQUISITOS ANEEL: Relevância

- **Impactos Econômicos:**
- Ganhos de produtividade: redução dos custos operacionais das equipes de O&M
 - PR1: redução de homens-hora nas manutenções e operações das LTs; e
 - PR3: redução do tempo nas manutenções e operações das LTs (quando das falhas geradas pelas descargas atmosféricas).
- Ganhos de qualidade: LTs mais robustas frente às descargas atmosféricas
 - QF1: redução da duração e frequência das energias interrompidas, impactando positivamente nos Indicadores de Continuidade (DEF, FEC e TMA).
 - QF2: redução das Variações Transitórias de Curta Duração (VTCD) e outros distúrbios.
- Gestão de ativos: reduz a susceptibilidade das LTs frente às descargas atmosféricas
 - GAX: redução de gastos com redução da Parcela Variável - PV por menor indisponibilidade das LTs e dos gastos com infraestrutura de O&M às empresas que a adotarem.
- Outros:
 - OU: ganhos com royalties advindos da comercialização da metodologia para outras empresas transmissoras, geradoras e distribuidoras de energia elétrica.

REQUISITOS ANEEL: Relevância

➤ **Contribuições e Impactos Tecnológicos**

- Infraestrutura laboratorial: não houve.
- Propriedade intelectual: depósito de uma patente de invenção junto ao INPI.
- Capacitação profissional: não houve devido a curta duração do projeto previsto originalmente.
- Divulgação tecnológica: um artigo CITENEL e um artigo SNPTEE.

➤ **Impactos Socioambientais**

- ISA1 - Possibilidade de impactos ambientais (água, ar ou solo): **não aplicável**.
 - ISA2 – Possibilidade de diversificação da matriz energética: **não aplicável**.
 - ISA3 – Possibilidade de desenvolvimento de nova atividade socioeconômica (lazer, turismo, pesca, agricultura, etc.): **não aplicável**.
 - ISA4 – Possibilidade de impactos na segurança ou na qualidade de vida da comunidade: **sim**.
- As reduções das interrupções provocam:
- Impacto Social – Maior segurança energética da sociedade
 - Impacto Econômico – reduz custos de O&M e PV mitigando as tarifas de transmissão a longo prazo

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

➤ Resultados

➤ Conclusões

Presença em LATAM

Operando em 2 países.....



Brazil

- .3 Projetos
- .Sta Lúcia, Sta Maria e LV II
- .230/500 kV
- .~700 km LTs
- .3 em operação .30-anos de concessão

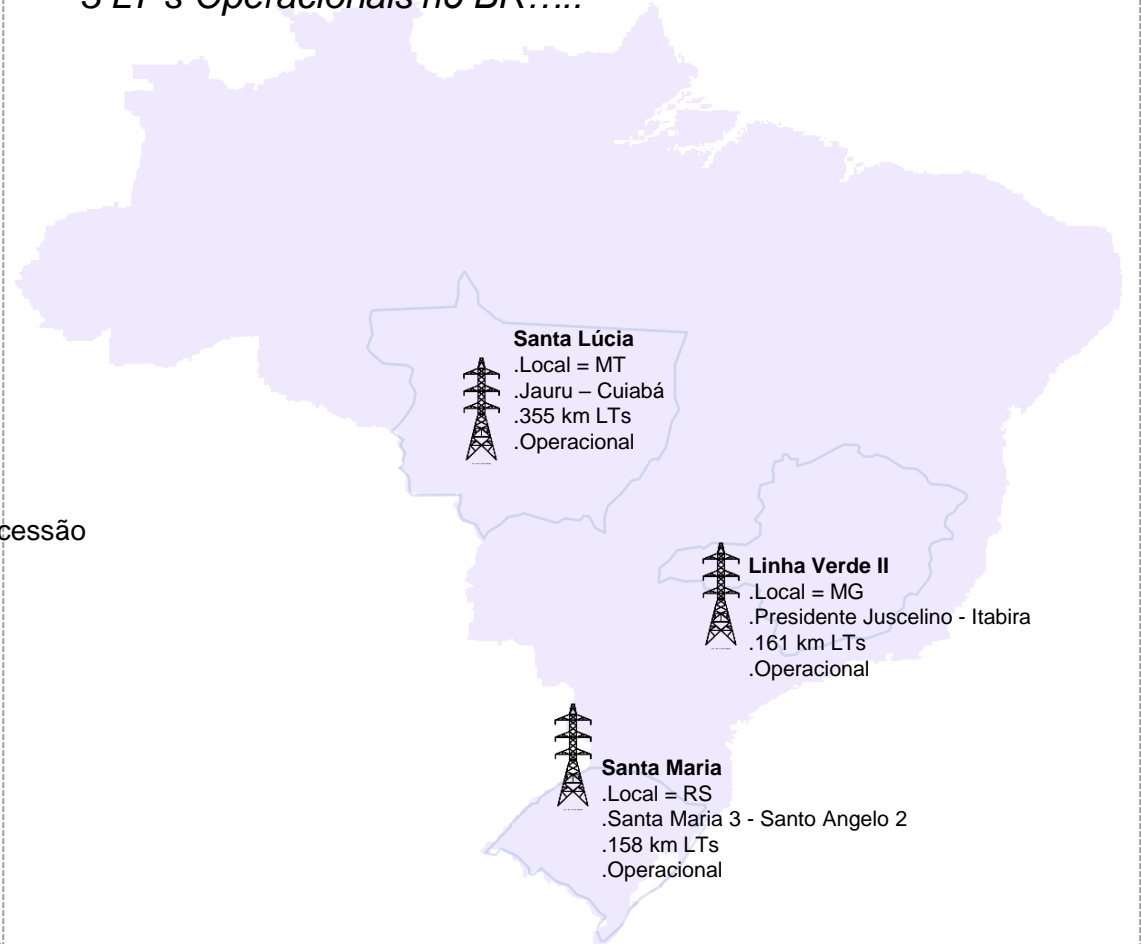


Uruguay

- .Melo – Tacuarembó
- .500 kV
- .213 km LTs
- .Em operação
- .30-anos de concessão

Portfólio no Brasil

3 LT's Operacionais no BR.....



Santa Lúcia

- .Local = MT
- .Jauru – Cuiabá
- .355 km LTs
- .Operacional



Linha Verde II

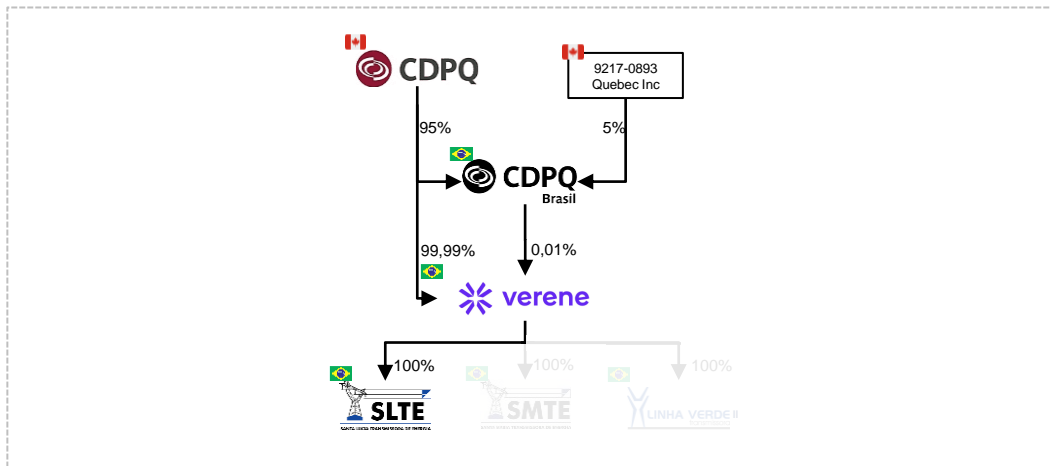
- .Local = MG
- .Presidente Juscelino - Itabira
- .161 km LTs
- .Operacional



Santa Maria

- .Local = RS
- .Santa Maria 3 - Santo Angelo 2
- .158 km LTs
- .Operacional

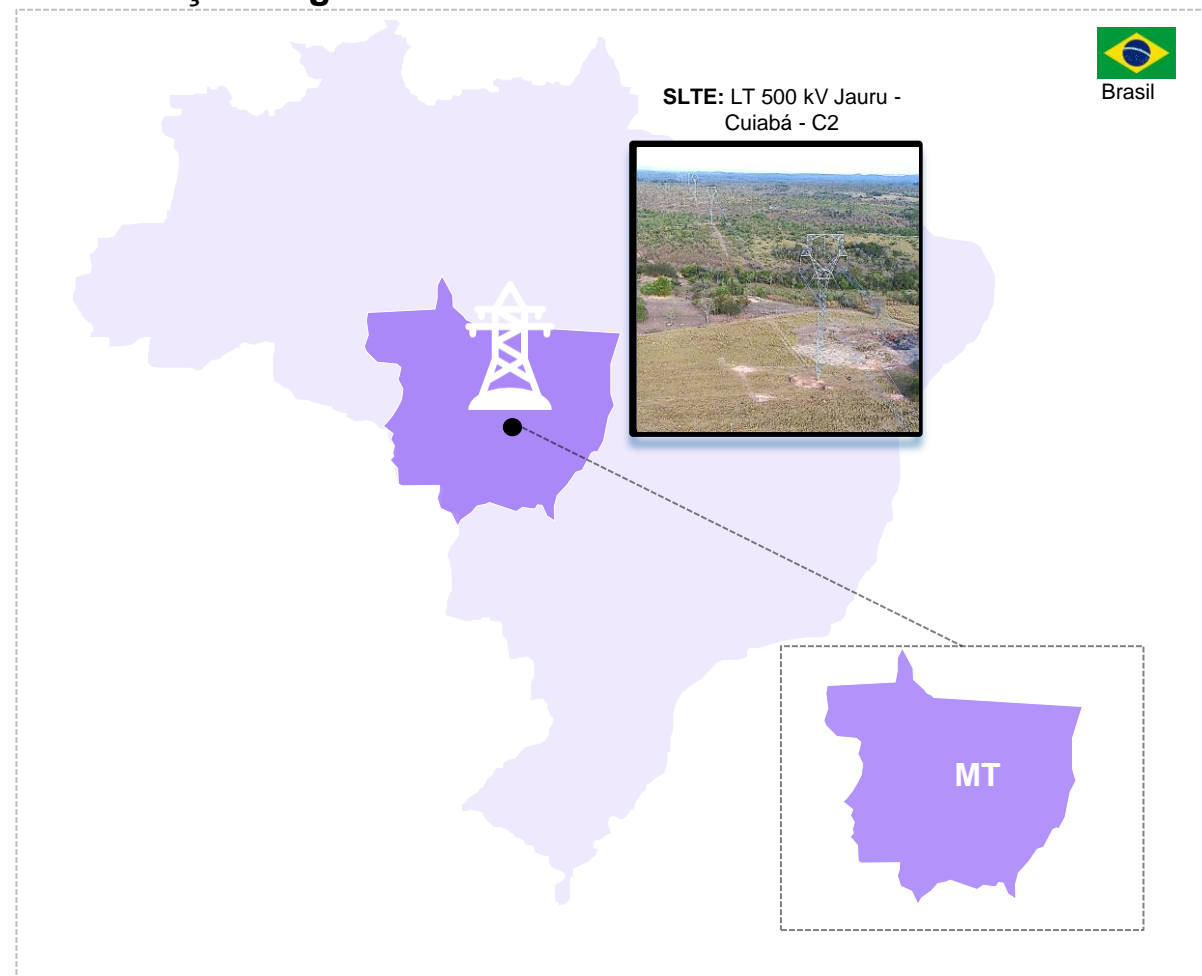
Estrutura Societária:



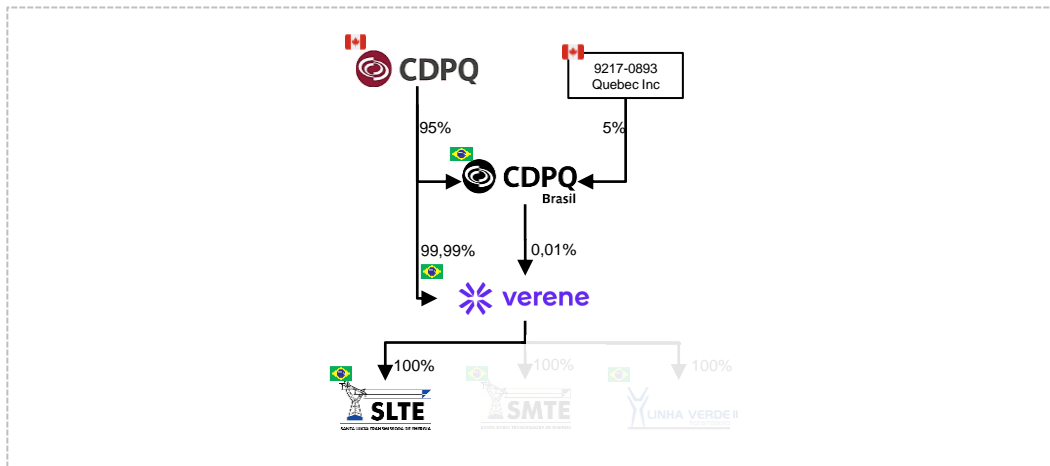
SLTE Principais Números:

- Local: MT
- Extensão: 355 km
- Objeto: LT 500 kV Jauru - Cuiabá - C2 (circuito simples)
- Reatores: 3 fases 45MVAR
- Em operação desde: Abr/2019
- Expiração do Contrato: 2046
- Número de Torres: 718

Presença Geográfica:



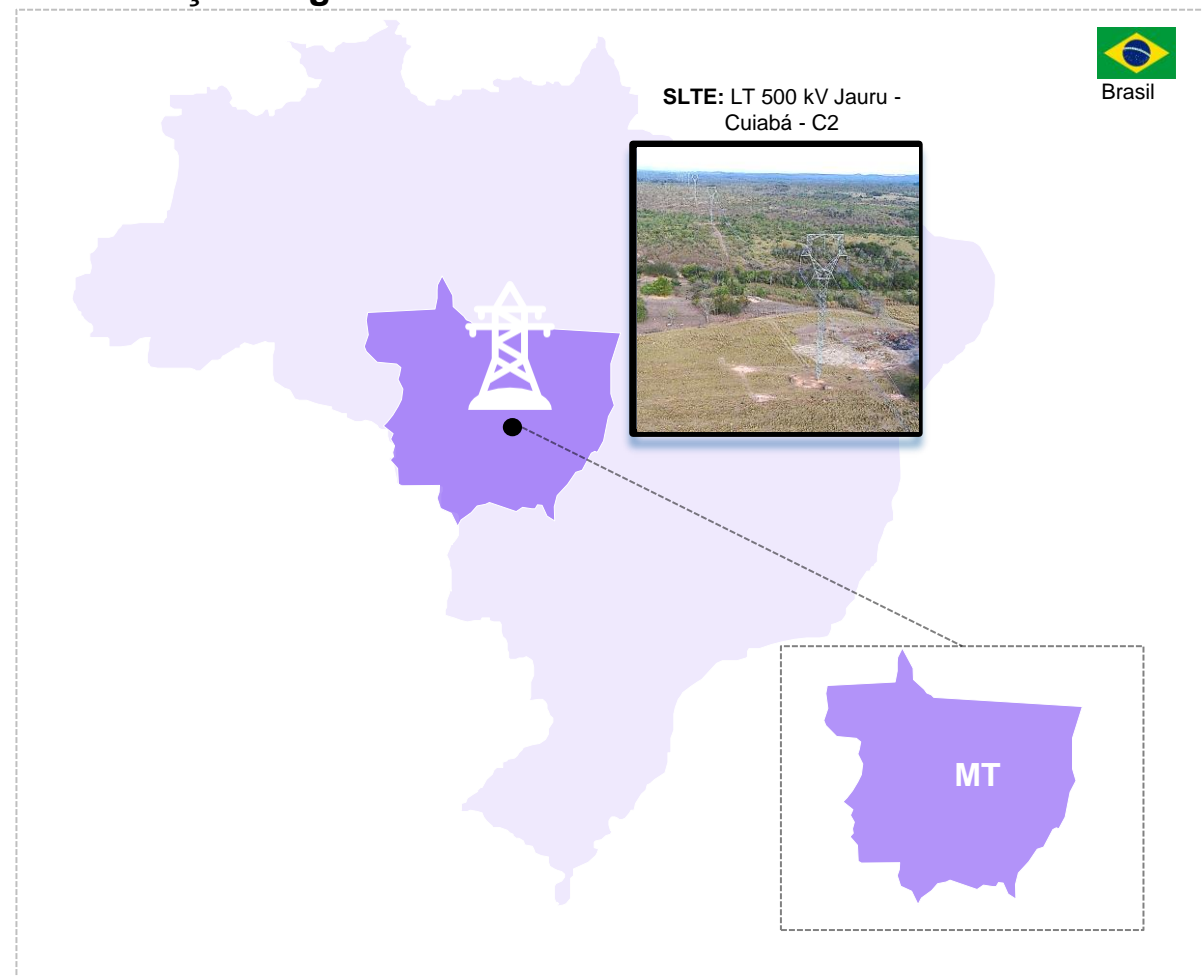
Estrutura Societária:



SLTE Principais Números:

- Local: MT
- Extensão: 355 km
- Objeto: LT 500 kV Jauru - Cuiabá - C2 (circuito simples)
- Reatores: 3 fases 45MVAR
- Em operação desde: Abr/2019
- Expiração do Contrato: 2046
- Número de Torres: 718

Presença Geográfica:





BRASIL - SLTE	SLTE
Tensão da Linha	500 kV
Km linha construída	354,98 km
Nº de cabos/feixe (fase)	3
Nº total de cabos condutores usados	3.354,39 km
Número de torres	718
Número de torres Autoportantes	181
Número de torres Estaiadas	537
Numero de torres de Ancoragem	47
Número de Rios atravessados	2 (Rio Paraguai e Rio Cuiabá) navegáveis
Entrada em Operação	30/4/19 23:59



BRASIL - SLTE	SMTE
Tensão da Linha	230 Kv
Km linha construída	160,28 km
Nº de cabos/feixe (fase)	2
Nº total de cabos condutores usados	325,82 km
Número de torres	322
Número de torres Autoportantes	71
Número de torres Estaiadas	247
Numero de torres de Ancoragem	18
Número de Rios atravessados	2 (Rio Toropi e Rio Ijuí) não navegáveis
Entrada em Operação	03-out-18

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

➤ Resultados

➤ Conclusões

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

➤ Resultados

➤ Conclusões

PROGRAMA DE TRABALHO: Desenvolvimento dos Equipamentos

➤ Os principais equipamentos selecionados para realizar esse estudo foram:

- Gerador de Impulso de Tensão e Corrente
- Gerador de Frequência

Ambos os equipamentos foram desenvolvidos Pela HVEX.



