

Capacidade dinâmica de linhas aéreas Perspectivas e Uso de Tecnologias Existentes

Palestrante: Carlos Do Nascimento – Cemig GT

REALIZAÇÃO:

1. Conceitos básicos de projeto de Linha Aérea
2. Ampacidade de Linha Aérea
 - a. Método Determinístico (Static Line Rating – **SLR**)
 - b. Capacidade Dinâmica (Dynamic Line Rating – **DLR**)
 - c. Exemplo 1: Gêmeos Digitais com Dynamic Line Rating (**DLR**)
3. Saúde Estrutural de Linha Aérea
 - a. Método Vibracional – (Dynamic Line Rating Health – **DLR-H**)
 - b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE com Dynamic Line Rating Health (**DLR-H**)
4. Estado da Arte em **DLT** e **DLT-H**

conceitos básicos de projeto de Linha Aérea (5')

catenária no projeto eletromecânico

condutores

convencionais

envelhecimento

não convencionais

climatologia relacionada

dados históricos

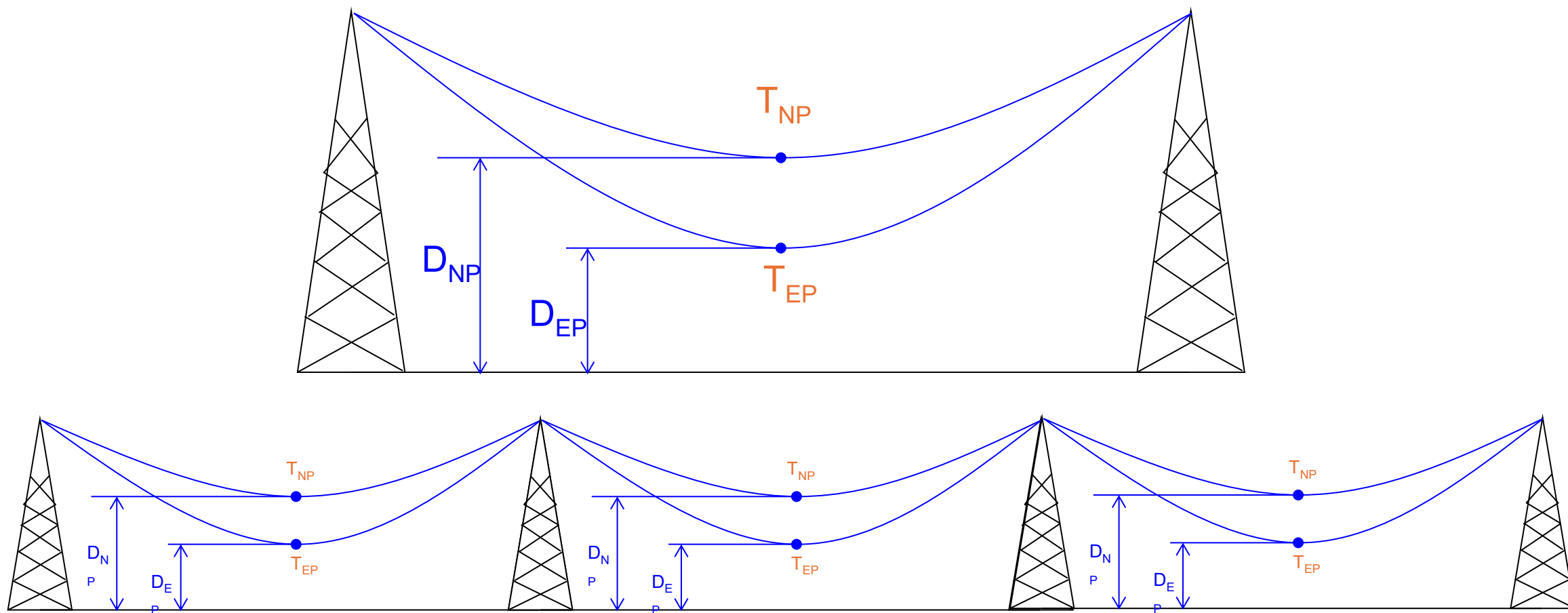
dados simulados

dados de modelos de previsão

monitoramento em tempo real

REALIZAÇÃO:

catenária no projeto eletromecânico



REALIZAÇÃO:

condutores “convencionais”