PROGRAMA DE TRABALHO: Desenvolvimento dos Equipamentos

Gerador de Impulso	Gerador de Frequência
1 (um) estágios de 100 kV, com capacitância 1 μ F e potência compatíveis a esse nível de tensão; Energia armazenada: 5kJ	um gerador de funções mais um circuito amplificador operacional
Tensão nominal do equipamento de -100 kV a 100 kV;	composto de 4 AMP-OP em cascata com oito sistemas paralelos, desenvolvido para aplicação em 100 Vpp e 10 Ap
Ciclo de 1 impulso a cada 120 segundos para tensão (1,2 x 50 μ s) e 1 impulso a cada 300 segundos para corrente (8x20 μ s);	osciloscópio 2 canais da Rohde & Schwarz, R&S RTB 2002
Dimensão Máxima: 0,8 x 0,8 x 1,4 m; ~200 kg	cabos coaxiais da Huber Suhner RG213 e conectores para campo
Capacitor de Surto, preparado para 100 kV	Shunt 6 Ω
Energia máxima de 125kJ para pré-carga dos capacitores internos, impedância nominal de surto de 2 Ohm e impedância de carga: R <10 Ohm, L <10 μ H. (\pm 10% de tolerância na tensão de pré-carga e impedância interna. Nenhum requisito na forma de onda de tensão e corrente);	
Corrente máxima de 10 kA em curto circuito (20% de tempo de frente e 20% de tempo de meia onda);	
Impedância máxima para impulso de corrente: R < 0,1 Ohm, L < 10 μ H. Impedância interna nominal de 2 Ohm, podendo utilizar até 0,5 Ohm;	
Impedância interna, de 5, 10 15, 70 e 150 Ohm (dependendo da carga); Impedância de carga mínima para impulso de tensão: R > 450 Ohm, L > 10 mH, C<10 nF;	
Indutor e resistor acessório para formas de onda 8 x 20 μ s, corrente até 10 kA.	
<ul style="list-style-type: none"> Sistema de controle, alimentação e diodo dinâmico para impulsos positivos e negativos. 	
Osciloscópio da marca Rohde & Schwarz, R&S RTH1004 com opção RTH-K201 (conexão wifi remota);	



➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

➤ Resultados

➤ Conclusões

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento Metodológico

- Revisão Bibliográfica das publicações sobre:
 - o comportamento teórico-físico do solo e dos eletrodos de aterramento quando ocorre uma corrente de impulso acentuada para o solo (resultados experimentais).
 - modelagem de eletrodos de aterramento, com referência particular à haste vertical e ao contrapeso - fórmulas de Sunde para estimar a resistência total equivalente (R).

Fórmula de Sunde para um eletrodo de haste vertical:

a = diâmetro do eletrodo (m)

x = comprimento (m)

$$R = \left(\frac{\rho}{2\pi x} \right) \left\{ \ln \left(\frac{4x}{a} \right) - 1 \right\} \quad x \gg a$$

Fórmula de Sunde para um eletrodo horizontal (contrapeso):

a = diâmetro do condutor (m)

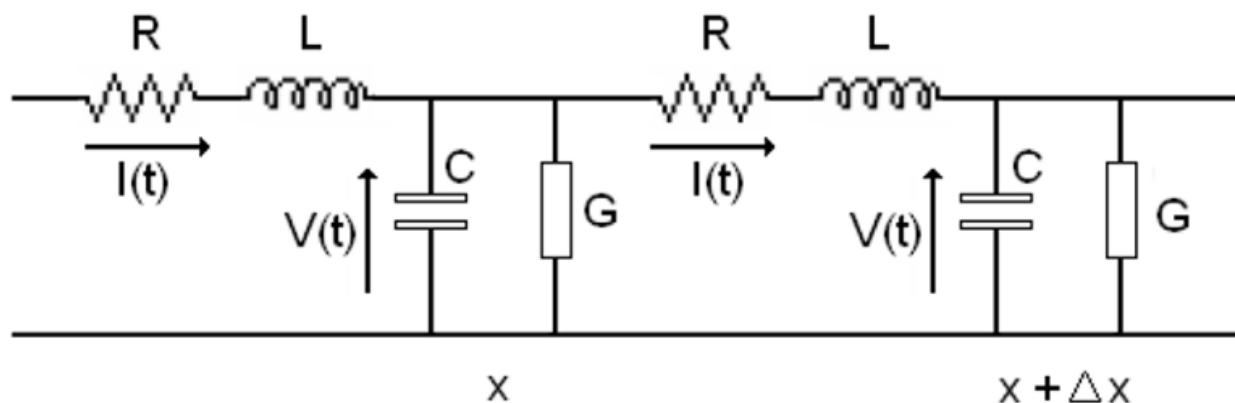
x = comprimento (m)

d = profundidade (m)

$$R = \left(\frac{\rho}{\pi x} \right) \left\{ \ln \left(\frac{2x}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right\} \quad \text{for length } x \gg d$$

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento Metodológico

- Revisão Bibliográfica das publicações sobre:
 - o comportamento teórico-físico do solo e dos eletrodos de aterramento quando ocorre uma corrente de impulso acentuada para o solo (resultados experimentais).
 - modelagem de eletrodos de aterramento, com referência particular à haste vertical e ao contrapeso - fórmulas de Sunde para estimar a resistência total equivalente (R).
 - circuitos equivalentes para aplicação no ATP - circuito equivalente, baseado nas características físicas do solo, mais popular para contrapesos, citado por CIGRE e vários autores



$$L = \frac{\mu_0 \cdot \Delta x}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1 \right]$$
$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \Delta x}{\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1}$$

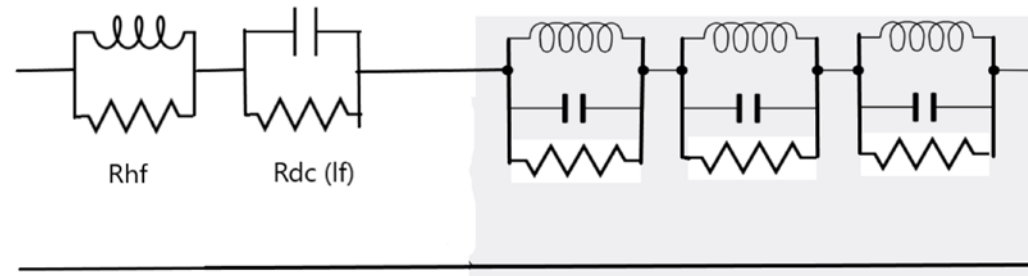
Δx = variação do comprimento (m)
 a = diâmetro do condutor enterrado (m)
 h = profundidade do condutor enterrado (m)
 l = comprimento total do condutor enterrado (m)

$C = \epsilon \cdot \rho \cdot G$
 ϵ_0 = permissividade dielétrica do vácuo = $8.854 \cdot 10^{-12}$ (F/m)
 ϵ_r = permissividade dielétrica relativa do solo
 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ permissividade dielétrica do solo (F/m)
 ρ = resistividade do solo (Ωm)

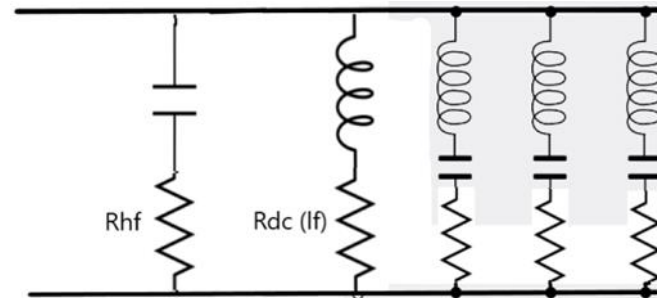
DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

- Circuito equivalente alternativo por síntese de rede baseado na impedância do eletrodo versus frequência de medições, também chamados de Circuitos equivalentes “Foster” e “Cauer”:

- Primeira forma de Foster:



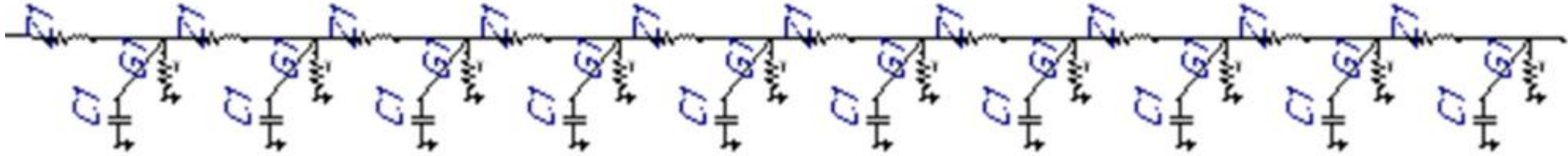
- Segunda forma de Foster:



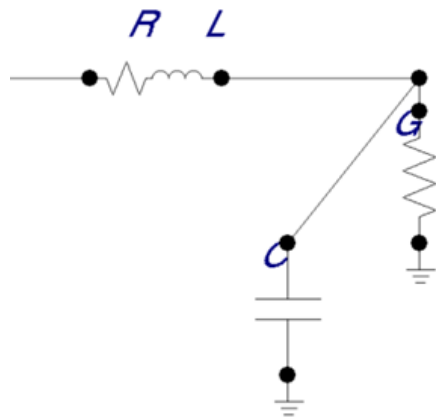
A segunda forma canônica de Forster é mais adequada aqui porque é mais compacta para a implementação no ATP. Os parâmetros do circuito equivalente são obtidos ajustando os valores da impedância versus a frequência do circuito equivalente através da impedância calculada a partir das medições de tensão e corrente.

DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

- Circuito equivalente para representação do eletrodo de aterramento implementado no ATPDraw:



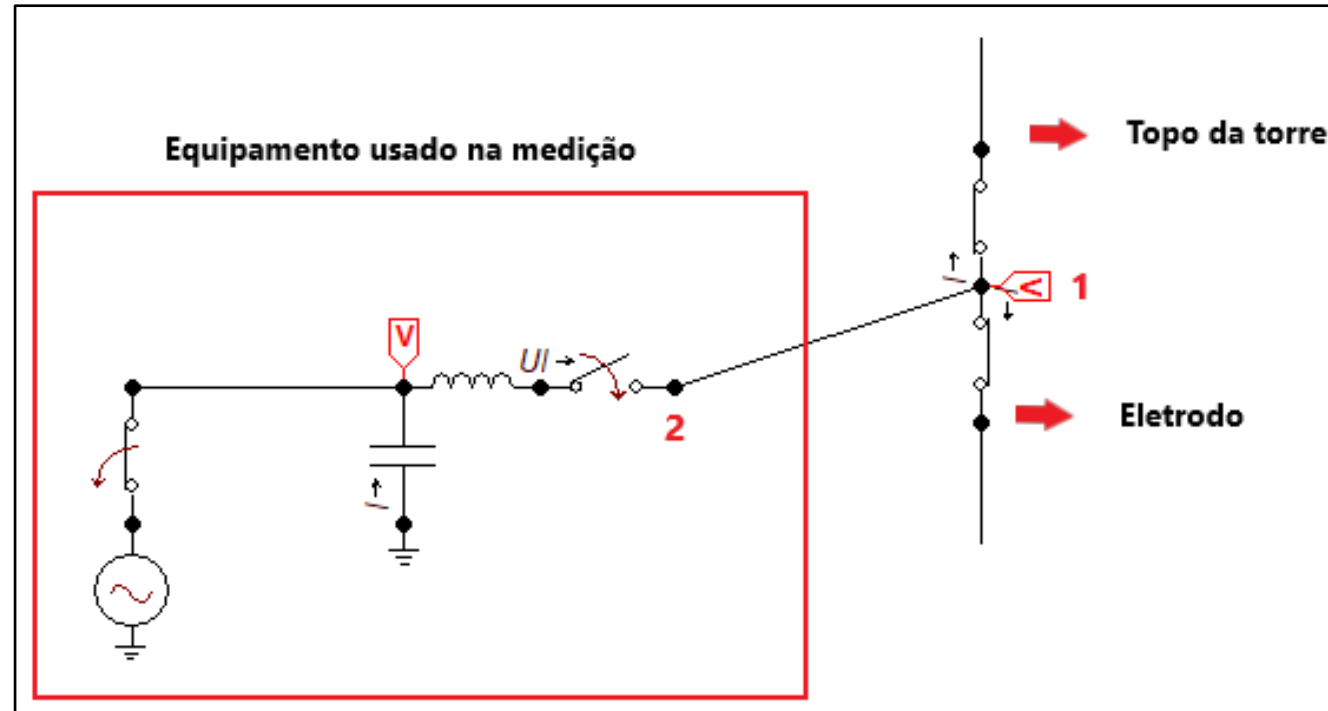
- A célula elementar consiste nos seguintes componentes:



- ✓ Os parâmetros R , L , G , C podem ser avaliados por meio de fórmulas (ver slides anteriores)
- ✓ O único parâmetro afetado pela ionização do solo (no circuito equivalente acima) é a condutância G

DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

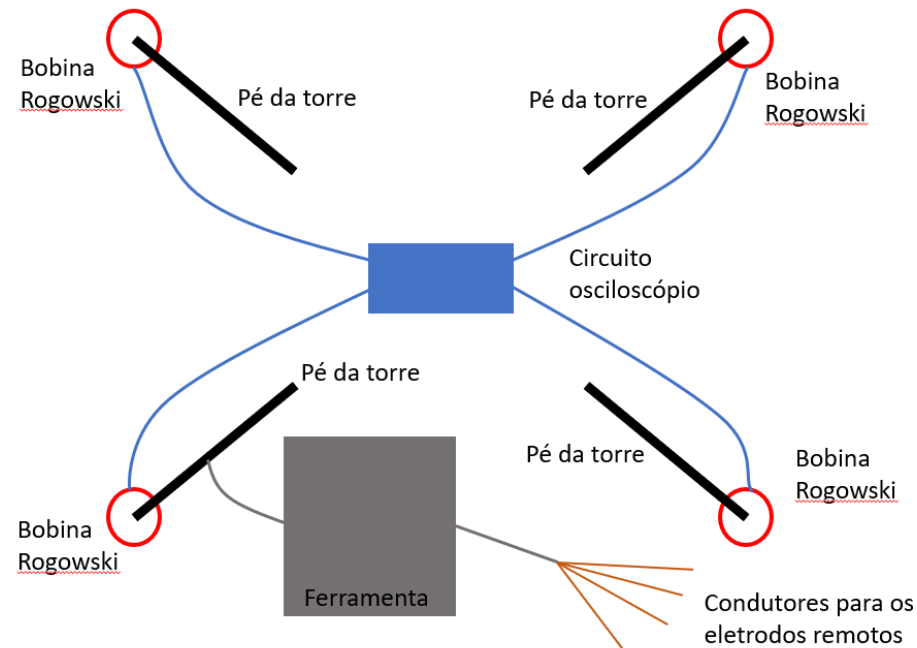
➤ Configuração do circuito de medição



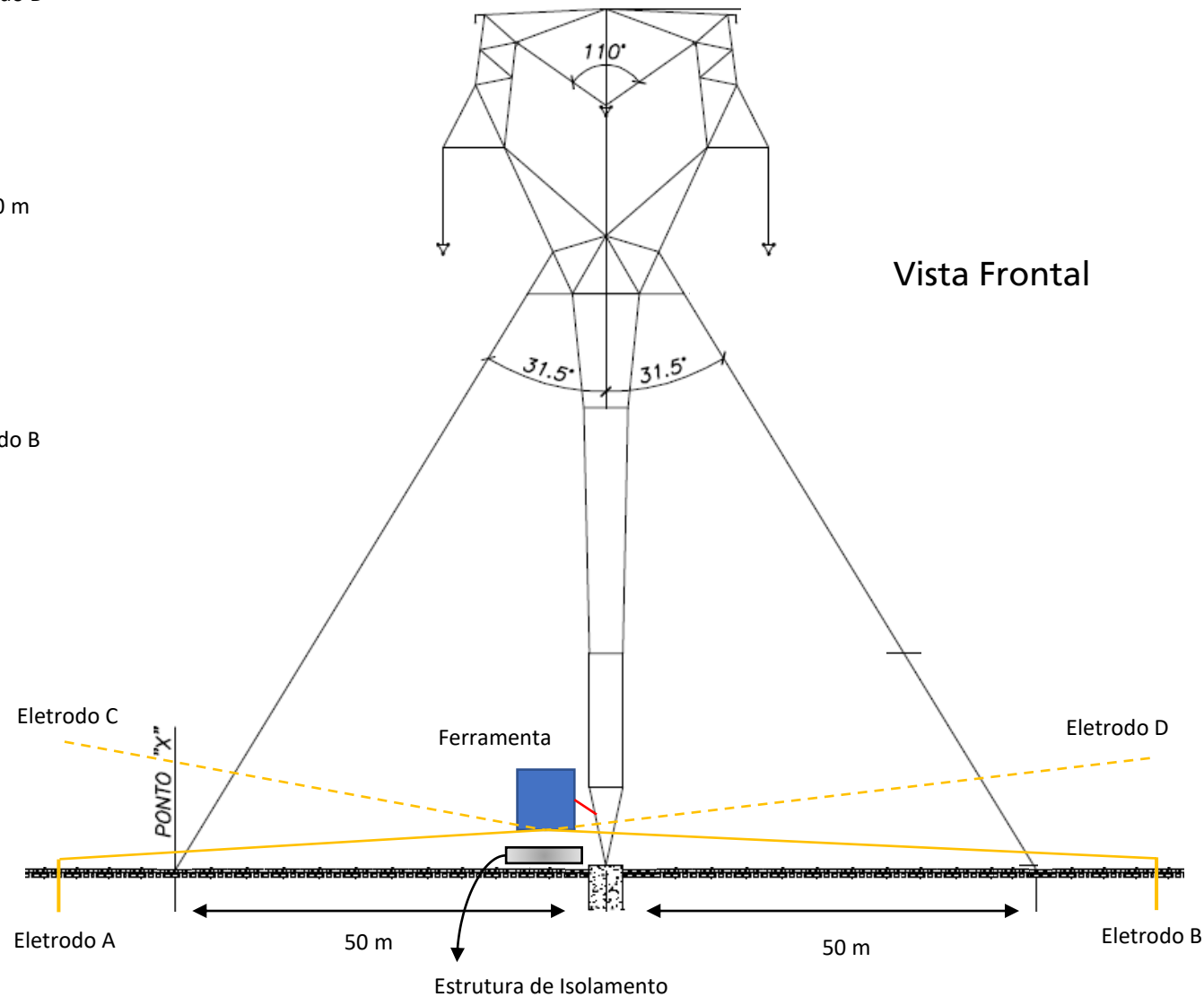
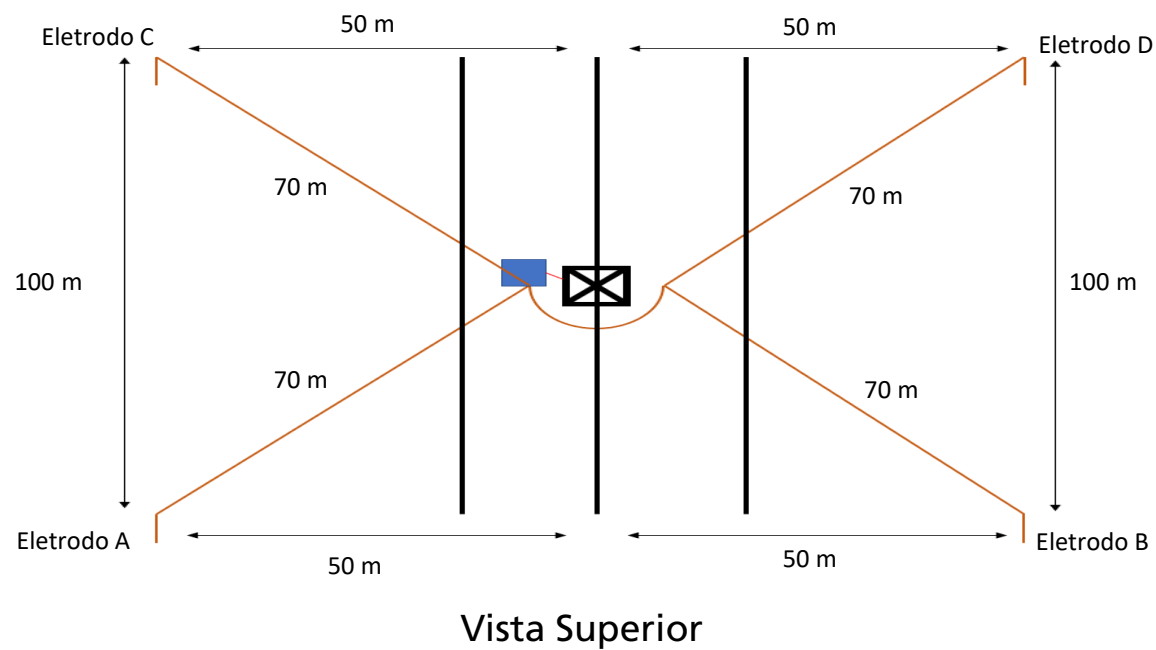
No esquema, o nó 1 é a conexão do terminal ativo da ferramenta ao cabo de aterramento da torre. A corrente injetada no objeto de teste é medida no terminal ativo (saída do nó 2). A corrente injetada no objeto de teste é medida no terminal energizado. Essa corrente total flui uma parte para cima nas torres e a parte restante para baixo no eletrodo. Ambas as correntes serão medidas.

DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

- Quatro transdutores de corrente (bobinas de Rogowsky) serão colocados ao redor de cada perna da torre autoportante ou estaiada
 - essas quatro correntes são medidas tendo o cuidado de conectar o terminal de alta tensão da ferramenta a uma (ou mais) perna com a bobina de Rogowsky colocada em direção ao eletrodo
 - a soma algébrica das correntes instantâneas medidas pelas quatro bobinas de Rogowsky é a corrente total injetada no eletrodo sob teste (eletrodo torre).

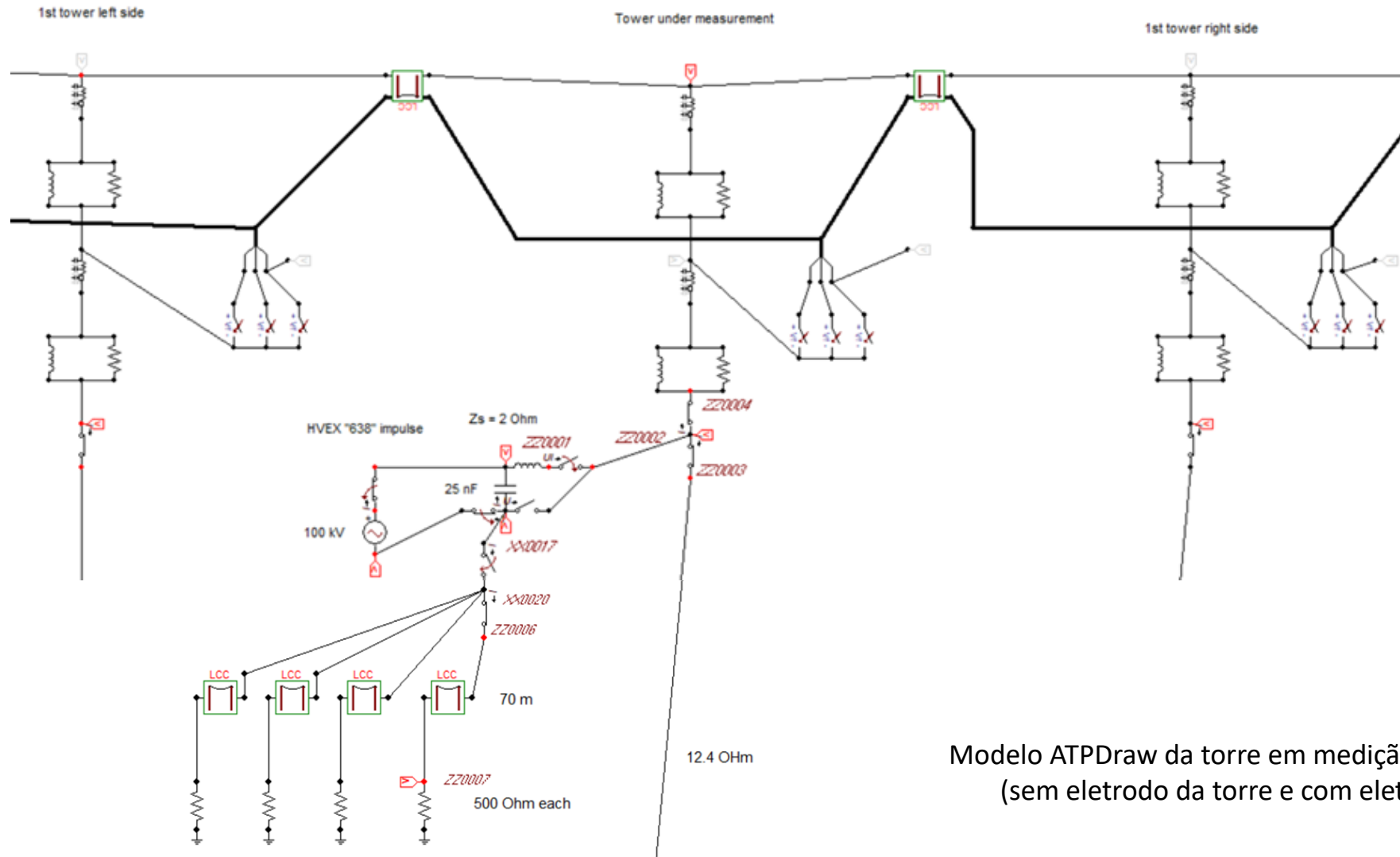


DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico



DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

➤ Configuração do circuito de medição



Modelo ATPDraw da torre em medição e os primeiros vãos (sem eletrodo da torre e com eletrodos auxiliares)

DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

- Teste de impulso de impedância de aterramento da torre e configuração do circuito de medição
 - Simulação de verificação da ferramenta de teste de impulso (GI HVEX “638”) para diferentes resistividades do solo na configuração de medição

Duas modalidades de aplicação:

Energia mais alta

$$V_{\text{charge-max}} = 100 \text{ kV}$$

Corrente de pico de máxima descarga = 10 kA_p

$$C = 25 \text{ } \mu\text{F}$$

Impedância interna de surto: 2 Ω (descarga de corrente de pico 10 kA_p)

Indutância Interna L= 100 μH

$$\text{Energia} = \frac{1}{2} CV^2 = 125 \text{ kJ}$$

Energia mais baixa:

$$V_{\text{charge-max}} = 100 \text{ kV}$$

Corrente de pico de máxima descarga = 10 kA_p

$$C = 1 \text{ } \mu\text{F}$$

Indutância Interna L= 100 μH;

Impedância interna de surto : 2 Ω Energia = ½

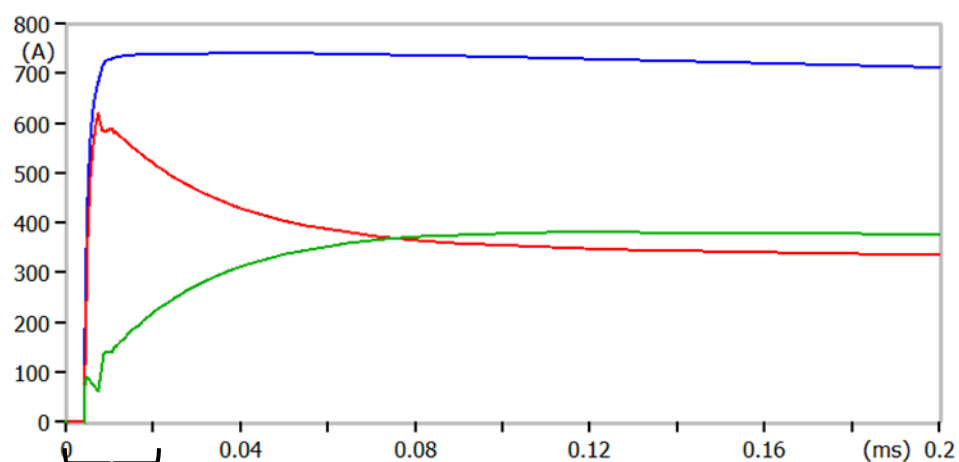
$$CV^2 = 5 \text{ kJ}$$

Configuração:	125 kJ ; C=25 μF	5 kJ ; C=1 μF
Resistividade Solo (Ωm)	10000	10000
Resistividade Solo (Ωm)	1000	1000
Resistividade Solo (Ωm)	150	150

DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

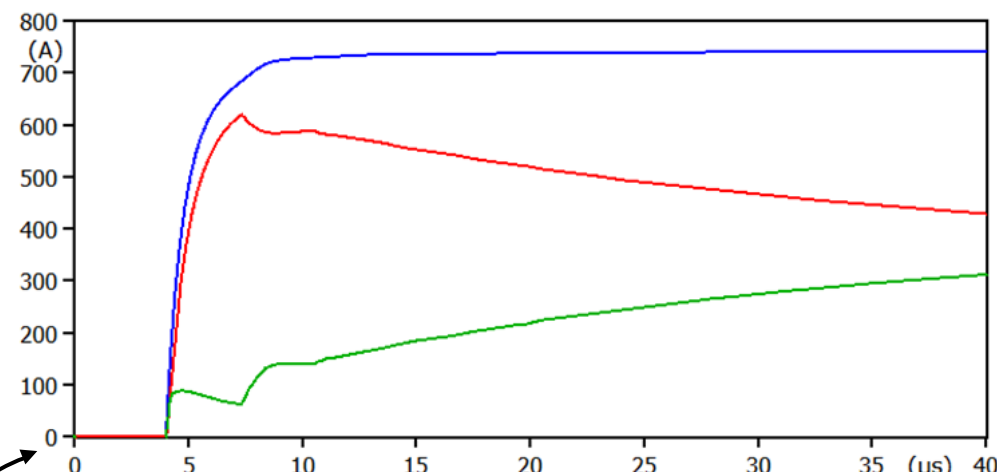
- Teste de impulso de impedância de aterramento da torre e configuração do circuito de medição
 - Simulação das medições, através do ATPDraw

Ferramenta com maior energia: 125 kJ; 25 μ F - Resistividade do solo 1000 Ω m



(file 4_aux_electr_500_Ohm_70m_tool_set_up_1000_Ohm_m_F_12_4_Ohm_new.pl4; x-var t)

c:ZZ0001-ZZ0002 c:ZZ0002-ZZ0003 c:ZZ0002-ZZ0004



(file 4_aux_electr_500_Ohm_70m_tool_set_up_1000_Ohm_m_F_12_4_Ohm_new.pl4; x-var t)

c:ZZ0001-ZZ0002 c:ZZ0002-ZZ0003 c:ZZ0002-ZZ0004

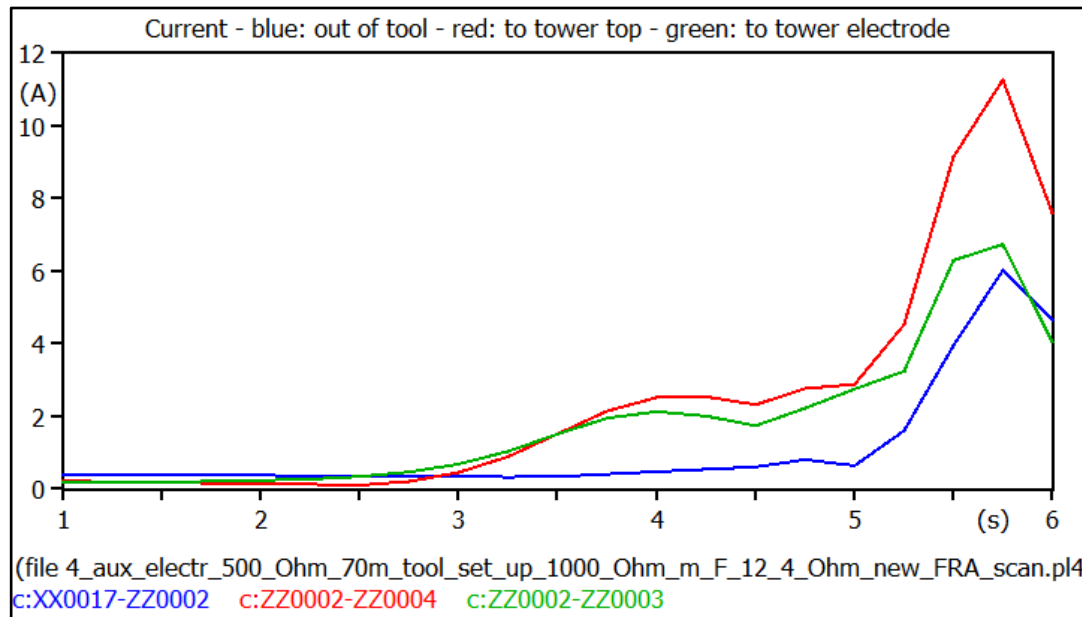
Corrente de saída do terminal HV da ferramenta: 742,1Ap

Corrente para o eletrodo de aterramento (objeto): 619,0 Ap

Corrente para a torre: 382,1 Ap

DESENVOLVIMENTO PROJETO : Desenvolvimento Metodológico

- Impedância de aterramento da torre: teste de análise de resposta de frequência (FRA)
 - Mesma configuração do circuito de medição do teste de impulso
 - Gerador senoidal:
 - Tensão máxima: $V_{max} = 50 \text{ Vp}$
 - Corrente máxima: $I_{max} = 10 \text{ Ap}$
 - Faixa de varredura de frequência: $f = 10 \text{ Hz} \div 20 \text{ MHz}$
 - Impedância interna: 50Ω



Corrente de saída do terminal HV da ferramenta
Corrente para o eletrodo de aterramento (objeto)
Corrente para a torre

➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

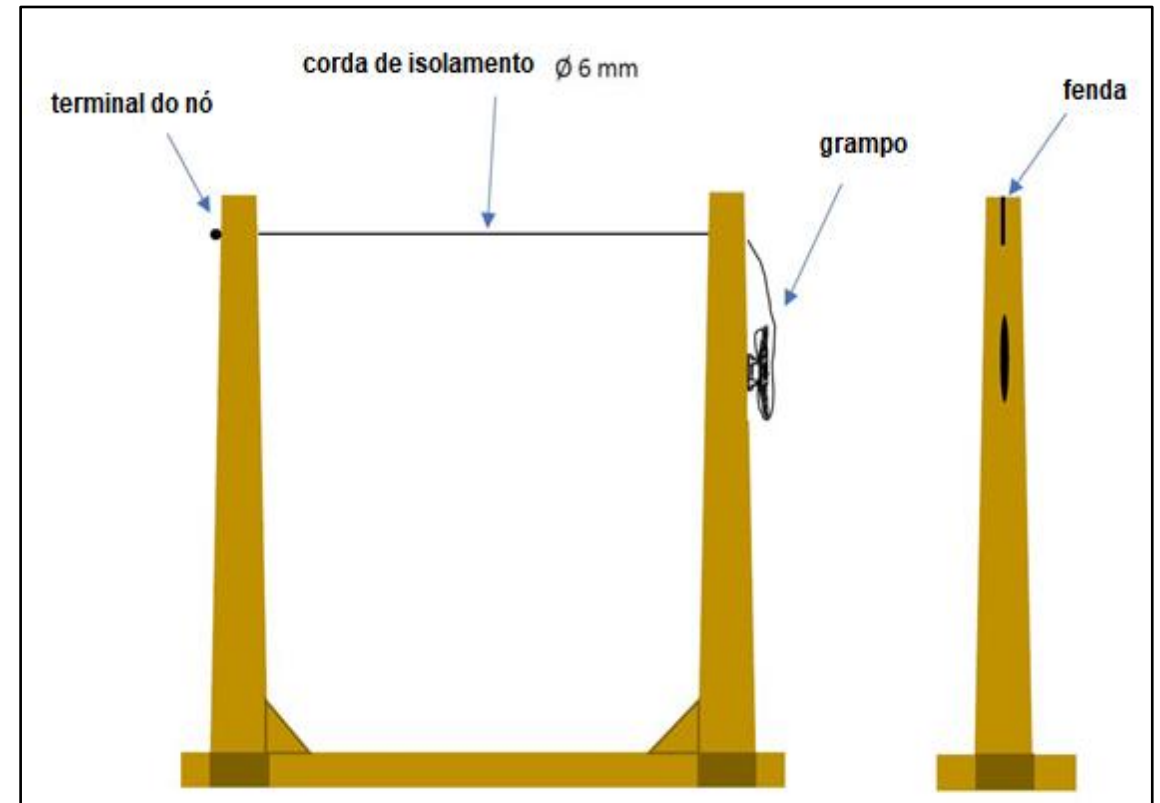
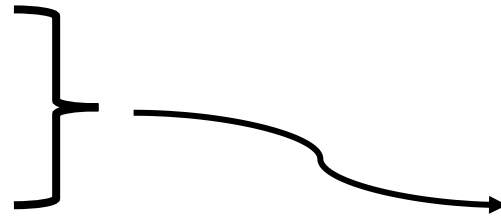
➤ Resultados

➤ Conclusões

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

➤ Além dos equipamentos desenvolvidos pela HVEX foram necessários:

- Bobinas Rogowski (transdutor de corrente)
- Eletrodos Verticais
- Suportes de Madeira
- Condutor de Cobre
- Corda Isolante
- Proteção do gerador e do equipamento
- Gerador 230V
- Transformador de Isolamento
- Multímetro



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- As operações em campo entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021 ocorreram da seguinte forma:
 - Execução da medição de impedância com SFRA no contrapeso referência
 - Execução da medição com pulso de tensão 20kV no contrapeso referência
 - Execução da medição com pulso de tensão 50kV no contrapeso referência
 - Execução da medição com pulso de tensão 100kV no contrapeso referência
 - Execução de medição com pulso de corrente no contrapeso referência
 - Execução da medição de impedância com SFRA na torre 128 - estaiada (pé da torre e estais)
 - Execução da medição de impedância com SFRA na torre 241 - autoportante (pé da torre)
 - Execução medição de aterramento com sistema volt-amperométrico 220V
 - Execução da medição de resistência de aterramento com Megger

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
 - Predisposição de set para ensaio no contrapeso referência



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
Execução da medição de impedância com SFRA – contrapeso referência



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
Gerador de impulso – contrapeso referência



Impulso de tensão a 20kV: OK

Impulso de tensão a 50kV: OK

Impulso de tensão a 100kV: KO

Durante o lançamento da prova teve um problema no gerador diesel que alimenta o equipamento. O sistema ficou em uma condição indefinida e disparou por avalanche térmica, causando queima do resistor de carregamento.