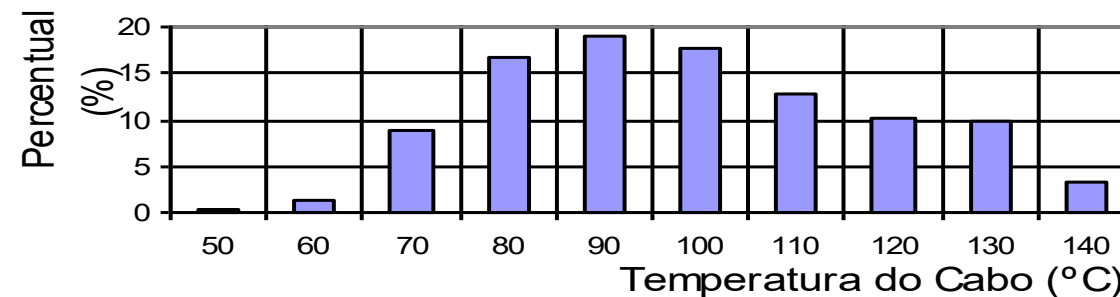


Temperatura: até 93 °C

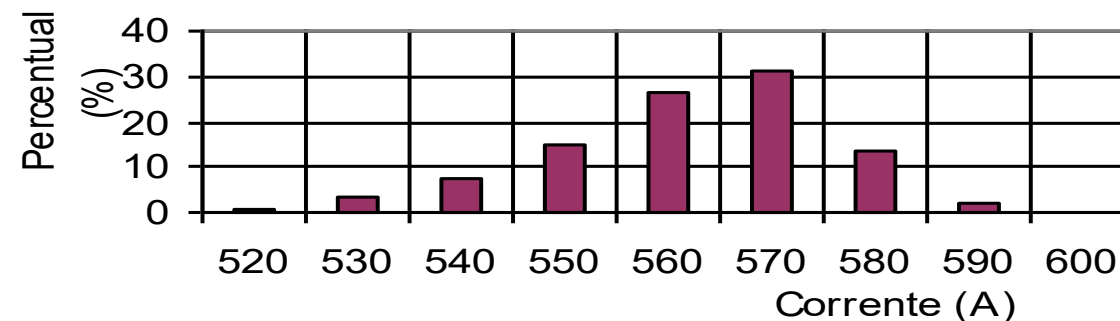
Flecha: Aço + Al 1350



Distribuição dos valores de temperatura do cabo

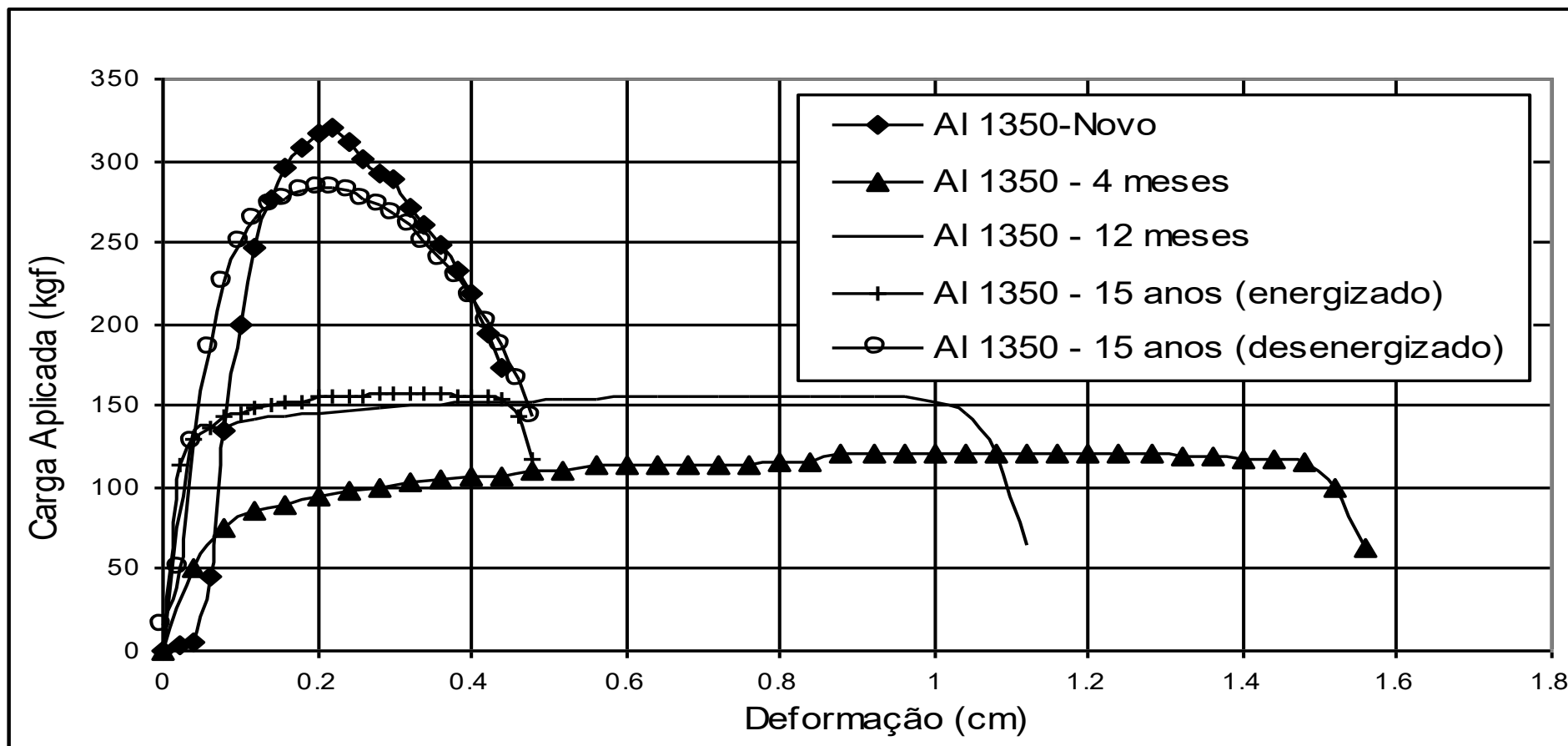


Distribuição dos valores de corrente na LT Experimental



REALIZAÇÃO:

condutores “envelhecimento”



REALIZAÇÃO:

condutores “não convencionais”



- Low sag
- Double amp
- Easy install

12.000 km
supplied

INVAR CORE

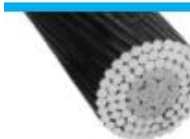
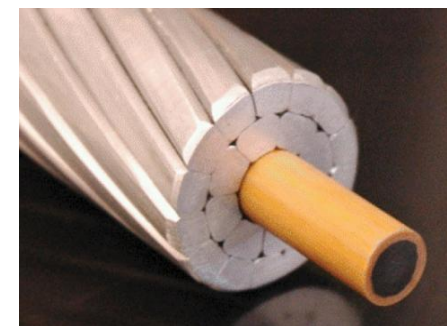


ACSS

Material metálico



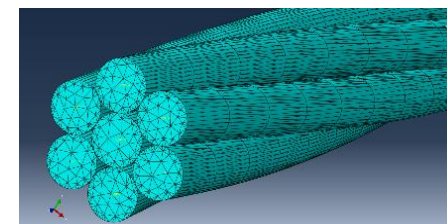
HTLS – GZTACSR



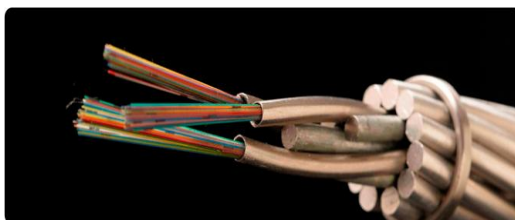
Coloured
Low visual impact



Sandblasted
Low corona effect



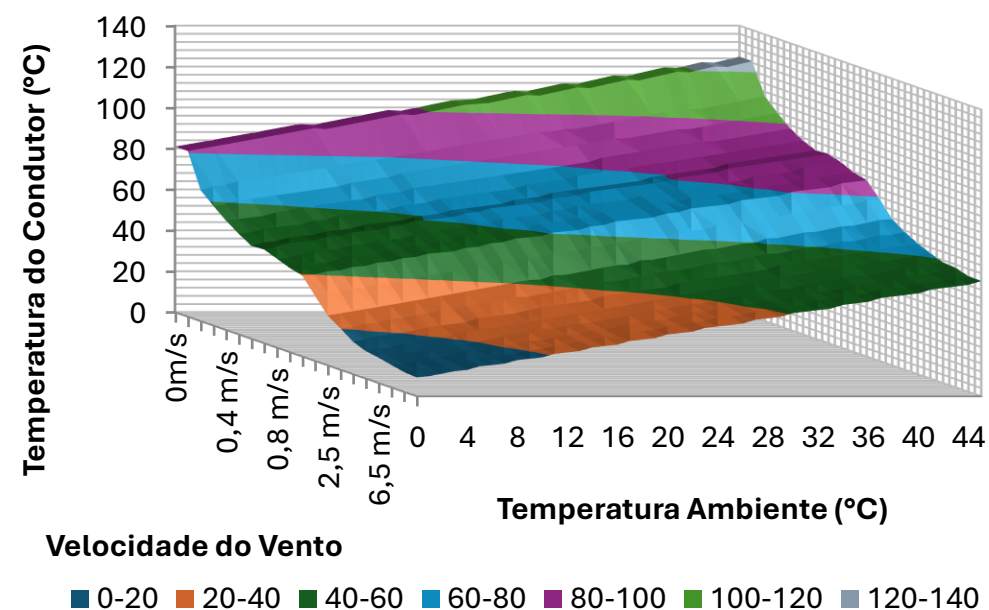
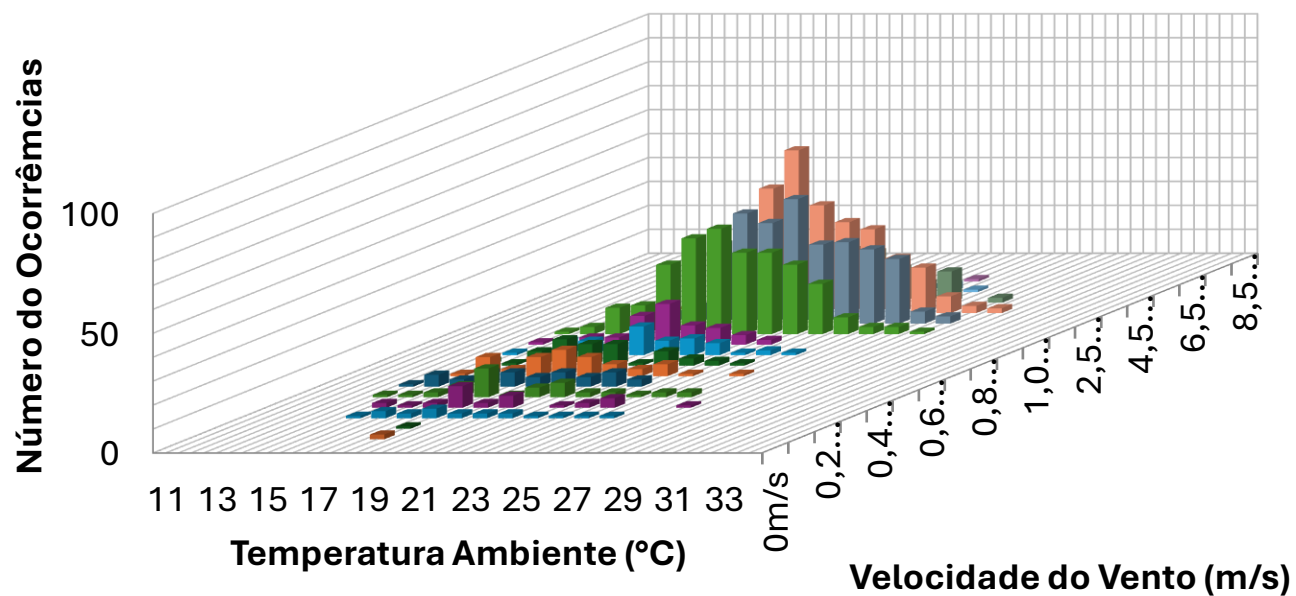
Material não metálico



Diversos materiais

REALIZAÇÃO:

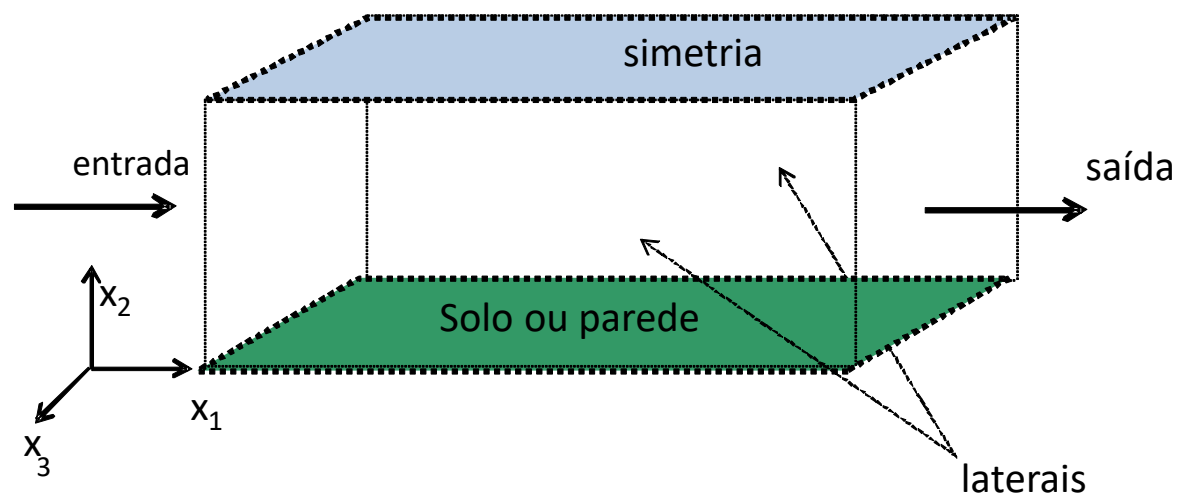
climatologia “dados históricos”



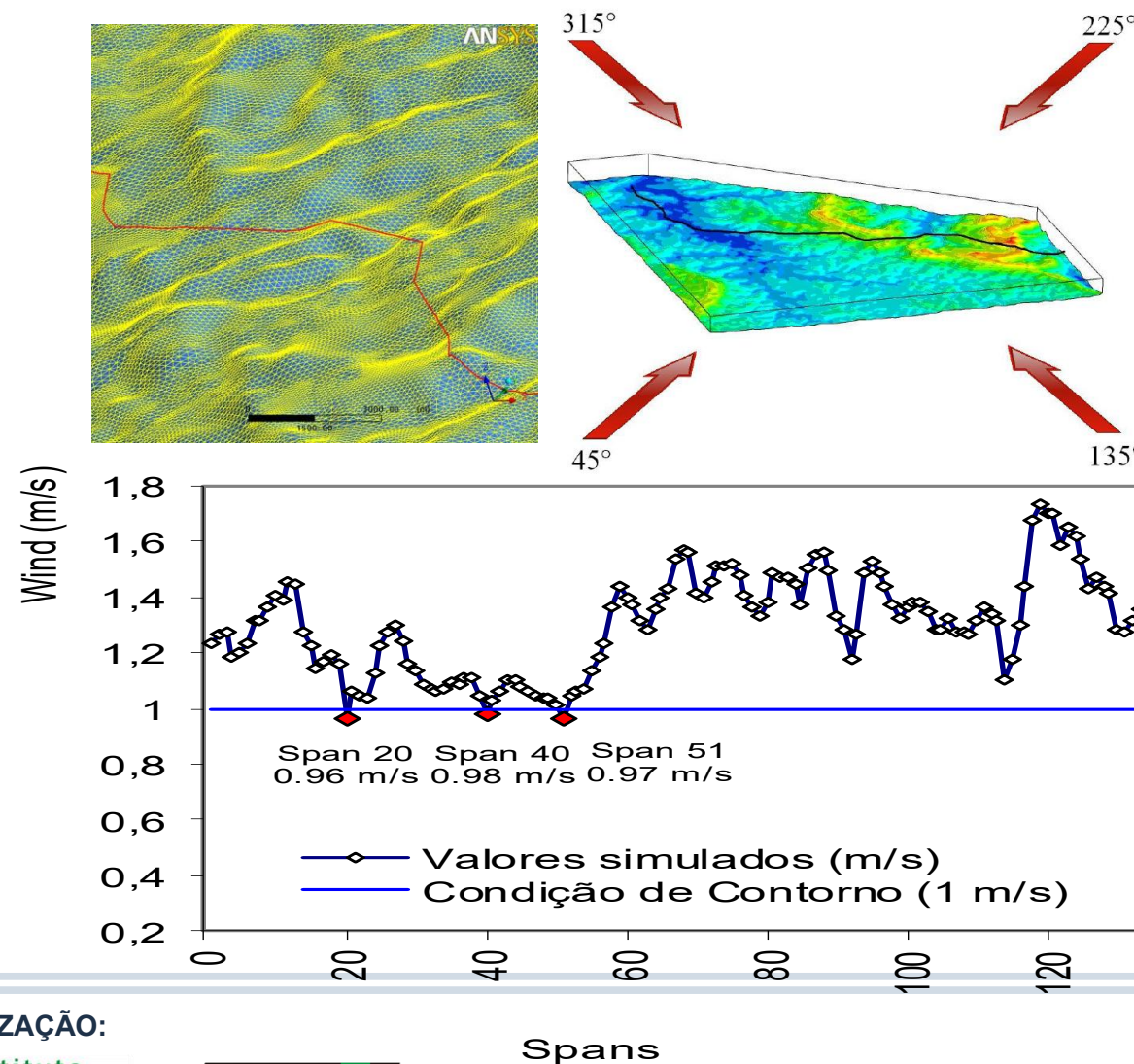
REALIZAÇÃO:

climatologia “dados simulados”

Estudo da Camada Limite Atmosfera



ABL by CFD



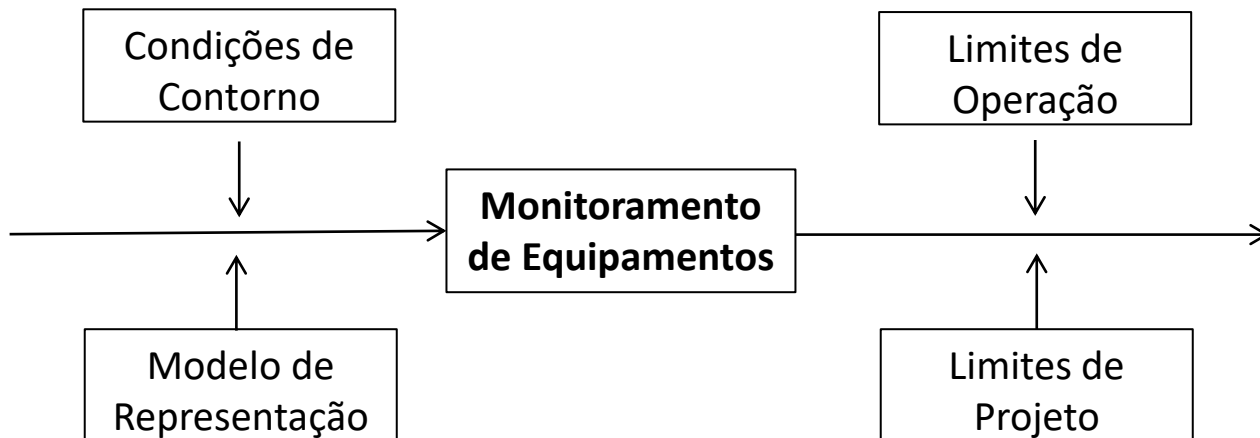
REALIZAÇÃO:

climatologia “dados de modelos previsão”

- ✓ Modelos de processamento climatológicos, grande, média e pequena, escalas (disponíveis APIs em internet)
- ✓ Modelos proprietários com regressão linear
- ✓ Modelos proprietários com redes neurais
- ✓ Dados de estações climatológicas terrestres
- ✓ Dados de estações espaciais (satélites e nano satélites)

REALIZAÇÃO:

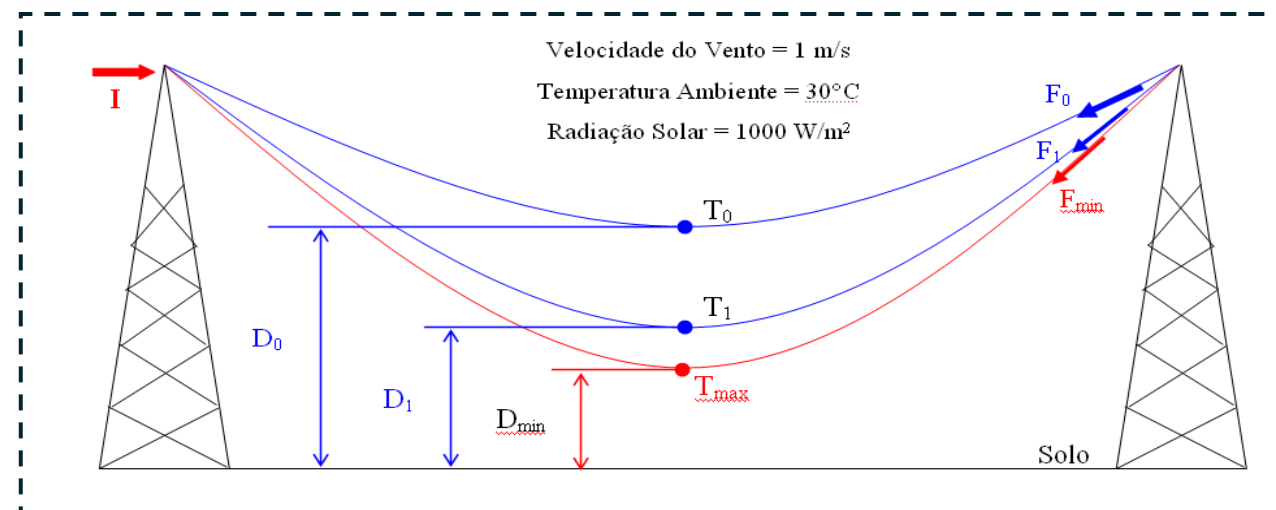
monitoramento em tempo real



Medições físicas diretas da Linha Aérea

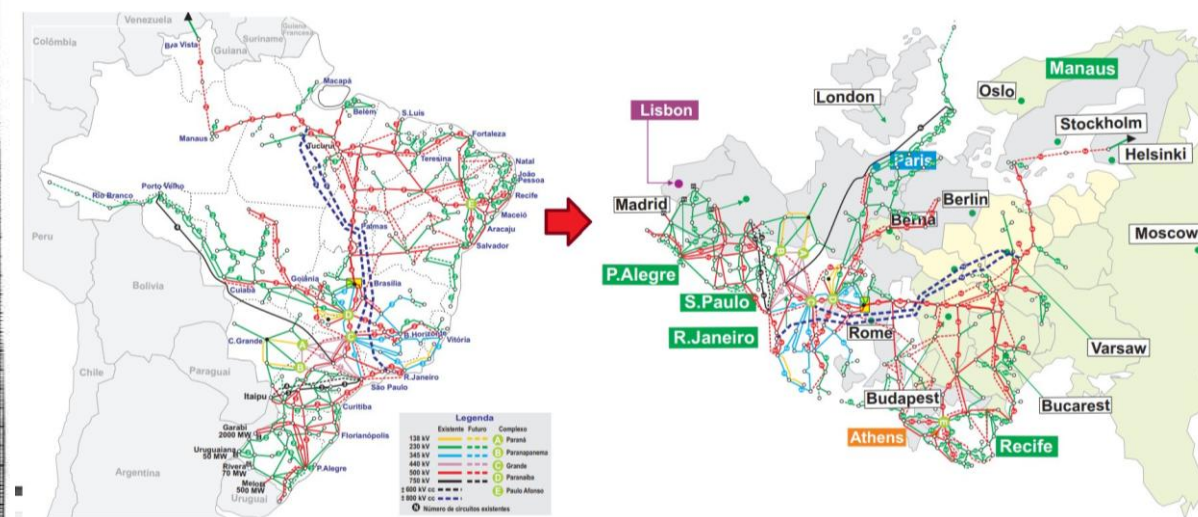
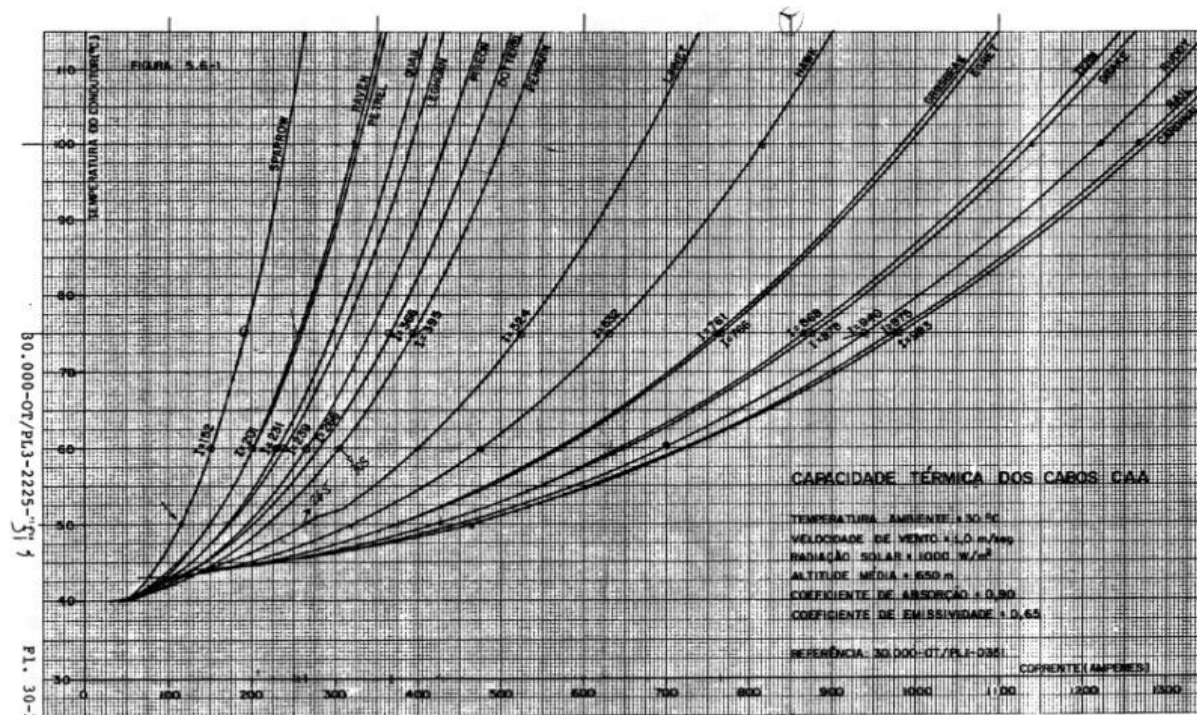


Medições indiretas por meio de outras variáveis



REALIZAÇÃO:

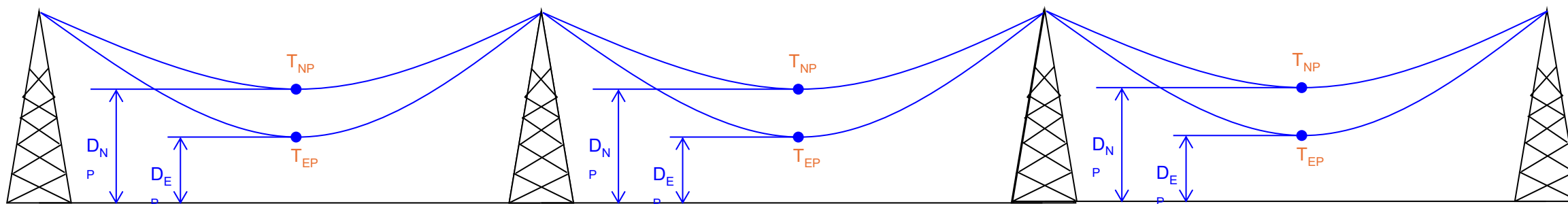
2.a Ampacidade: Static line rating - SLR



Ábaco de Ampacidade: Corrente (A) X Temperatura do condutor (°C) para diversos condutores.

REALIZAÇÃO:

2.a Método Determinístico de Ampacidade Static line rating - SLR



Região de maiores velocidades dos ventos

Região de menores velocidades dos ventos

Vãos Críticos de Altura Condutor ao Solo

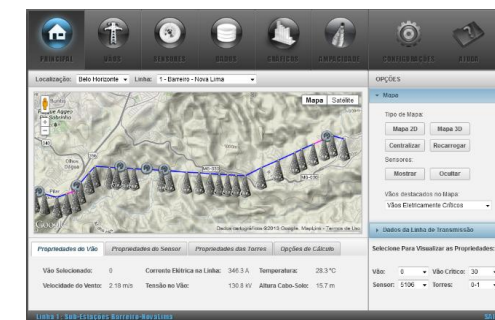
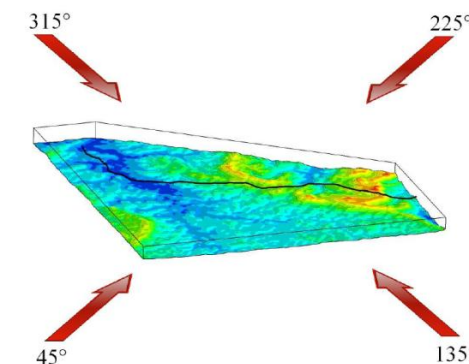
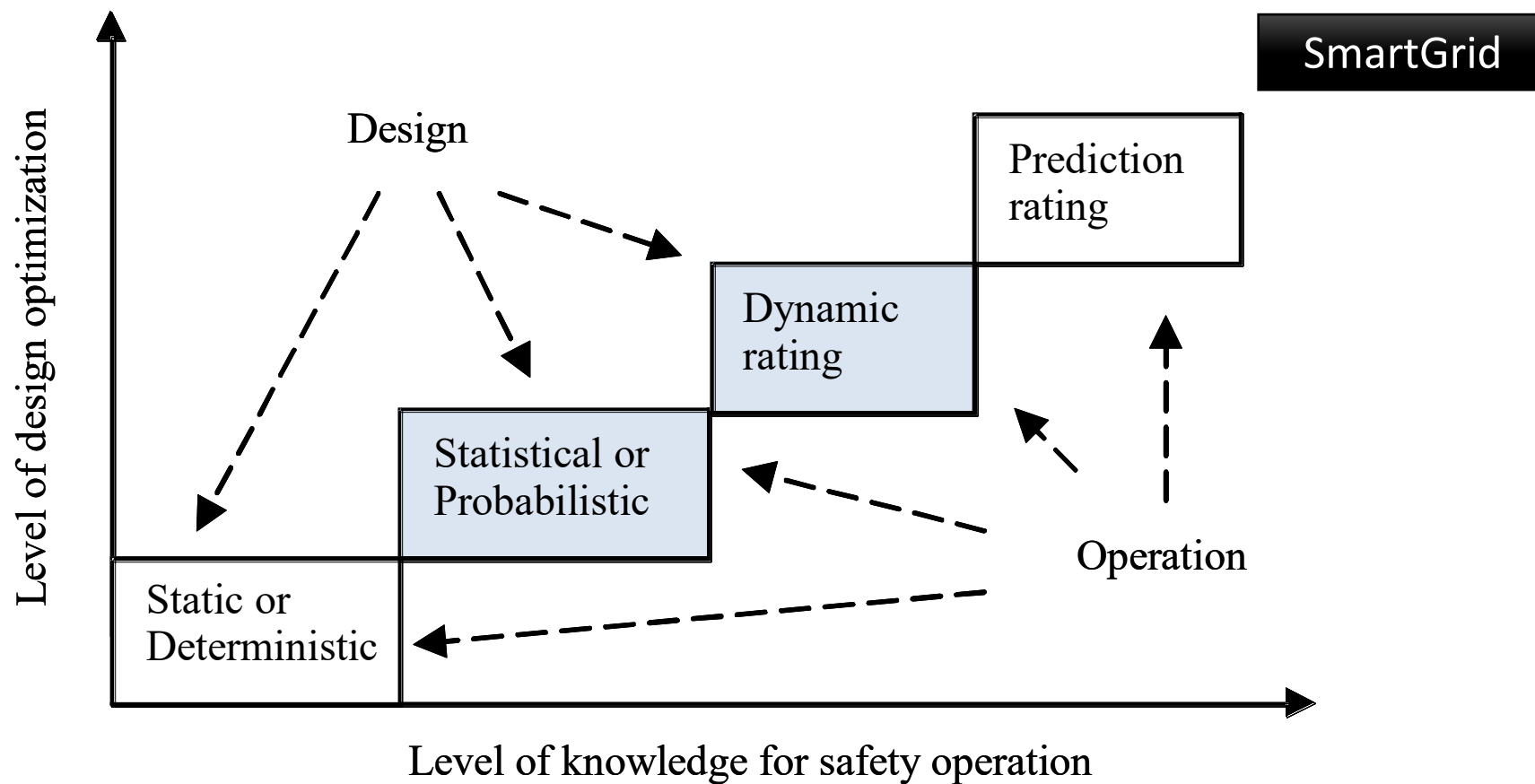
Vãos com Folga de Altura Condutor ao Solo