Troca do gerador a diesel

Impulso de corrente: KO. Se detectou uma placa eletrônica do sistema de controle do gerador de pulso queimada. Tentativa de reparação da placa sem êxito.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
Execução da medição de impedância com SFRA na torre estaiada



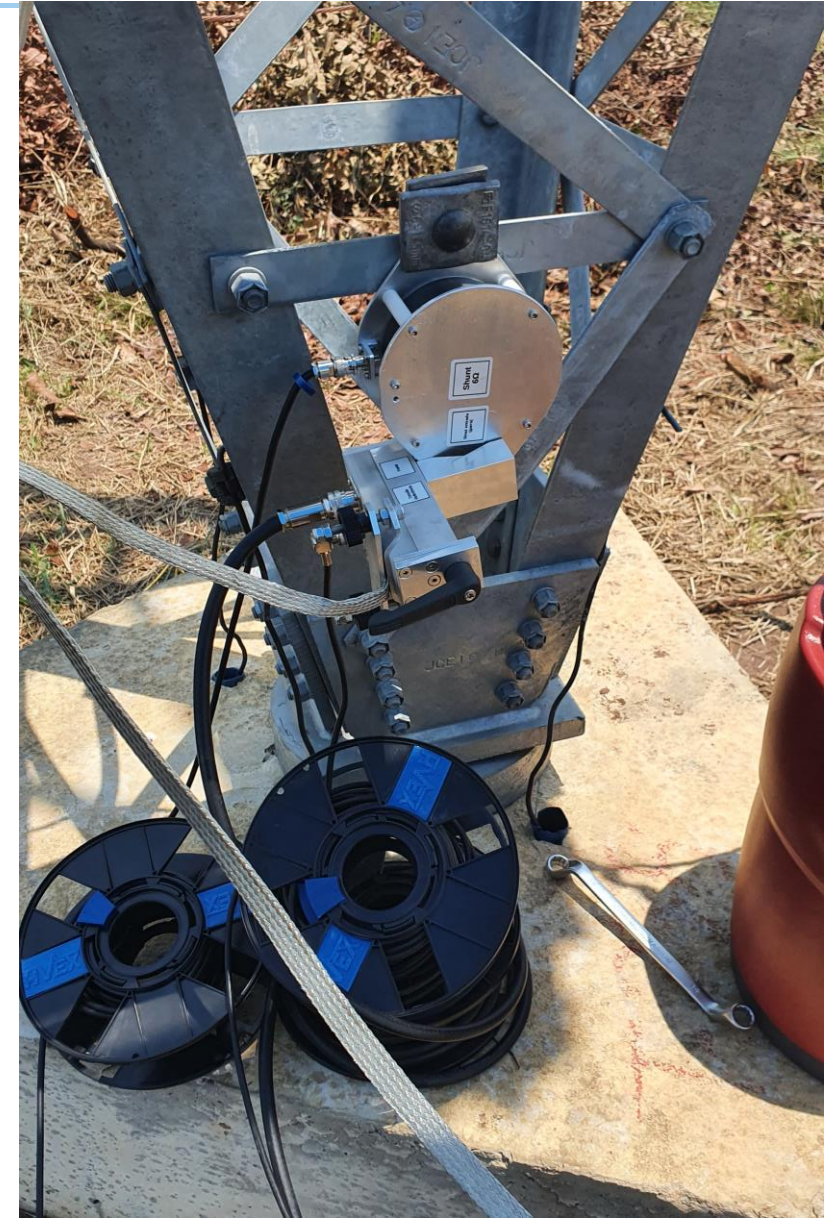
DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
Execução da medição de impedância com SFRA na torre estaiada



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
- Execução da medição de impedância com SFRA nos estais



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 01 – ocorreu entre os dias 18/10/2021 e 22/10/2021
Execução da medição de impedância com SFRA na torre autoportante



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- As operações em campo entre os dias 06/06/2022 e 11/06/2022 ocorreram da seguinte forma:
 - Execução da medição com pulso de corrente de 1kA
 - Execução da medição de impedância com SFRA nos estais e estrutura dada torre 238
 - Execução de medição na torre 238 com sistema volt-amperimétrico 220V nas direções NO-NE, SO-NE, SE-NE, NO-SO, NO-SE e SO-SE
 - Execução de medição na torre 239 com sistema volt-amperimétrico 220V nas direções NO-NE, SO-NE, SE-NE, NO-SO, NO-SE e SO-SE
 - Execução da medição de impedância com SFRA nos estais e estrutura dada torre 239
 - Execução de medição na torre 241 com sistema volt-amperométrico 220V nas direções NO-NE, SO-NE, SE-NE, NO-SO, NO-SE e SO-SE
 - Execução da medição de impedância com SFRA na estrutura dada torre 241
 - Execução de medição na torre 237 com sistema volt-amperimétrico 220V nas direções NO-NE, SO-NE, SE-NE, NO-SO, NO-SE e SO-SE
 - Execução da medição de impedância com SFRA nos estais e estrutura dada torre 237

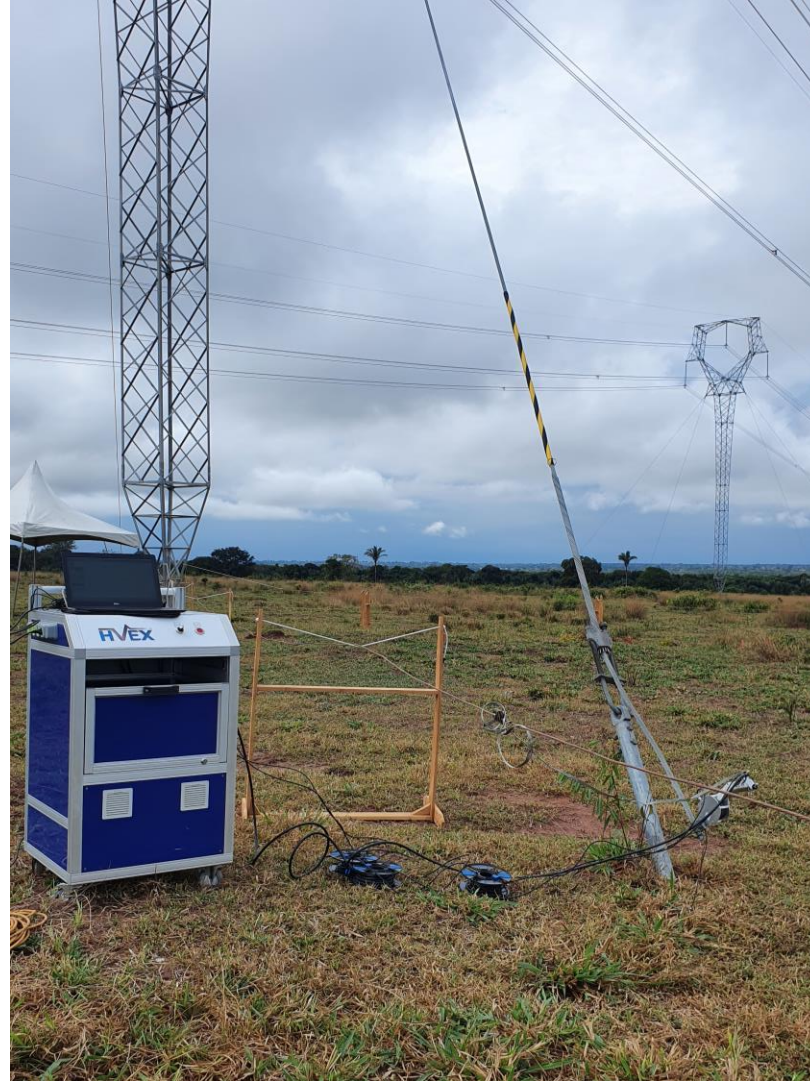
DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 02 – ocorreu entre os dias 06/06/2022 e 11/06/2022
Execução da medição com pulso de corrente de 1kA: Devido a falha no equipamento não foi possível realizar a medição.



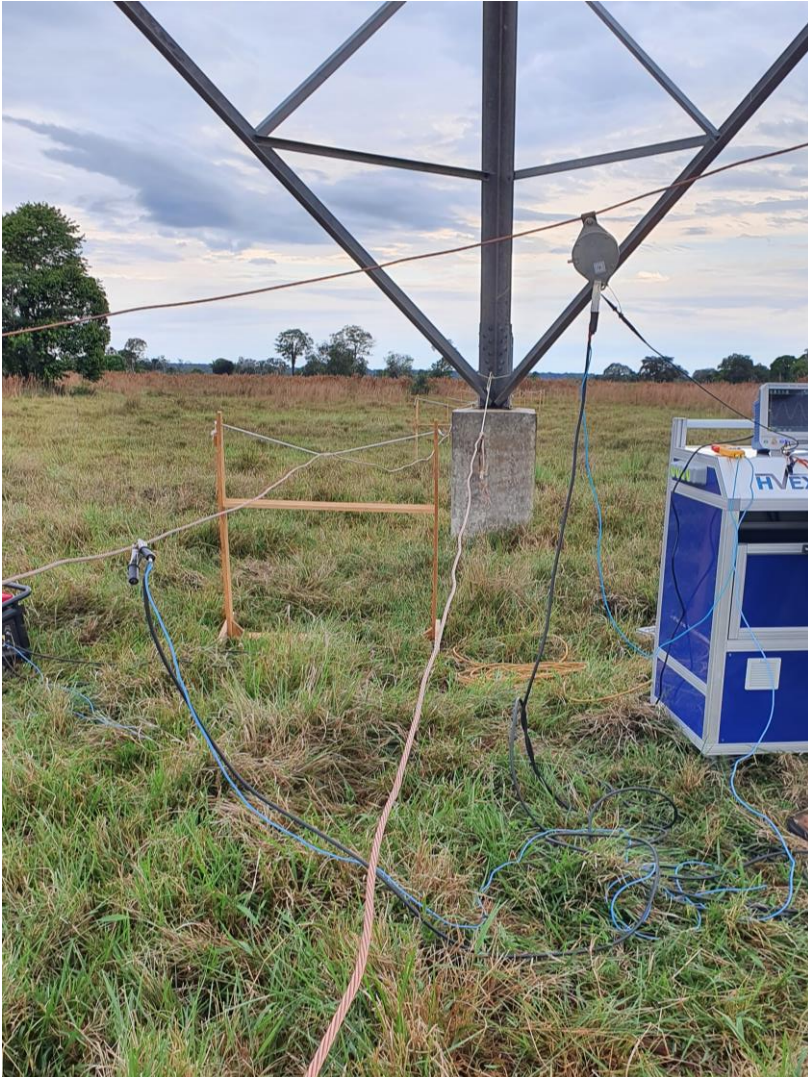
DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 02 – ocorreu entre os dias 06/06/2022 e 11/06/2022
- Execução da medição de impedância com SFRA nos estais e estrutura dada torre estaiada



DESENVOLVIMENTO PROJETO: Execução em Campo

- Campanha 02 – ocorreu entre os dias 06/06/2022 e 11/06/2022
- Execução da medição de impedância com SFRA nos estais e estrutura dada torre autoportante



➤ Descrição do Problema

➤ Escopo do Projeto

➤ Requisitos ANEEL

➤ Desenvolvimento do Projeto

○ SLTE – Descrição da LT

○ Desenvolvimento Equipamentos

○ Desenvolvimento Metodológico

○ Execução em Campo

○ Desenvolvimento do Estudo

➤ Resultados

➤ Conclusões

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

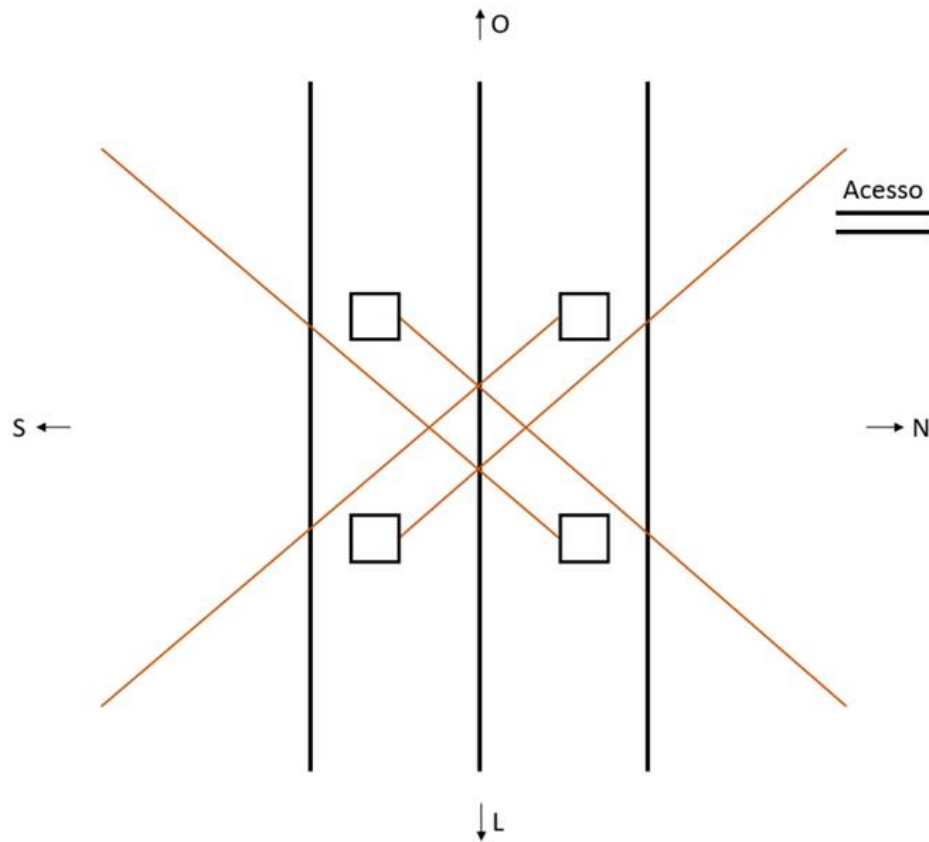
- Etapas do desenvolvimento do estudo:
 - Elaboração da modelagem com base nas medições
 - Elaboração da modelagem apenas para o eletrodo de aterramento das torres
 - Aplicação do modelo de eletrodos de aterramento para simulação de desempenho de descargas atmosféricas
 - Estudo de melhorias para o sistema de aterramento das torres

- Após a realização das medições feitas em campo, foi realizado um estudo que fornece o modelo da impedância total da torre, ou seja, a torre com todos os seus eletrodos, toda a linha conectada nas demais torres com seus respectivos eletrodos.

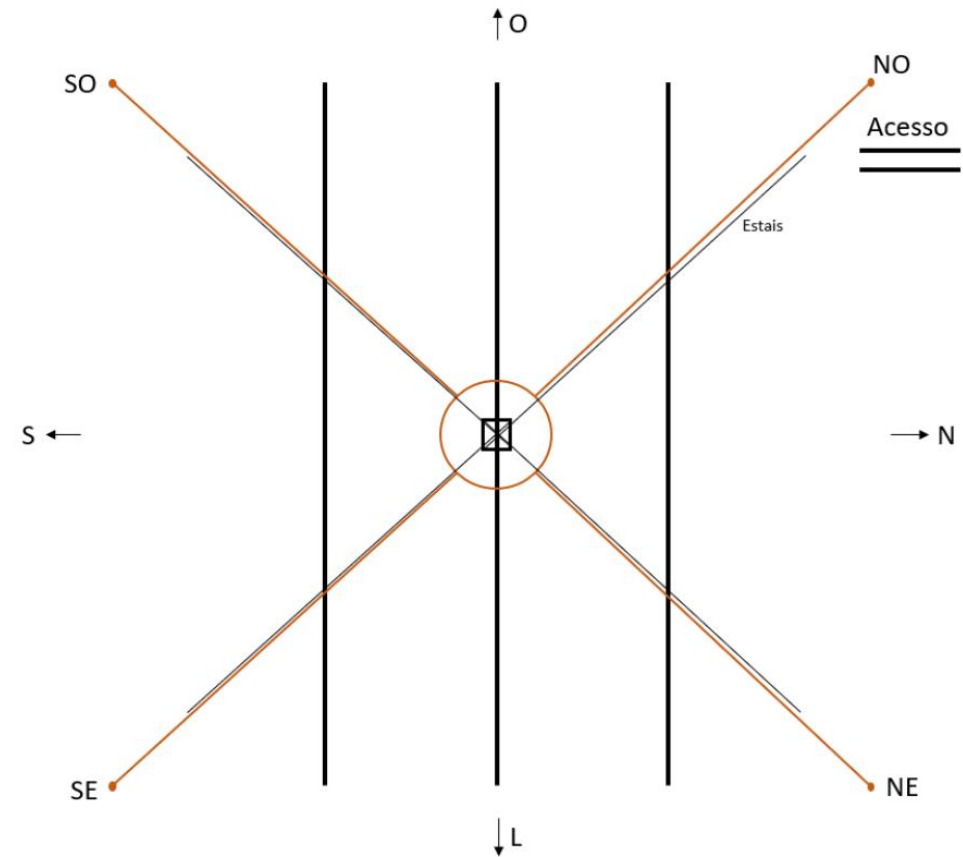
- Inicialmente, foi elaborado o modelo do circuito geral, incluindo:
 - o eletrodo de aterramento da torre,
 - a própria torre conectada às torres adjacentes através dos eletrodos de aterramento (para a torre estaiada 237 a torre inclui o mastro e os quatro estais),
 - o circuito de medição consistindo nos quatro condutores auxiliares ligados às respectivas hastes verticais auxiliares relevante.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

Arranjo do circuito de medição aplicado na torre



Esquemático do ensaio na torre autoportante



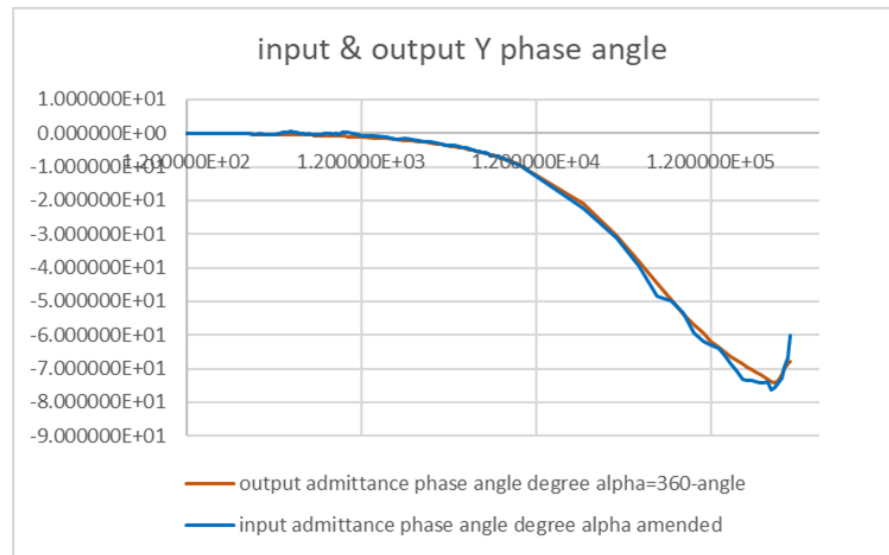
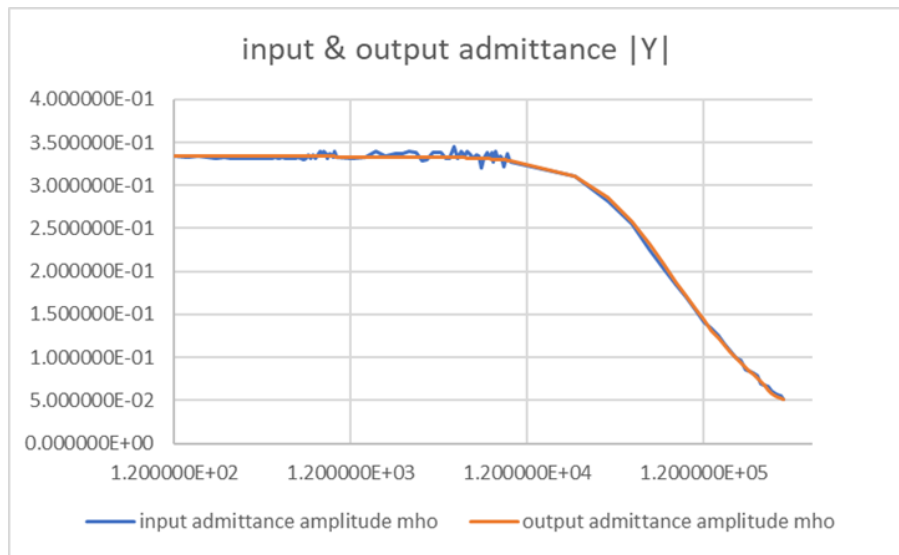
Esquemático do ensaio na torre estaiada

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

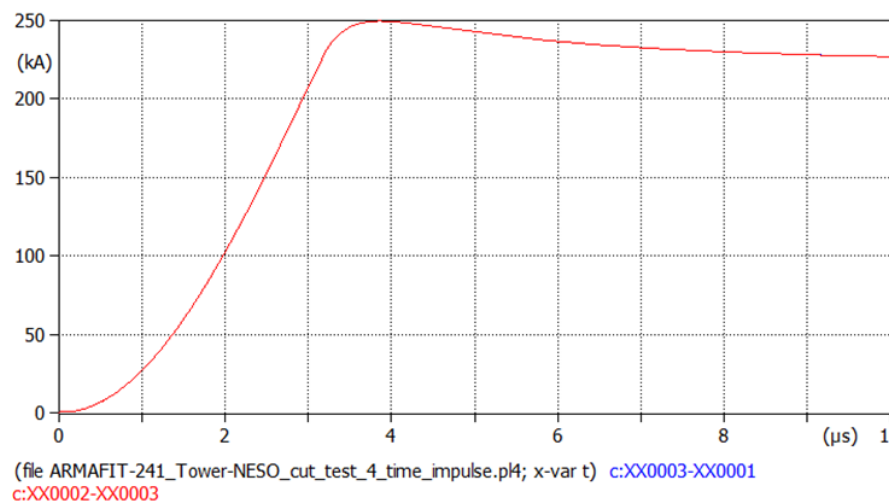
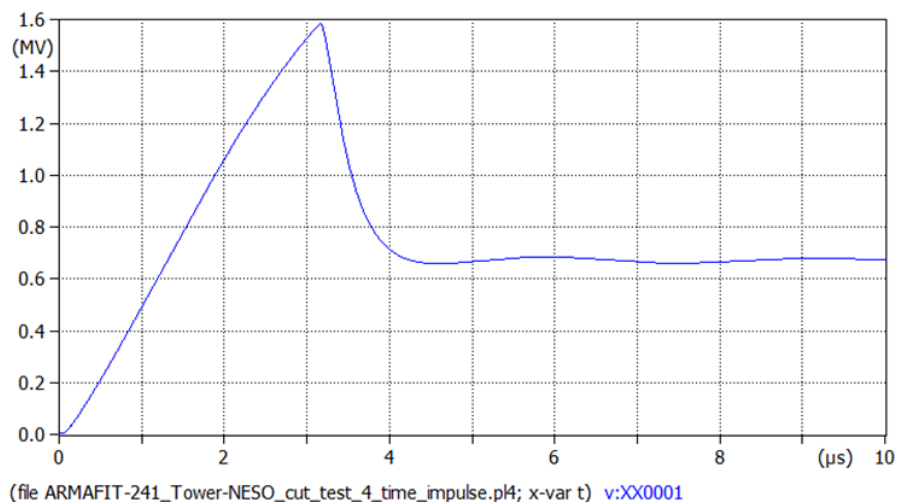
- A admitância $Y_{total}(f)$ de tal circuito inteiro foi calculada a partir das medições e então fornecida como entrada para o ARMAFIT para sua modelagem.
- A rotina dedicada “ARMAFIT” converte a admitância versus frequência para um modelo s-racional de Laplace, por um procedimento de melhor ajuste. Este novo “componente” e as rotinas de conversão associadas simplificam muito a modelagem de uma impedância versus frequência.
- A entrada para ARMAFIT foi limitada até 340kHz: para frequências superiores a 340kHz o diagrama de entrada da admitância, tanto em amplitude quanto em ângulo de fase, é bastante desigual e, portanto, o % de erro no melhor ajuste por ARMAFIT é significativo.
- Finalmente, tanto para a torre autoportante (241) quanto para a torre estaiada (237), verifica-se que quando a inclinação da forma de impulso da corrente se torna menos íngreme (da crista para a cauda), a tensão diminui acentuadamente, pois a impedância versus frequência é baixa em baixas frequências (na cauda) enquanto é muito maior em altas frequências (na frente).

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

➤ Elaboração das medições na torre 241 (auto-portante)



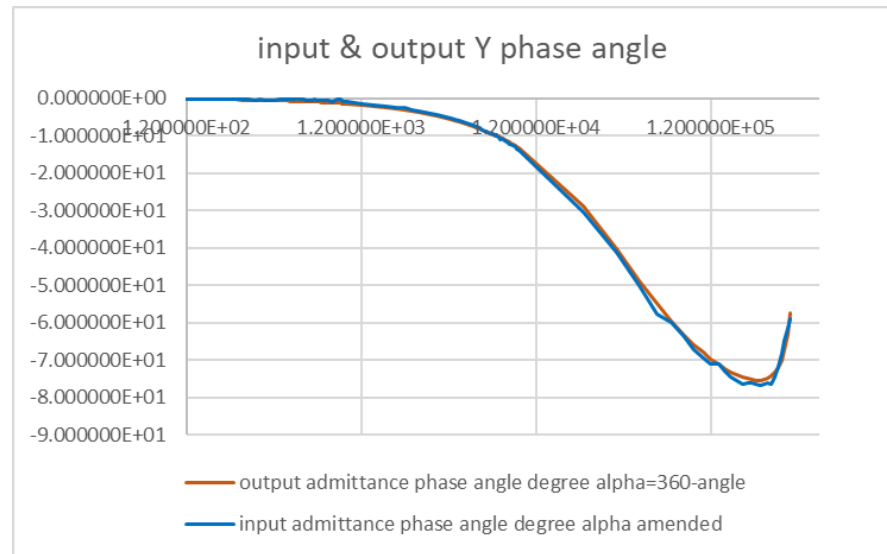
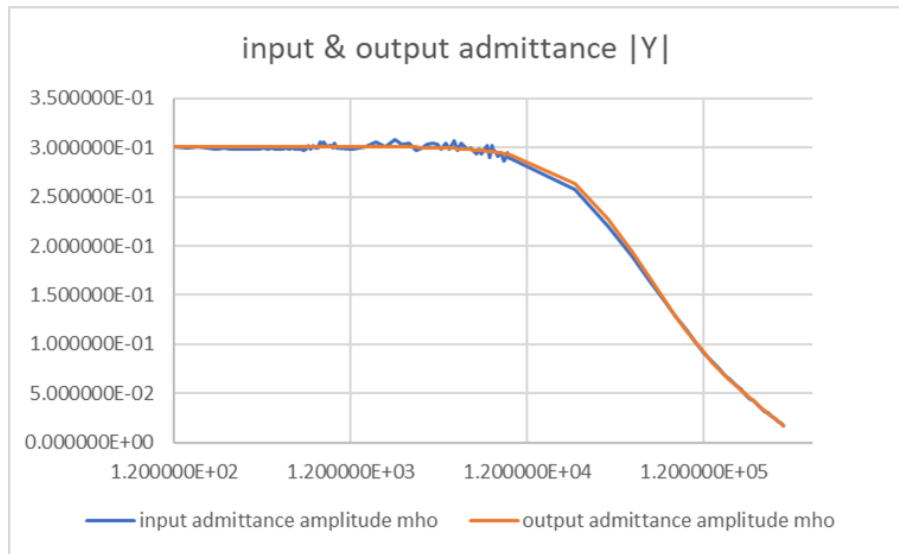
- Admitância $Y_{total}(f)$
- amplitude |Y|
 - ângulo de fase (graus), versus frequência f (escala logarítmica)
- ✓ Entrada para a rotina ARMAFIT (medições)
 - ✓ Saída da rotina ARMAFIT



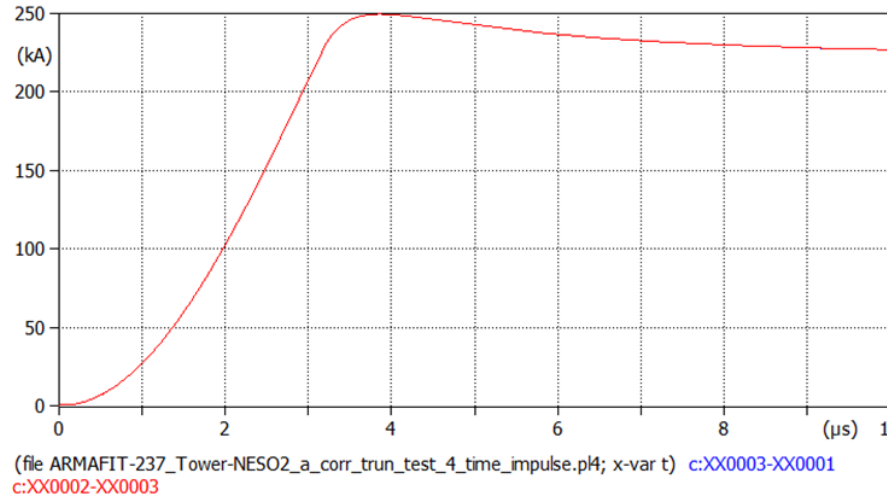
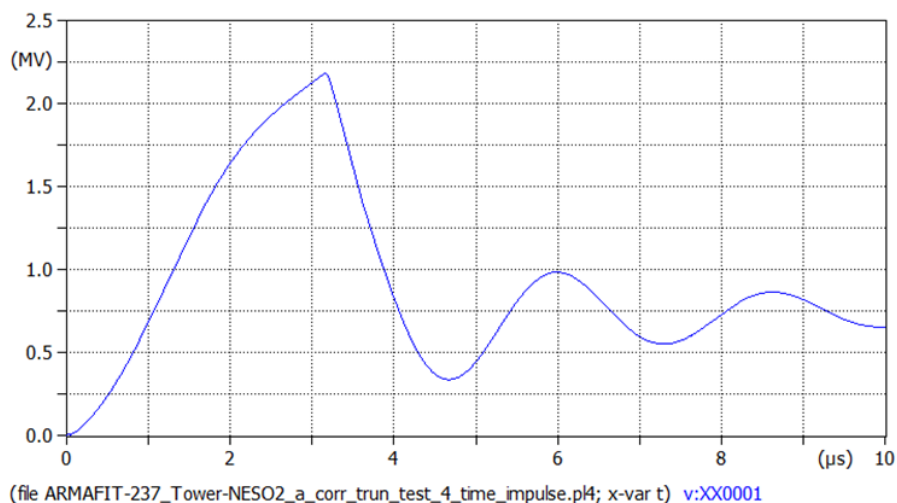
- Resposta da admitância modelada à um impulso de corrente (corrente de impulso atmosférica típica para backflashover)
- Forma de onda do impulso atual: 250 kAp, 3.5 μ s para o pico, 2000 μ s (2 ms) tempo de meia onda.
- Tensão
Corrente

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

➤ Elaboração das medições na torre 237 (estaiada)



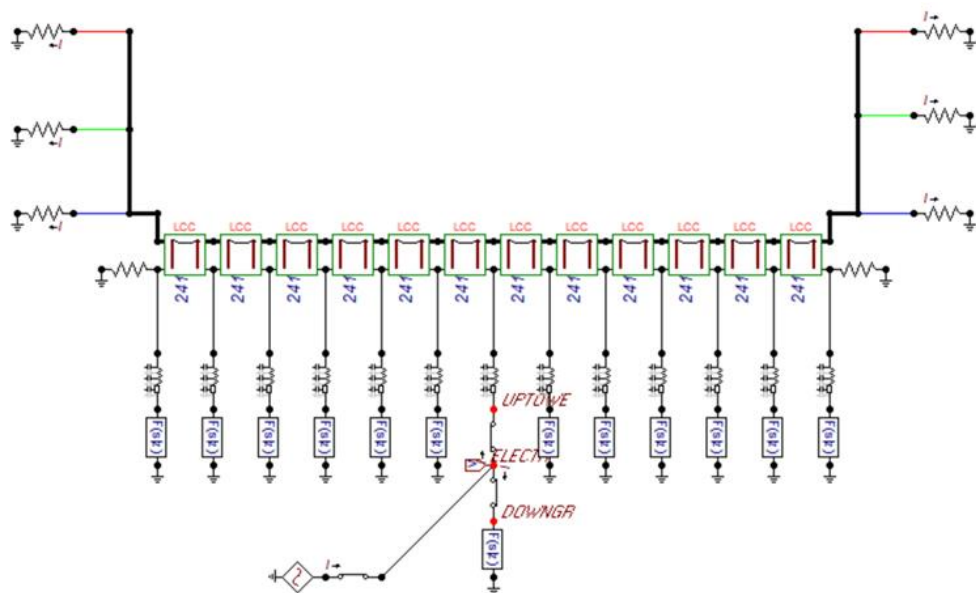
- Admitância $Y_{total}(f)$
- amplitude |Y|
 - ângulo de fase (graus), versus frequência f (escala logarítmica)
- ✓ Entrada para a rotina ARMAFIT (medições)
 - ✓ Saída da rotina ARMAFIT



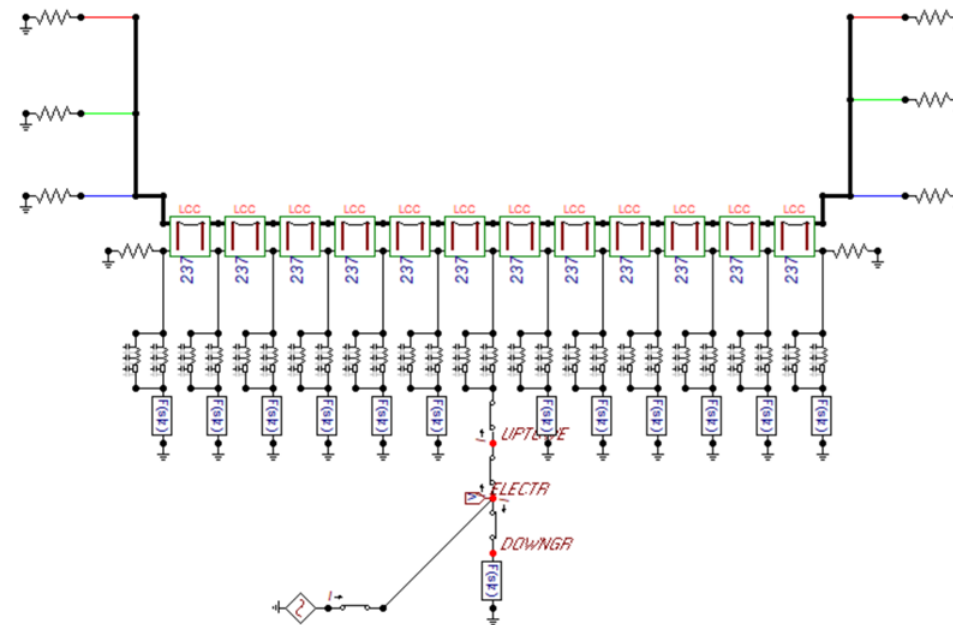
- Resposta da admitância modelada à um impulso de corrente (corrente de impulso atmosférica típica para backflashover)
- Forma de onda do impulso atual: 250 kAp, 3.5 μ s para o pico, 2000 μ s (2 ms) tempo de meia onda.
- Tensão
Corrente