Modelagem computacional de representação real do Projeto Eletromecânico da Linha Aérea por meio de geometria 3D ou **Gêmeos Digitais**.

Módulo computacional de dados climatológicos que representem as **variações espaciais e temporais** das principais variáveis climáticas ao longo da Linha.

REALIZAÇÃO:

2.a SLR → DLR Ampacity



REALIZAÇÃO:

2.b Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas Dynamic Line Rating - DLR

- Abordagem mais eficiente ao incorporar **variáveis meteorológicas** em tempo real para determinar a capacidade de transmissão (Ampacidade);
- Considera dinâmica das variáveis como: **temperatura do ar, velocidade e direção do vento e radiação solar (direta e difusa)**;
- Literatura IEEE 738 e CIGRE 601:

$$I = \sqrt{(q_c + q_r - q_s) / R(T_{avg})}$$

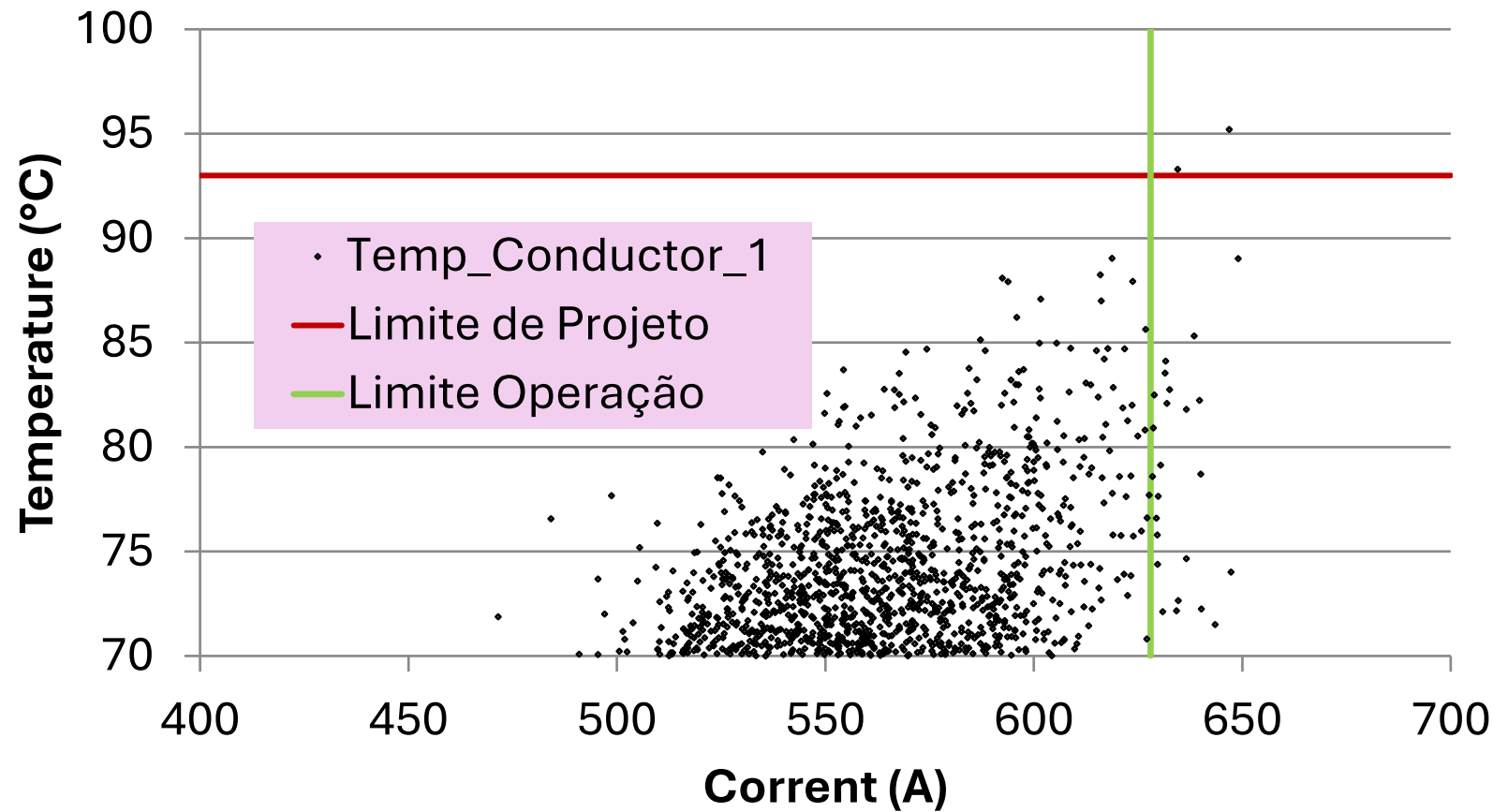
Em que:

q_c, q_r e q_s referem-se ao efeito convectivo, radioativo e solar, respectivamente;

$R(T_{avg})$ é a resistência elétrica corrigida na temperatura de operação ou temperatura máxima do condutor.

REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas (DLR) Visão didática e prática



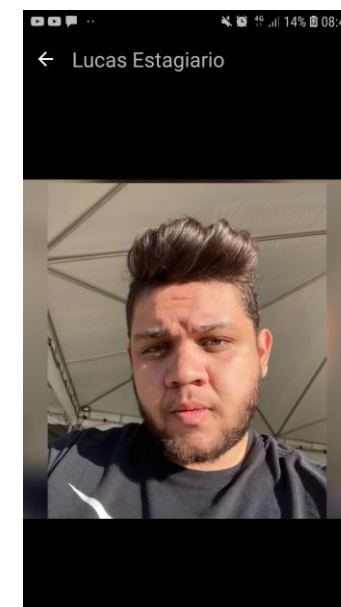
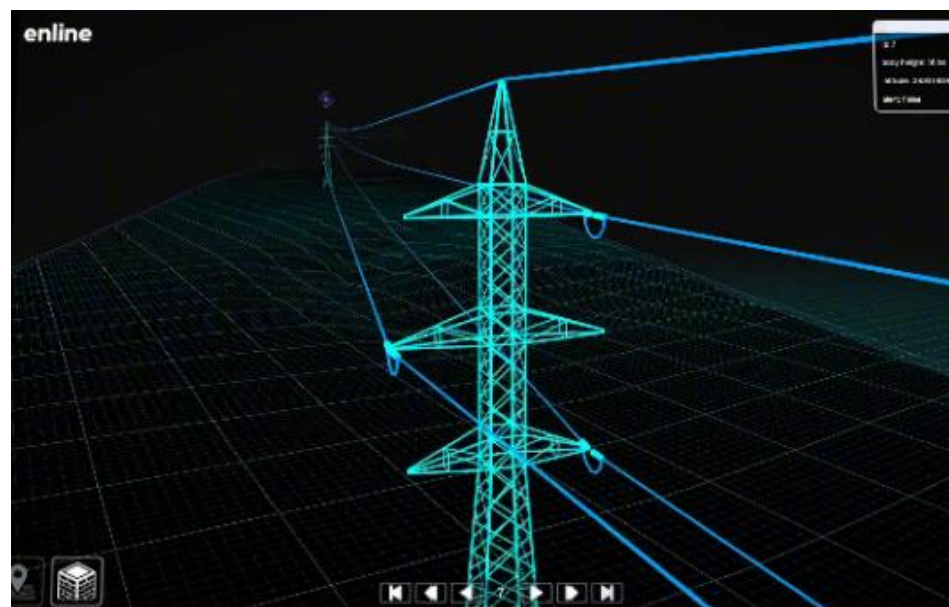
Power Donut System

$$I = \sqrt{(q_c + q_r - q_s) / R(T_{avg})}$$

REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas Construção do Gêmeo Digital

Permitem criar um **réplica virtual** de um ativo do mundo real por meio da constante transmissão de dados, assim a versão digital do ativo passa a coexistir com a versão física.