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Verificação do comportamento do modelo do eletrodo de aterramento para ambas as torres



Modelo eletrodo de aterramento para torre auto-portante 241

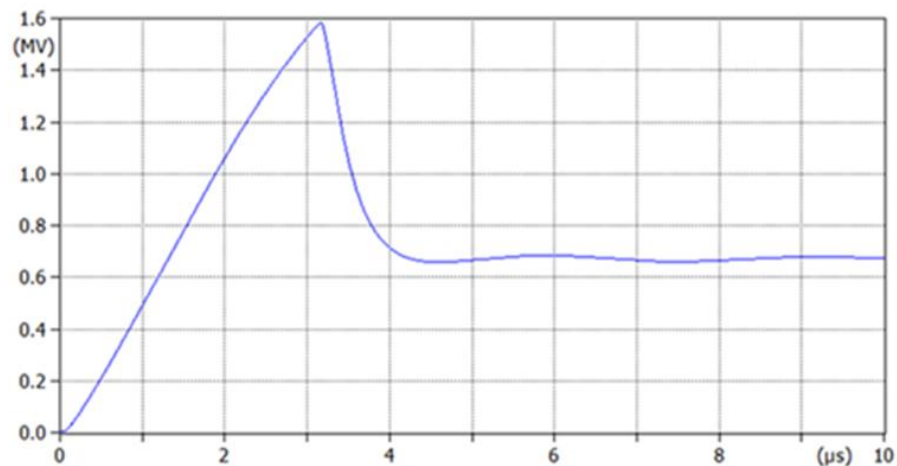


Modelo eletrodo de aterramento para torre estaiada 237

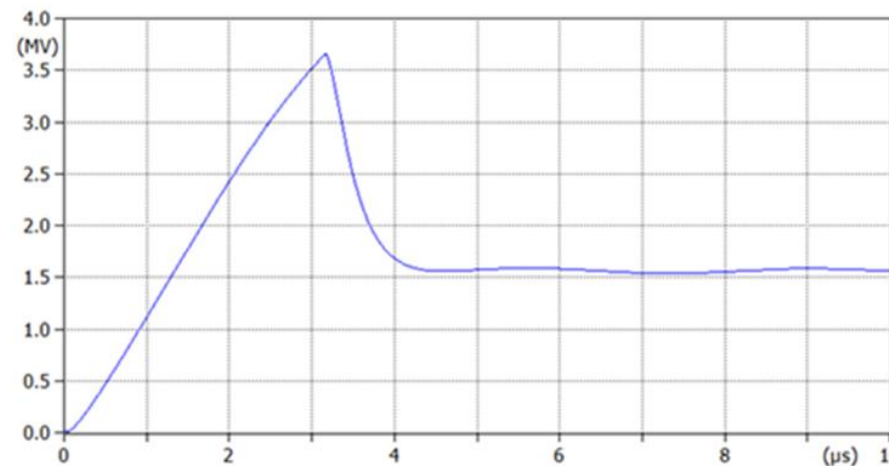
O modelo do eletrodo de aterramento de cada torre foi obtido considerando que a impedância do eletrodo de aterramento está em paralelo com a impedância das alas superiores da torre, dos cabos de aterramento e torres adjacentes em ambos os lados.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

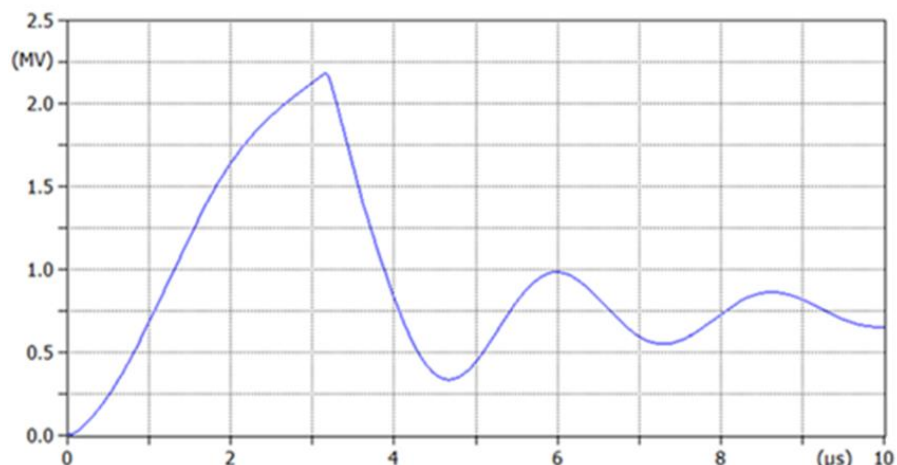
➤ Curva da tensão de resposta ao impulso da corrente de descarga atmosférica – Torre 241 e 237 (Impulso de corrente aplicado: 250 kAp, 3.5 μ s pico, 2000 μ s (2 ms) tempo de meia onda)



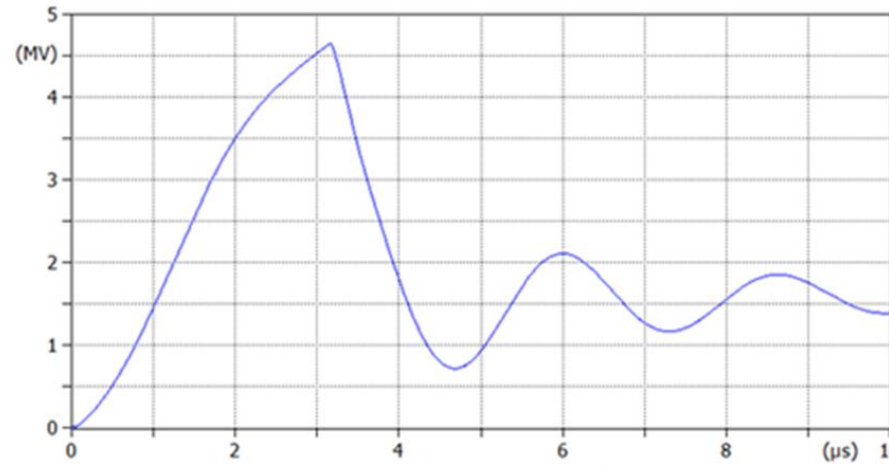
(file ARMAFIT-241_Tower-NESO_cut_test_4_time_impulse.pH; x-var t) v:XX0001



(file ARMAFIT-241_Tower-fn_test_4_time_impulse.pH; x-var t) v:XX0001



(file ARMAFIT-237_Tower-NESO2_a_corr_trun_test_4_time_impulse.pH; x-var t) v:XX0001



(file ARMAFIT-237_Tower-fn_test_4_time_impulse.pH; x-var t) v:XX0001

Torre 241 (autoportante)

comparação da resposta (em V) à corrente de descarga atmosférica

- Esquerda: Circuito completo da torre com a linha

- Direita: Apenas um eletrodo

Para ambas as torres, verifica-se que, quando a inclinação da forma de impulso de corrente se torna menos íngreme, a tensão diminui acentuadamente devido a impedância versus frequência ser baixa em baixas frequências e ser bem maior em altas frequências

Torre 237 (estaiada)

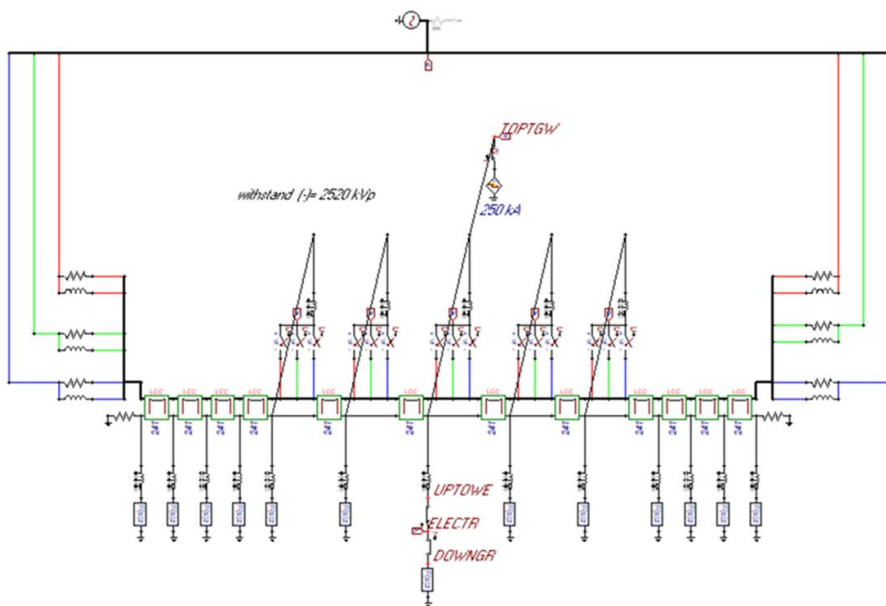
comparação da resposta (em V) à corrente de descarga atmosférica

- Esquerda: Circuito completo da torre com a linha

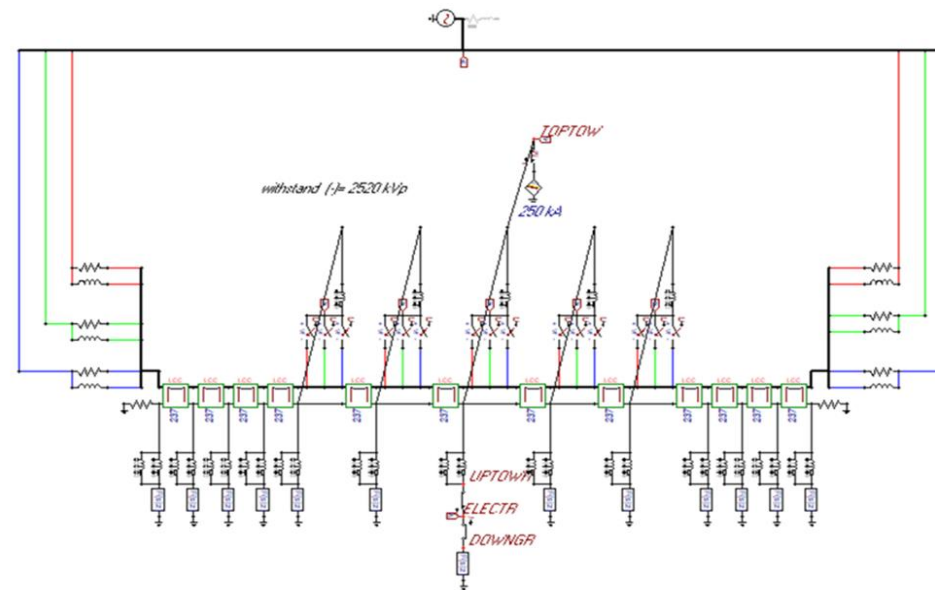
- Direita: Apenas um eletrodo

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Modelo para avaliação do desempenho às descargas atmosféricas para ambas as torres



Modelo eletrodo de aterramento para torre auto-portante 241

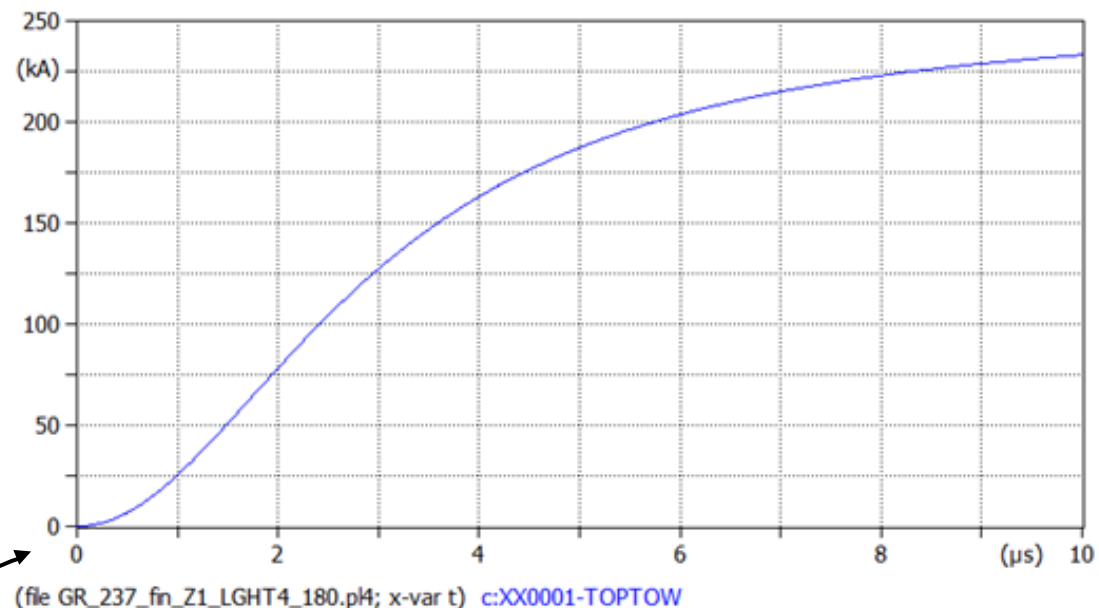
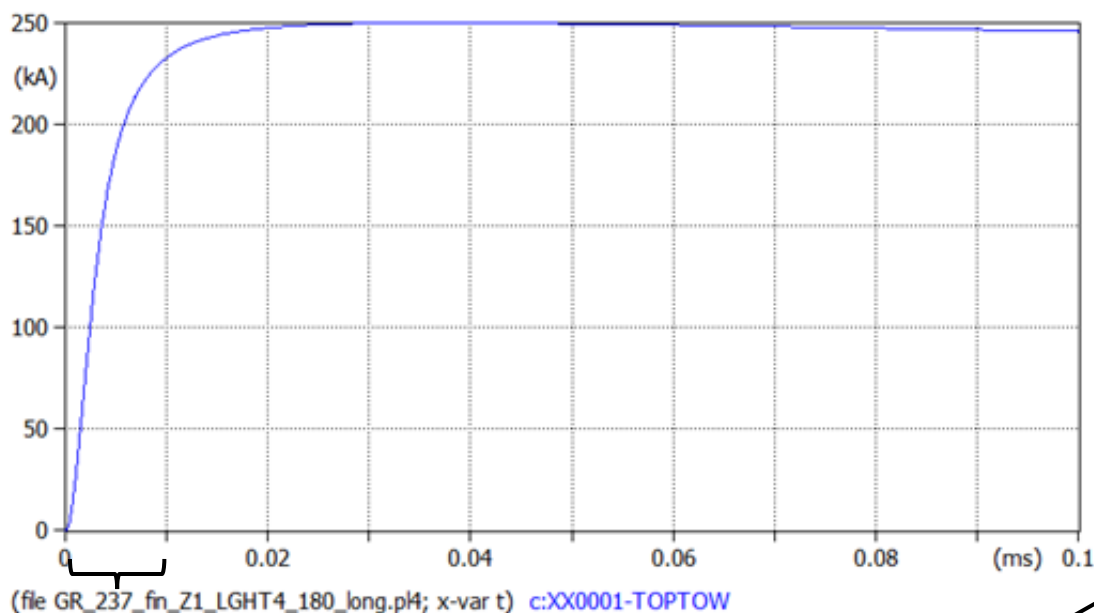


Modelo eletrodo de aterramento para torre estaiada 237

A torre central é atingida pela descarga e de cada lado estão representadas outras 6 torres e vãos de linha na qual, por simplicidade, todas as torres são do mesmo tipo. O modelo do eletrodo de aterramento também é o mesmo para todas as torres.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

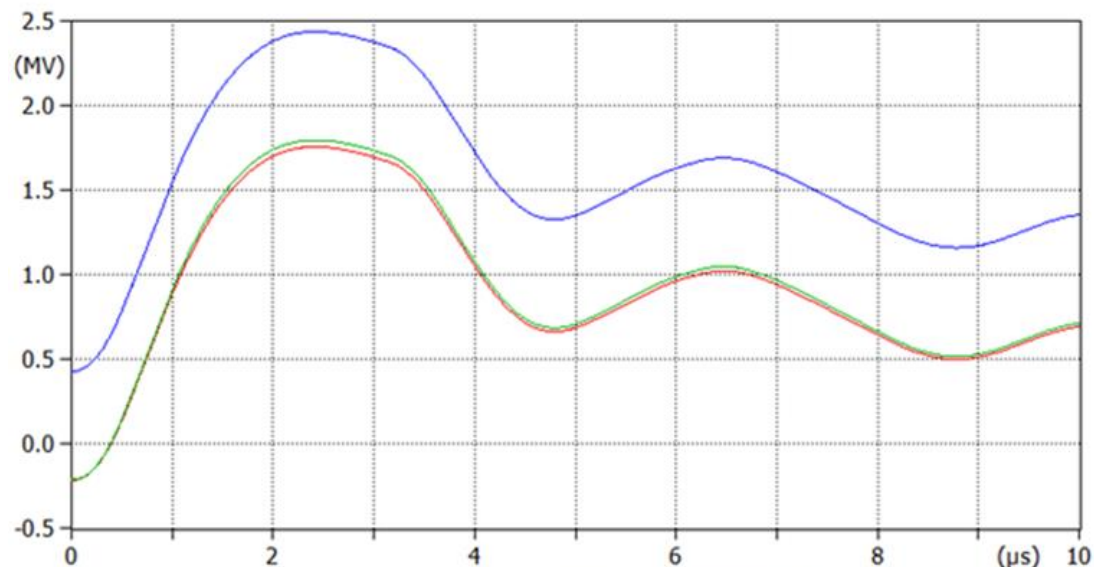
- Corrente de impulso assumida para a simulação do **comportamento da linha às descargas atmosféricas**: corrente de 250 kA_p com uma probabilidade de exceder seu valor em 5%, com inclinação ($di/dt=32 \text{ kA}/\mu$) nessa mesma probabilidade de 5% (conforme IEC62305-1 Tabela A.1 extraída de CIGRE Electra No. 41 ou No. 69)



Corrente de impulso para a simulação do desempenho às descargas atmosféricas

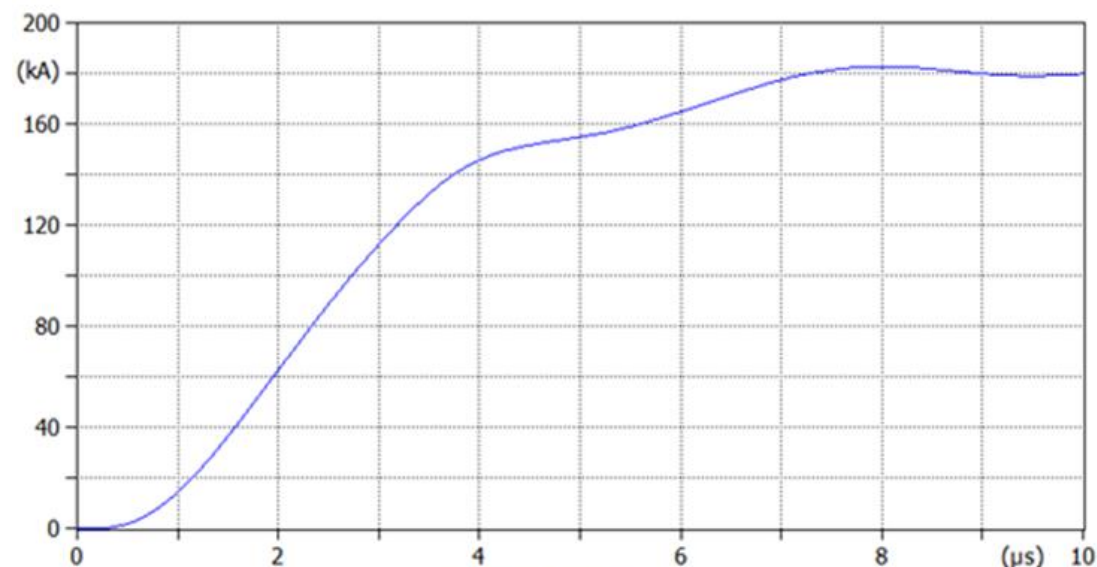
DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Resultado das simulações no ATPDraw para avaliação do desempenho às descargas atmosféricas – Torre 241 (autoportante)



(file GR_241_fin_Z1_LGHT5.p4; x-var t) v:XX0042-X0035A v:XX0042-X0035B v:XX0042-X0035C

Tensão fase A,
tensão fase B,
tensão fase C



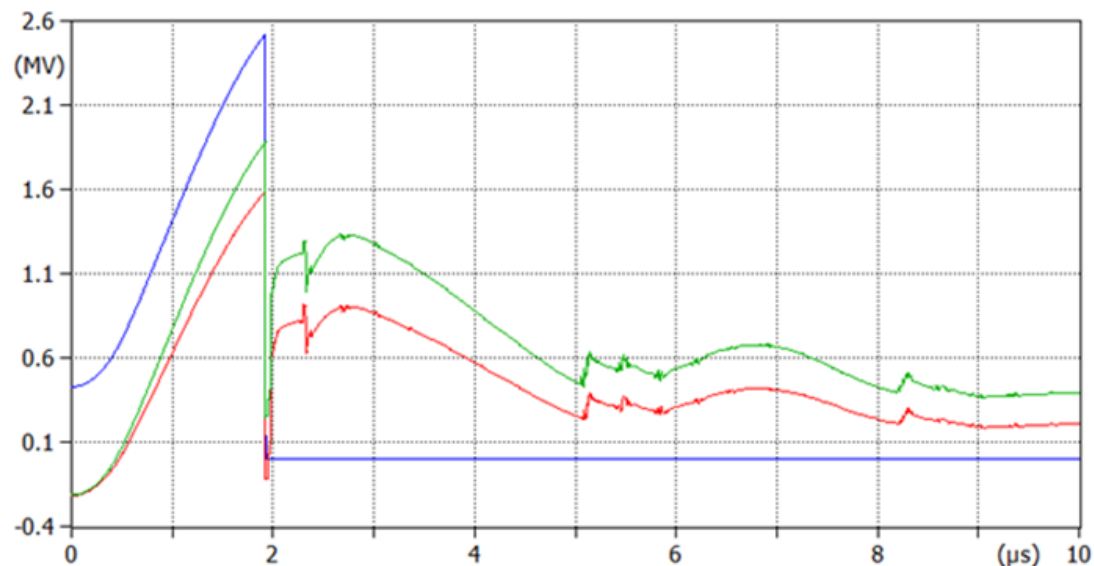
(file GR_241_fin_Z1_LGHT5.p4; x-var t) c:ELECTR-DOWNGR

- Esquerda: Tensão forçando as folgas de ar na torre 241 atingida pelo raio: sem descarga no isolamento da linha
- Direita: Corrente fluindo para o eletrodo de aterramento da torre 241 atingida pelo raio

A tensão de pico é de 2438 kV_p (fase A), muito próximo ao limite da tensão de 2520 kV_p.

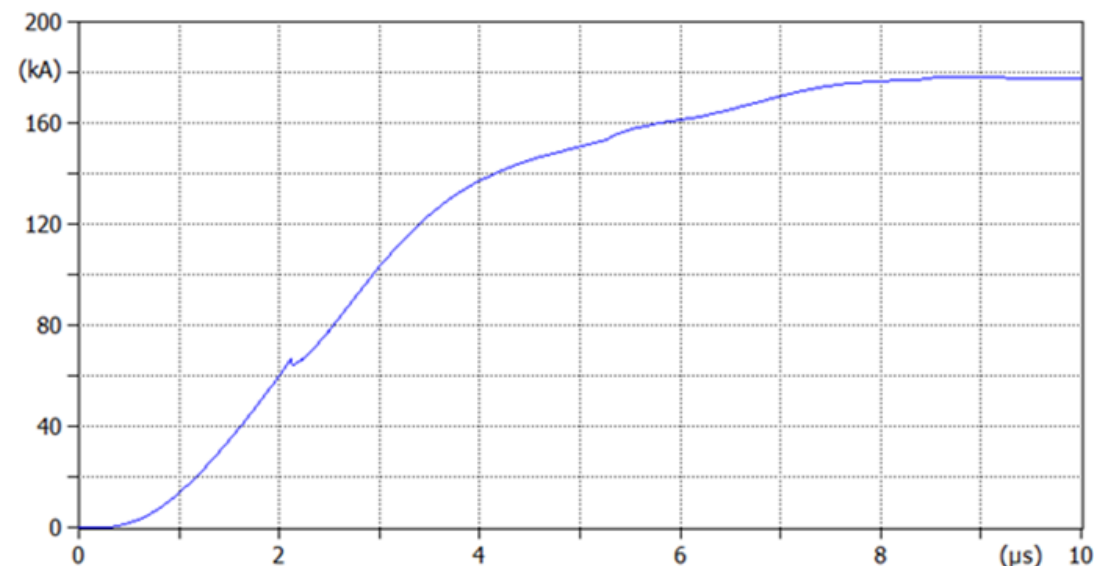
DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Resultado das simulações no ATPDraw para avaliação do desempenho às descargas atmosféricas – Torre 237 (estaiada)



(file GR_237_fin_Z1_LGHT5.p4; x-var t) v:XX0030-X0023A v:XX0030-X0023B v:XX0030-X0023C

Tensão fase A,
tensão fase B,
tensão fase C



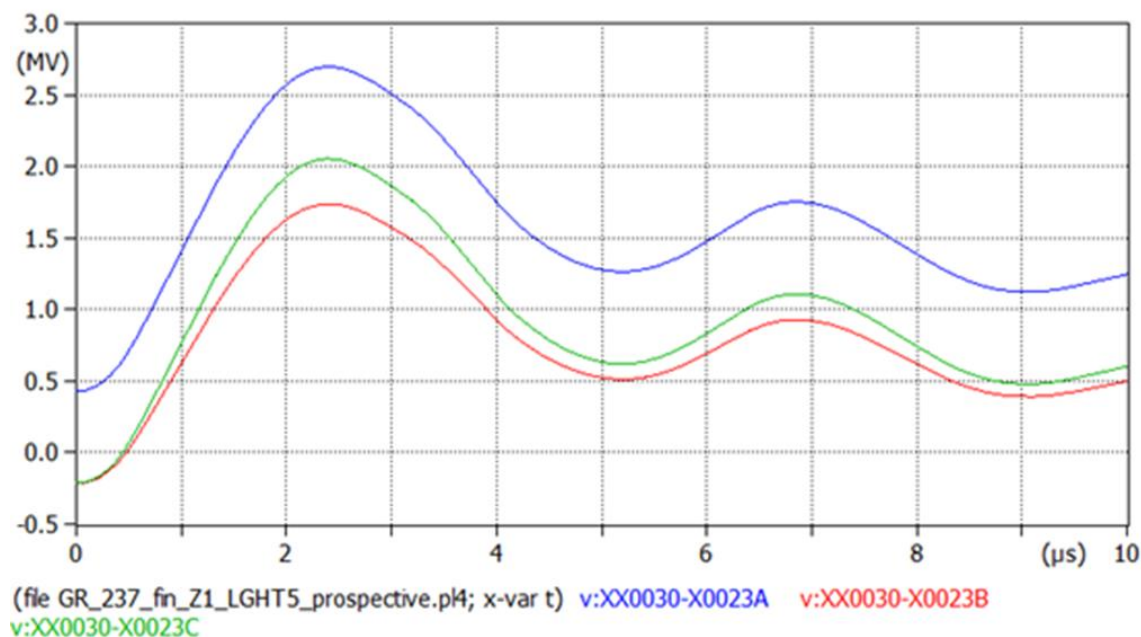
(file GR_237_fin_Z1_LGHT5.p4; x-var t) c:ELECTR-DOWNGR

- Esquerda: Tensão forçando as folgas de ar na torre 241 atingida pelo raio: sem descarga no isolamento da linha
- Direita: Corrente fluindo para o eletrodo de aterramento da torre 237 atingida pelo raio

A fase A (azul) descarrega em torno de 2 μs.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Resultado das simulações no ATPDraw para avaliação do desempenho às descargas atmosféricas – Torre 237 (estaiada)



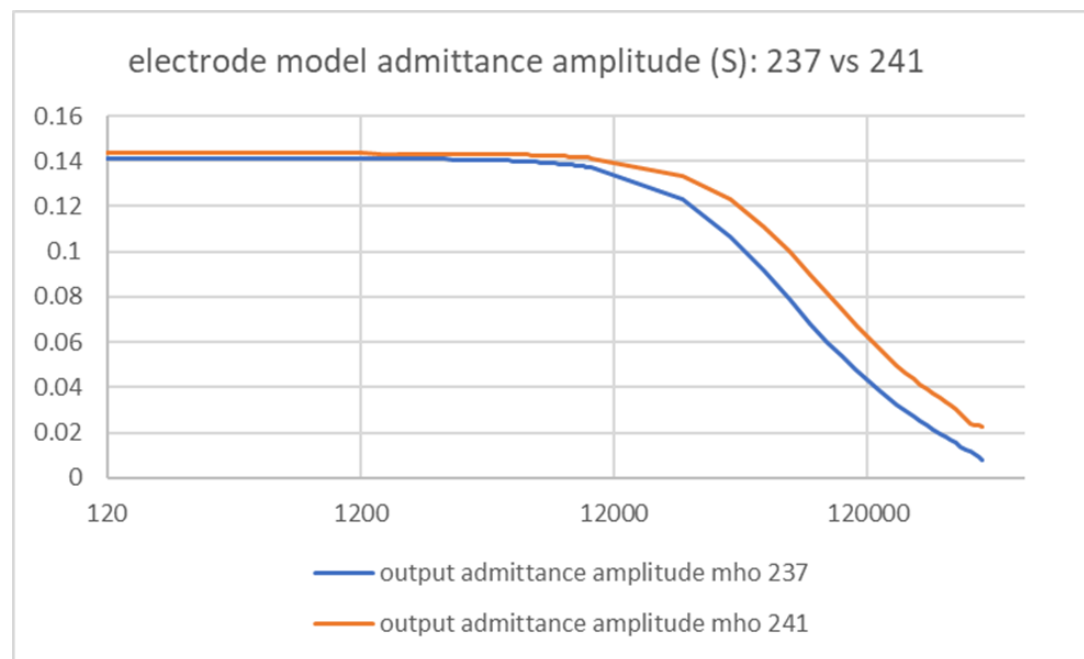
Tensão fase A,
tensão fase B,
tensão fase C

Tensão forçando as folgas de ar na torre 237 atingida pelo raio na hipótese de nenhum flashover (tensão prospectiva)

Se a suportabilidade do isolamento fosse infinita (nenhum flashover habilitado no modelo, a tensão prospectiva de pico no isolamento (fase A) atinge 2697 kV_p, ou seja, acima da capacidade suportável de isolamento da linha (2520 kV_p para tensão de pico negativa)

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Resultado das simulações no ATPDraw para avaliação do desempenho às descargas atmosféricas – Torre 237 (estaiada)



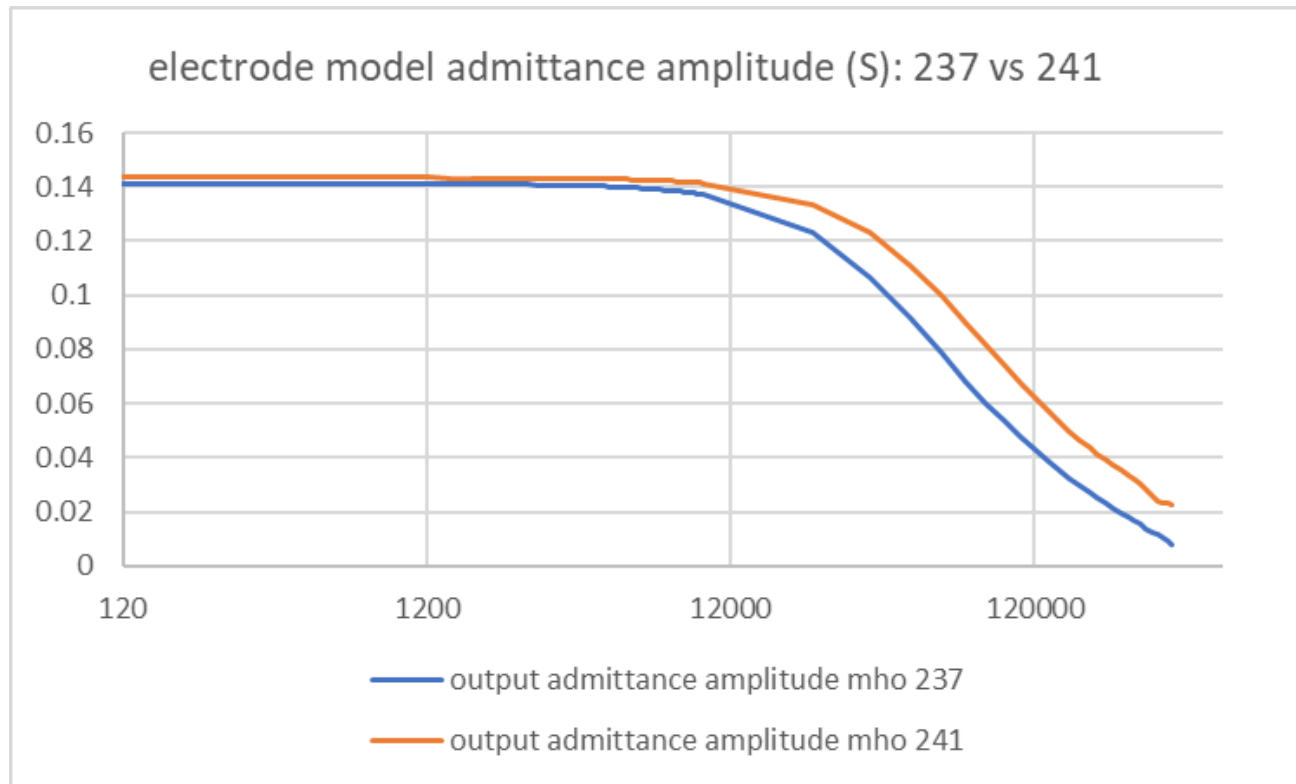
Admit, tensão
fase B, tensão
fase C

Tensão forçando as folgas de ar na torre 237 atingida pelo raio na hipótese de nenhum flashover (tensão prospectiva)

Se a suportabilidade do isolamento fosse infinita (nenhum flashover habilitado no modelo, a tensão prospectiva de pico no isolamento (fase A) atinge 2697 kV_p, ou seja, acima da capacidade suportável de isolamento da linha (2520 kV_p para tensão de pico negativa)

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

- Comparação do desempenho a descarga para um eletrodo sozinho:
 - eletrodo da Torre 241 vs eletrodo da Torre 237



Amplitude da admitância (S) do eletrodo 237
Amplitude da admitância (S) do eletrodo 241
(admitância versus frequência f, escala logaritmica)

A comparação da amplitude da admitância de ambos os eletrodos de terra mostra que, principalmente em altas frequências, a admitância do eletrodo 237 é menor que a do eletrodo 241, ou seja, a impedância do eletrodo 241 é menor que a do eletrodo 237.

DESENVOLVIMENTO PROJETO: Desenvolvimento do Estudo

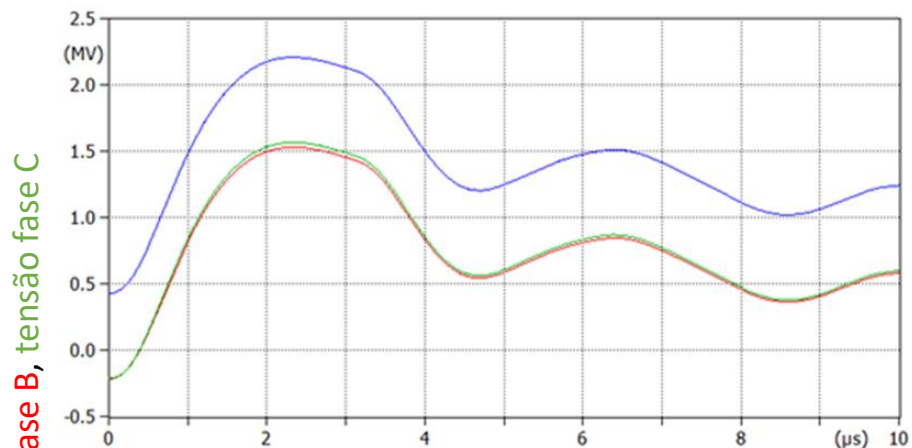
- Conclusões da aplicação do modelo de eletrodos de aterramento para simulação de desempenho de descargas atmosféricas
- ✓ As duas torres, 241 e 237, têm desempenhos diferentes, devido ao comportamento de seus respectivos eletrodos de aterramento: o da torre 237 é menos eficaz que o da torre 241.
- ✓ A comparação da amplitude da admitância de ambos os eletrodos de terra mostra que, principalmente em altas frequências, a admitância do eletrodo 237 é menor que a do 241.
- ✓ Para o impulso de corrente de descarga atmosférica especificamente aplicado a esta simulação (um impulso de corrente muito elevado associado a uma probabilidade de ultrapassagem de 5%), a torre 237 dispara, enquanto a torre 241 não dispara.

- Descrição do Problema
- Escopo do Projeto
- Requisitos ANEEL
- Desenvolvimento do Projeto
- Resultados**
- Conclusões

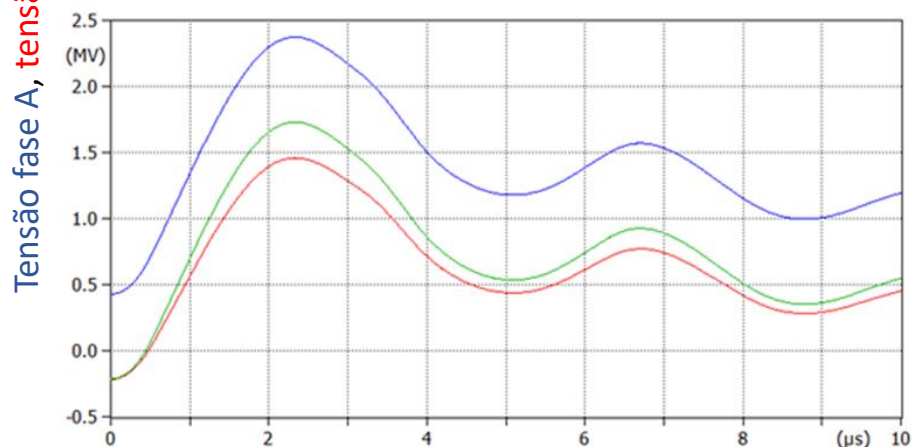
RESULTADOS

➤ Provisão para melhoria do eletrodo de aterramento

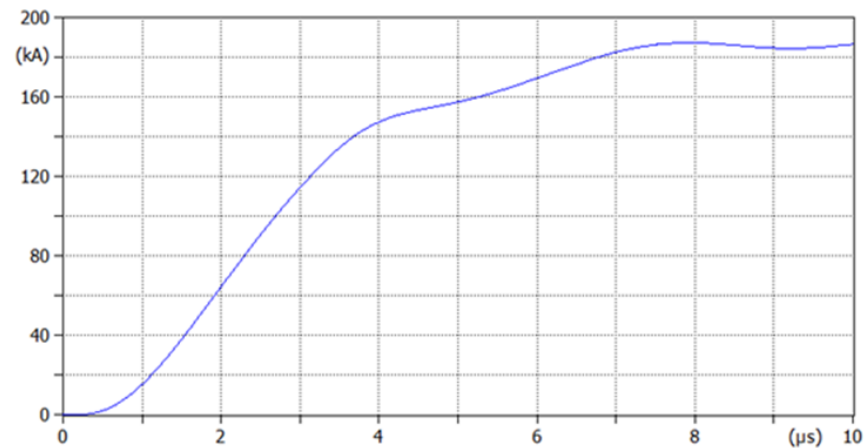
- ✓ **Adição de contrapesos**, similar ao já instalado, mas dispostas ortogonalmente ao eixo da linha (os atuais contrapesos são dispostos paralelamente ao eixo).



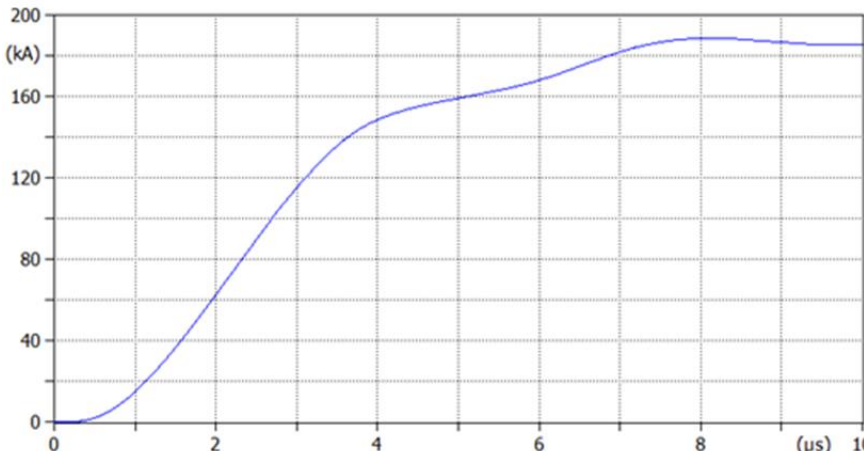
(file GR_241_2add_LGHT5.p4; x-var t) v:XX0042-X0035A v:XX0042-X0035B v:XX0042-X0035C



(file GR_237_2add_LGHT5.p4; x-var t) v:XX0030-X0023A v:XX0030-X0023B v:XX0030-X0023C



(file GR_241_2add_LGHT5.p4; x-var t) c:ELECTR-DOWNGR



(file GR_237_2add_LGHT5.p4; x-var t) c:ELECTR-DOWNGR

Torre 241 (autoportante)

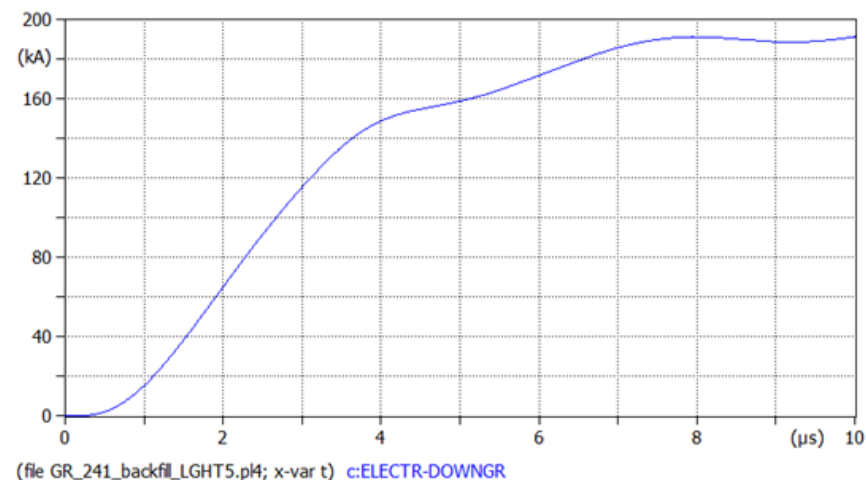
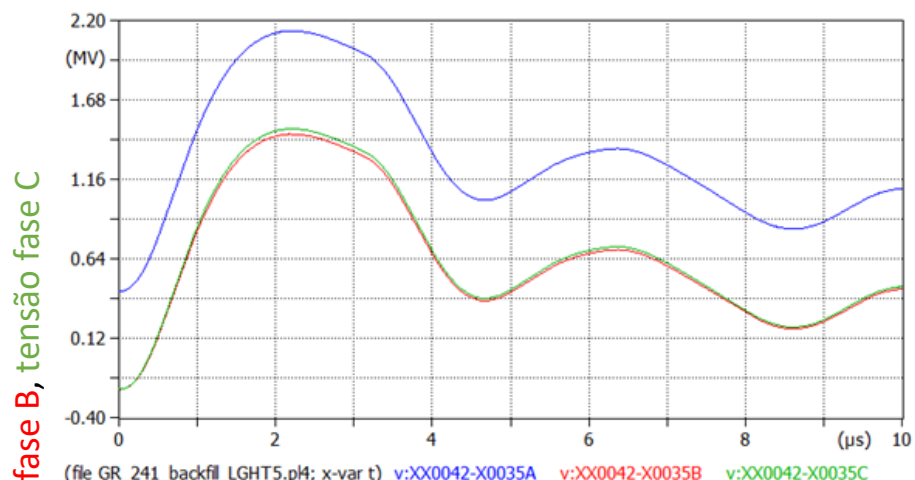
- Esquerda: Tensão forçando as folgas de ar na torre atingida pelo raio
- Direita: Corrente fluindo para o eletrodo de aterramento da torre atingida pelo raio

Torre 237 (estaiada)

- Esquerda: Tensão forçando as folgas de ar na torre atingida pelo raio
- Direita: Corrente fluindo para o eletrodo de aterramento da torre atingida pelo raio

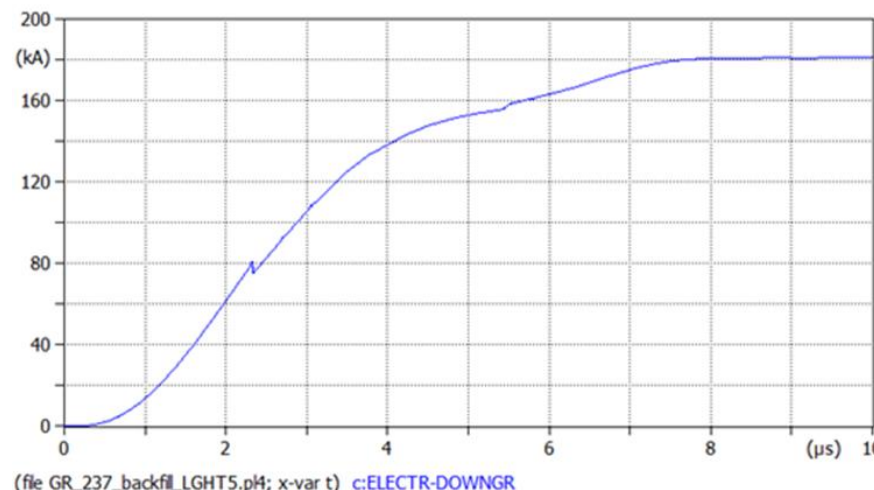
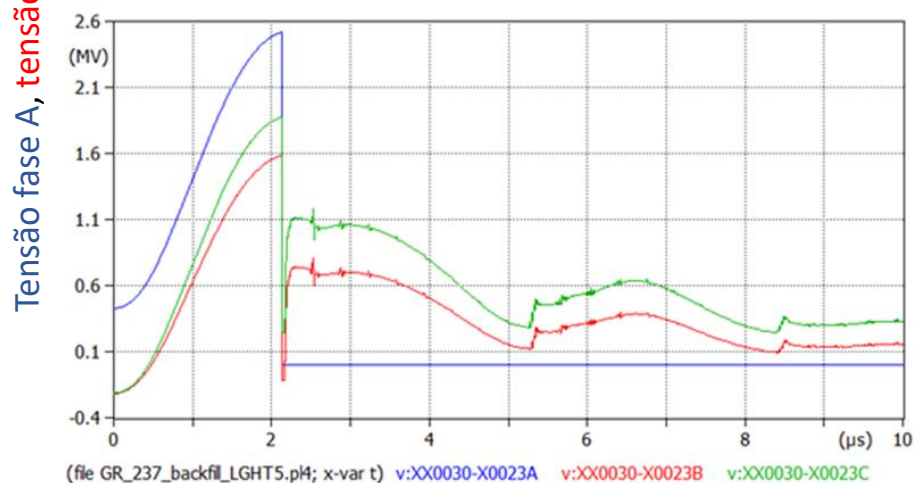
RESULTADOS

- Provisão para melhoria do eletrodo de aterramento
- ✓ **Aplicação de preenchimento condutivo** ao redor do contrapeso existente



Torre 241 (autoportante)

- Esquerda: Tensão forçando as folgas de ar na torre atingida pelo raio
- Direita: Corrente fluindo para o eletrodo de aterramento da torre atingida pelo raio

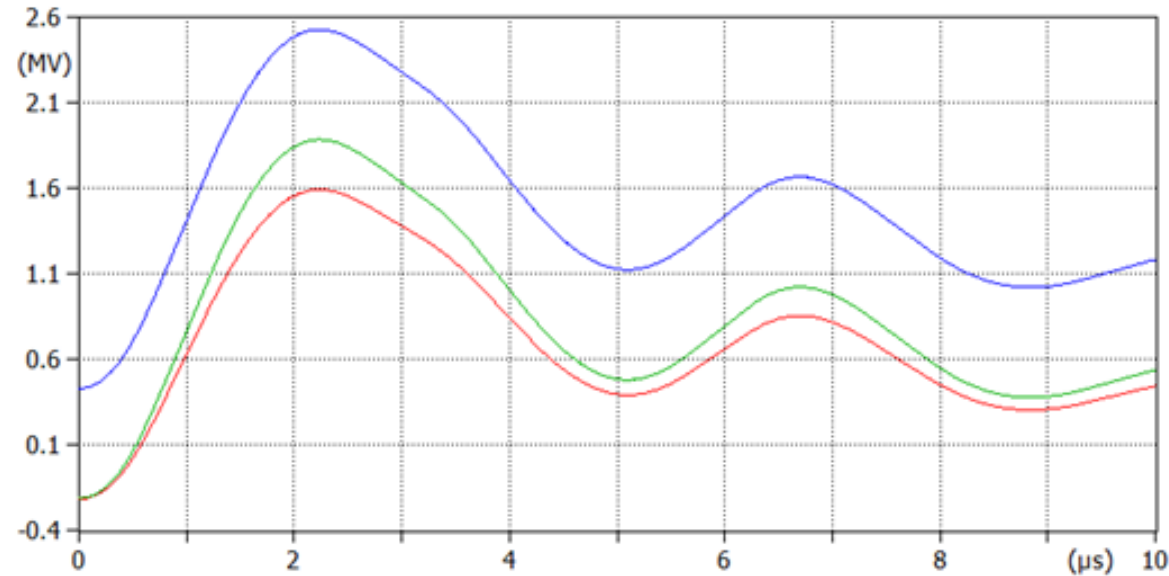


Torre 237 (estaiada)

- Esquerda: Tensão forçando as folgas de ar na torre atingida pelo raio
- Direita: Corrente fluindo para o eletrodo de aterramento da torre atingida pelo raio

RESULTADOS

- Provisão para melhoria do eletrodo de aterramento
- ✓ **Aplicação de preenchimento condutivo** ao redor do contrapeso existente



(file GR_237_backfil_LGHT5_prospective.pl4; x-var t) v:XX0030-X0023A v:XX0030-X0023B
v:XX0030-X0023C

Tensão fase A, tensão fase B, tensão fase C

Tensão forçando as folgas de ar na torre 237 atingida pelo raio na hipótese de nenhum flashover (tensão prospectiva)

RESULTADOS

- Conclusões sobre aplicação de disposições para melhorar o desempenho às descargas atmosféricas

Tensão de pico estressando o isolamento da linha (tensão real e potencial)			
Tipos de eletrodo de aterramento			
Torre	Original (modelo das medições)	Adição de dois contrapesos em paralelo	Aplicação de preenchimento condutivo
241 (autoportante)	2438 kV_p (sem flashover)	2208 kV_p (9.5% de redução) (sem flashover)	2132 kV_p (13% de redução) (sem flashover)
237 (estaiada)	2697 kV_p prospectivo (flashover)	2374 kV_p (12% de redução) (sem flashover)	2528 kV_p prospectivo (6.3% de redução relativa a prospecção original) (flashover)

AGENDA

- Descrição do Problema
- Escopo do Projeto
- Requisitos ANEEL
- Desenvolvimento do Projeto
- Resultados
- Conclusões

CONCLUSÕES

- As seguintes conclusões foram tiradas desta pesquisa:
 - O comportamento dos eletrodos de aterramento das torres da linha de 500kV é muito complexo e varia dependendo da forma dos eletrodos, do material e principalmente das características do solo.
 - As características do solo mudam com o tempo principalmente devido à condição ambiental: seco e úmido. A diferença pode ser muito grande dependendo do tipo de solo.
 - Para altos valores de corrente injetada no eletrodo e dispersa no solo, a ionização do solo provoca uma diminuição da resistência de aterramento e um comportamento capacitivo que prevalece sobre o indutivo.
 - Uma metodologia sofisticada para a medição da impedância de aterramento de torres de linha em serviço foi desenvolvida em detalhes, e uma instrumentação e ferramentas adequadas para tais medições pela aplicação de um impulso de tensão/corrente e uma análise de resposta em frequência foram adquiridas.
 - Foram realizadas duas campanhas de medição em campo:
 - o primeiro apenas para verificar o desempenho das ferramentas e instrumentos e os arranjos do circuito de medição.
 - o segundo para obter as medições do comportamento do eletrodo de aterramento
 - A ferramenta de teste de impulso teve uma falha, devido às altas tensões.

CONCLUSÕES

- As seguintes conclusões foram tiradas desta pesquisa:
 - A análise de varredura de frequência foi totalmente bem-sucedida, mas a corrente injetada no eletrodo foi muito menor do que a que poderia ter sido aplicada pelo gerador de impulsos que falhou. Este teste de resposta em frequência não foi adequado para atingir a ionização do solo.
 - A elaboração dos resultados de medição disponíveis foi bem-sucedida: uma rotina de melhor ajuste muito eficaz e poderosa disponibilizada no ATPDraw funciona muito bem para modelar qualquer admitância versus frequência.
 - A elaboração das medições é bastante complexa para finalmente obter o modelo do eletrodo sozinho como admitância versus frequência, separado da admitância de sua torre superior conectada ao restante da linha.
 - O modelo do eletrodo foi finalmente desenhado para duas torres: uma torre autoportante (241) e uma torre estaiada (237).
 - A aplicação, em ATPdraw, de tais modelos ao modelo completo da linha com as torres, os vãos da linha e as torres adjacentes deu resultados prováveis em termos de formas de onda de sobretensão no isolamento da linha.
 - Os resultados das simulações de desempenho às descargas atmosféricas aplicando uma corrente de impulso, deram um desempenho semelhante dos eletrodos das duas torres em termos de forma.

CONCLUSÕES

- As seguintes conclusões foram tiradas desta pesquisa:
 - No entanto a impedância de aterramento da torre estaiada apresentou um resultado maior do que a da torre autoportante, suficiente para causar o flashover do isolamento da linha.
 - Dois tipos de provisões foram investigadas para melhorar o desempenho de iluminação dos eletrodos, a fim de diminuir o estresse de sobretensão e tentar evitar o flashover da torre 237:
 - acrescentando contrapesos, semelhantes aos já instalados, mas dispostos ortogonalmente ao eixo da linha.
 - aplicação de um preenchimento condutivo adequado (enchimento) em torno dos contrapesos presentes.
 - Os resultados são opostos para as duas torres examinadas:
 - Torre 241 (autoportante): o melhor resultado é a aplicação do preenchimento condutivo aos contrapesos existentes.
 - Torre 237 (estaiada): o melhor resultado é a adição de dois contrapesos ortogonais ao eixo da linha. A aplicação de dois contrapesos adicionais evita o flashover da isolação da linha, enquanto a aplicação do preenchimento condutivo ao eletrodo de aterramento existente não é suficiente para este escopo.



OBRIGADO!

Dúvidas e sugestões: beatriz.vieira@cesi.it



Milan · Arnhem · Berlin · Mannheim · Prague · Dubai · Dammam · Santiago de Chile · Rio De Janeiro · Knoxville (USA) · Chalfont · Shanghai