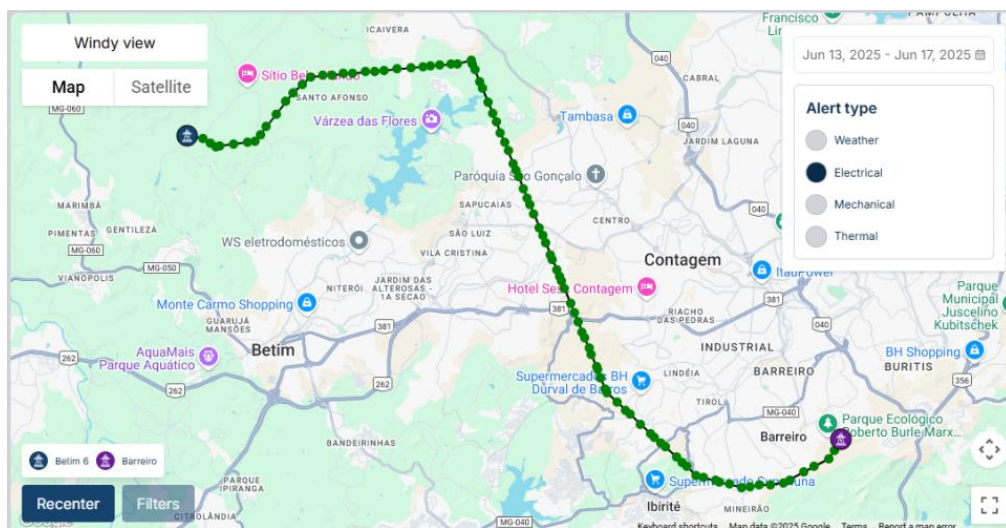


REALIZAÇÃO:

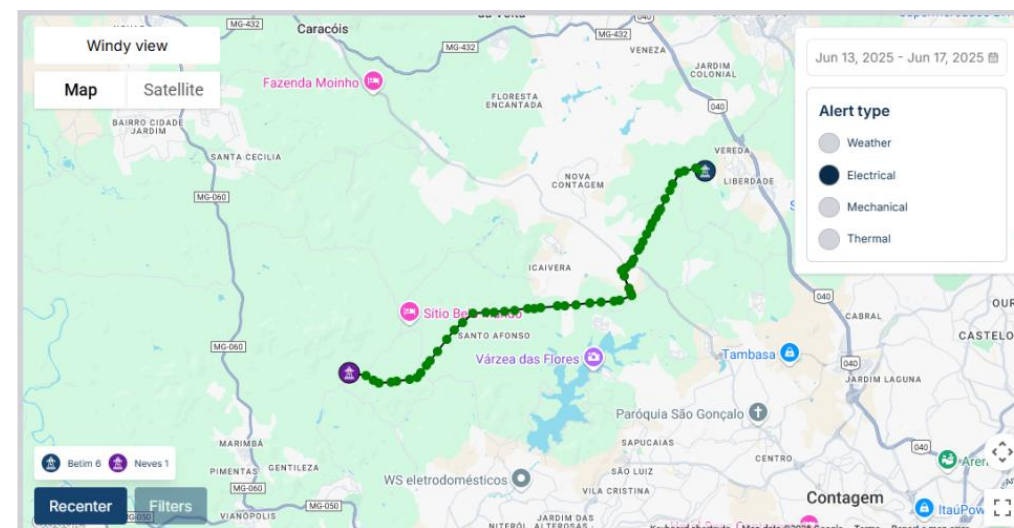
2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

Foram avaliadas as seguintes linhas (345 kV e 60 Hz) no período de janeiro de 2024 até junho de 2025:

- Betim 6 – Barreiro - 37,13 km (a)
- Betim 6 – Neves 1 - 18,75 km (b)



(a)

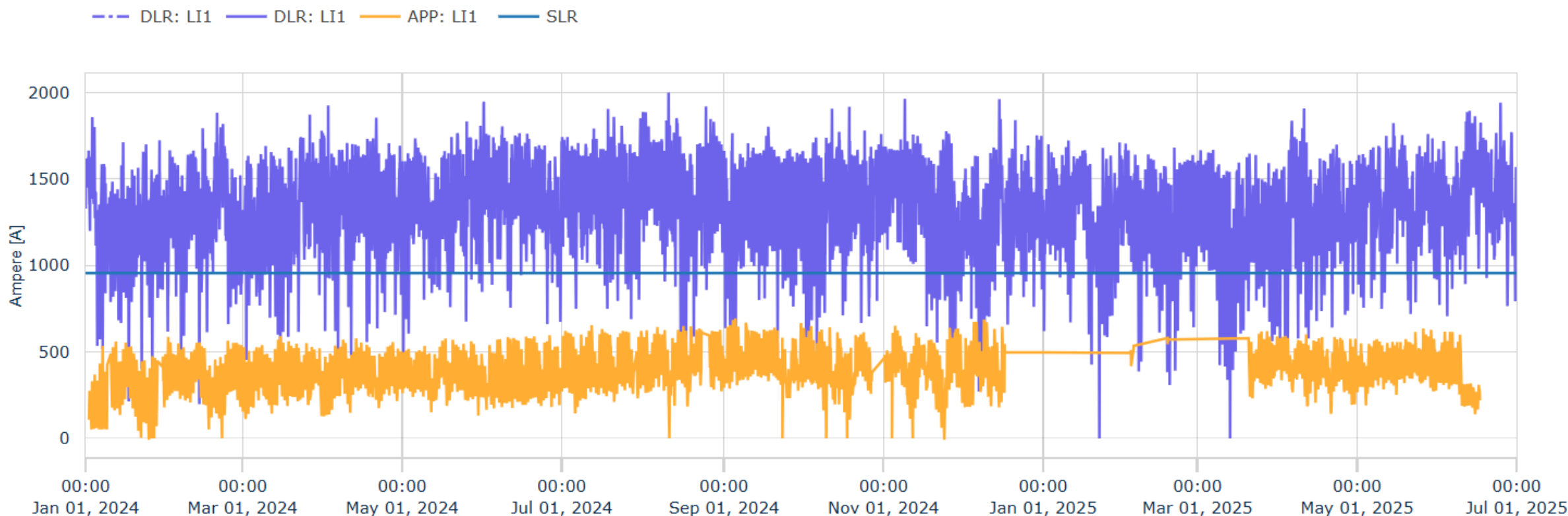


(b)

REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

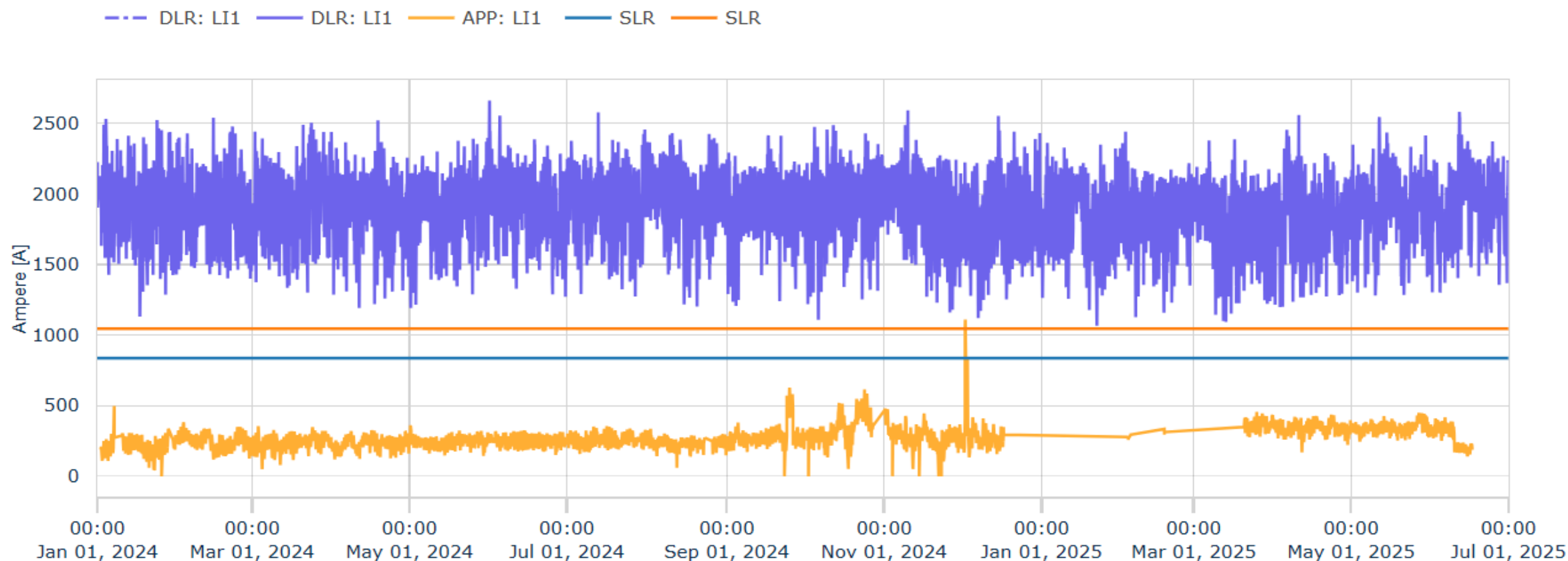
Comparação: Carregamento Real, SLR e DLR (Betim 6 – Barreiro):



REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

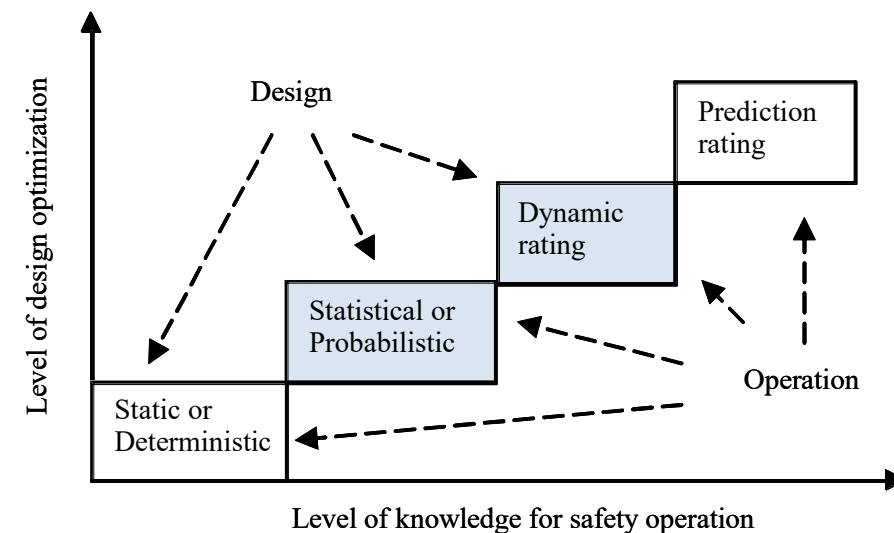
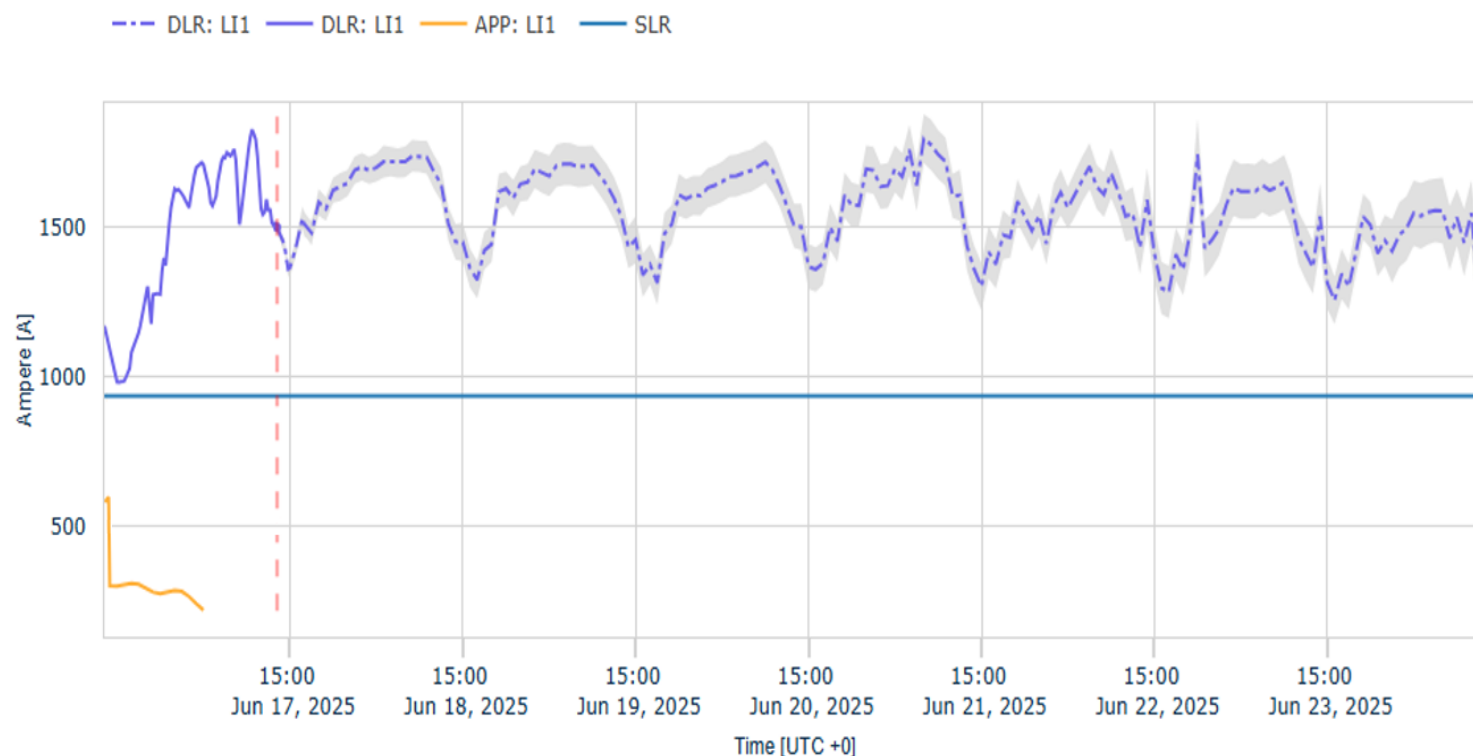
Comparação: Carregamento Real, SLR e DLR (Betim 6 – Neves 1):



REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

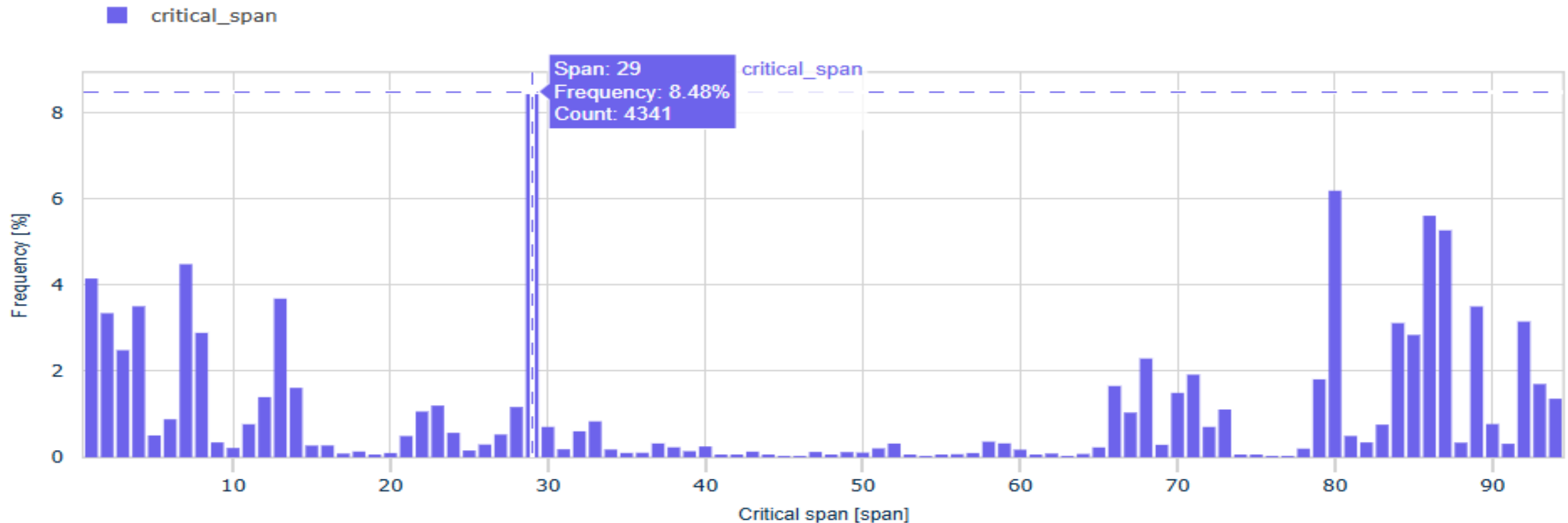
Monitoramento **Preditivo** do DLR (Betim 6 – Barreiro):



REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

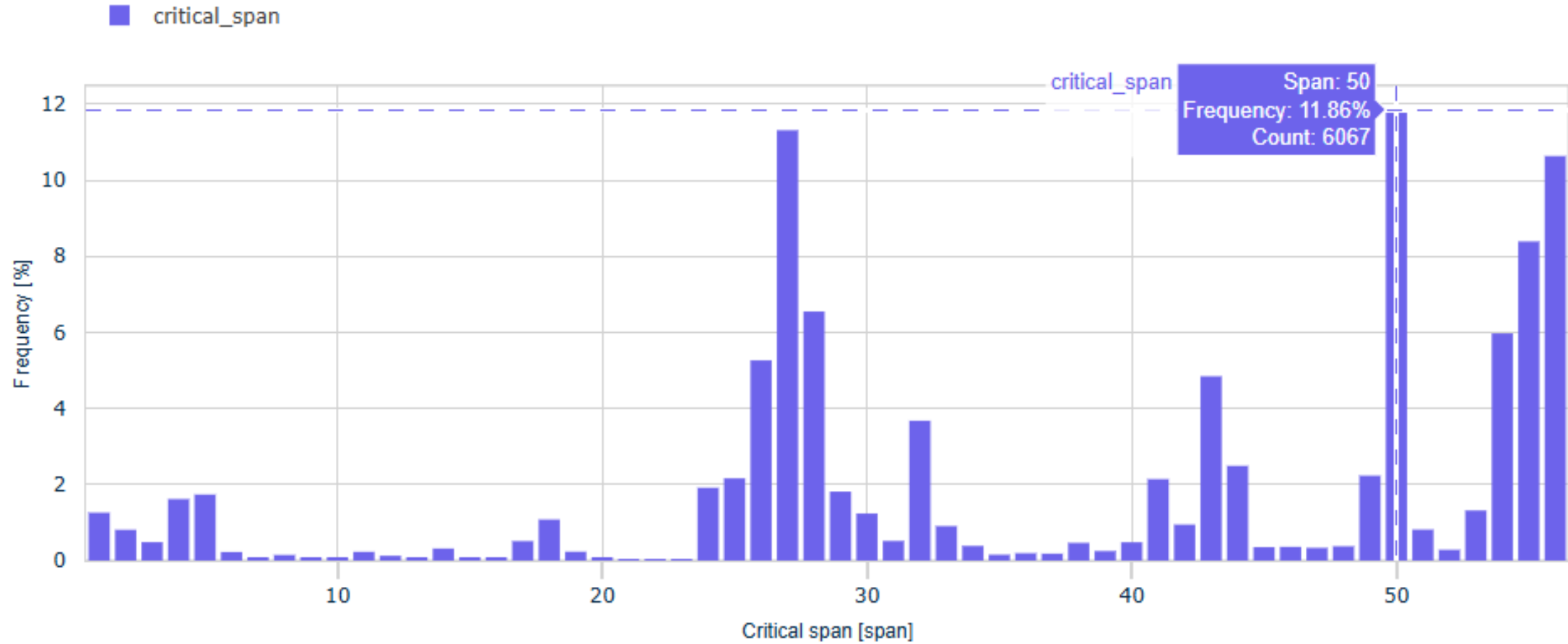
Análise do Vão Crítico (Betim 6 – Barreiro):



REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

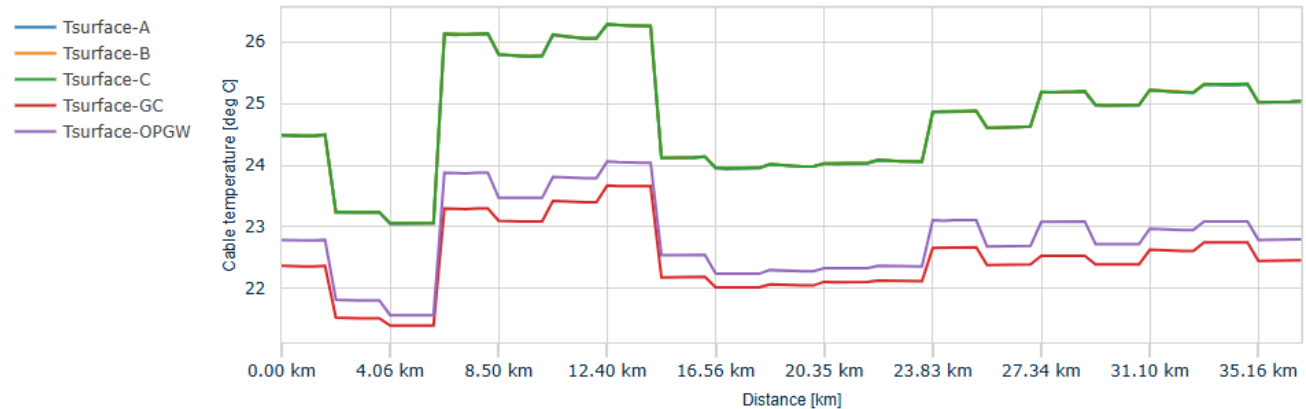
Análise do Vão Crítico (Betim 6 – Neves I):



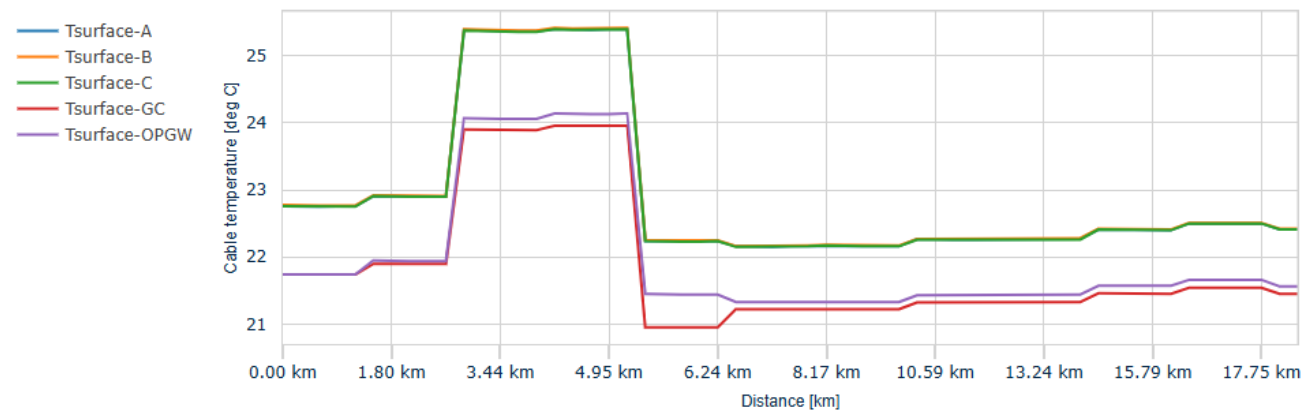
REALIZAÇÃO:

2.c Capacidade Dinâmica de Linhas Aéreas LTs dos testes

Simulação da temperatura da superfície condutor:



Betim 6 – Barreiro



Betim 6 – Neves I

REALIZAÇÃO:

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

a. Método Vibracional – Dynamic Line Rating Health – (DLR-H)



Dynamic Line rating - Health (DLR-H) system based on multiple sensor operations and algorithms. In the system, the “Health” part means that the sensors' data are also used to monitor the aging of individual network parts.

REALIZAÇÃO:



3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

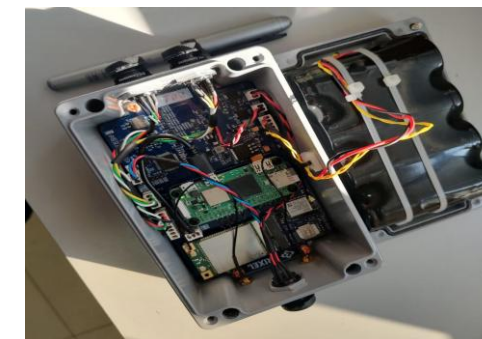
b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)

Projeto VibraTorre - Motivação

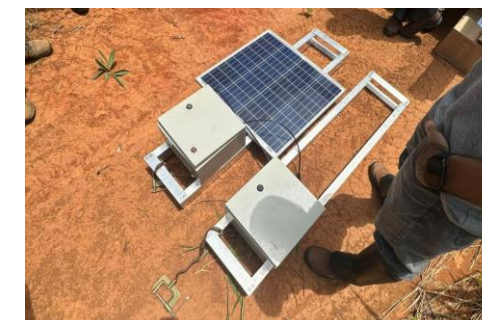
Sistema IoT para monitoramento de linhas aéreas de energia com utilização de sensores (acelerômetros, inclinômetros, estações meteorológicas, etc.), propiciando a implementação de estratégias mais eficazes de manutenção preditiva preventiva e corretiva.



Exemplo de riscos envolvidos em estruturas sem monitoramento: (A) Vandalismo; (B) Erosão na base; (C) Falha em isolador; (D) Colisão agrícola.



(A)



(B)

Versões do VibraTorre (VT).
(A) VT Slim e (B) VT Protótipo

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)

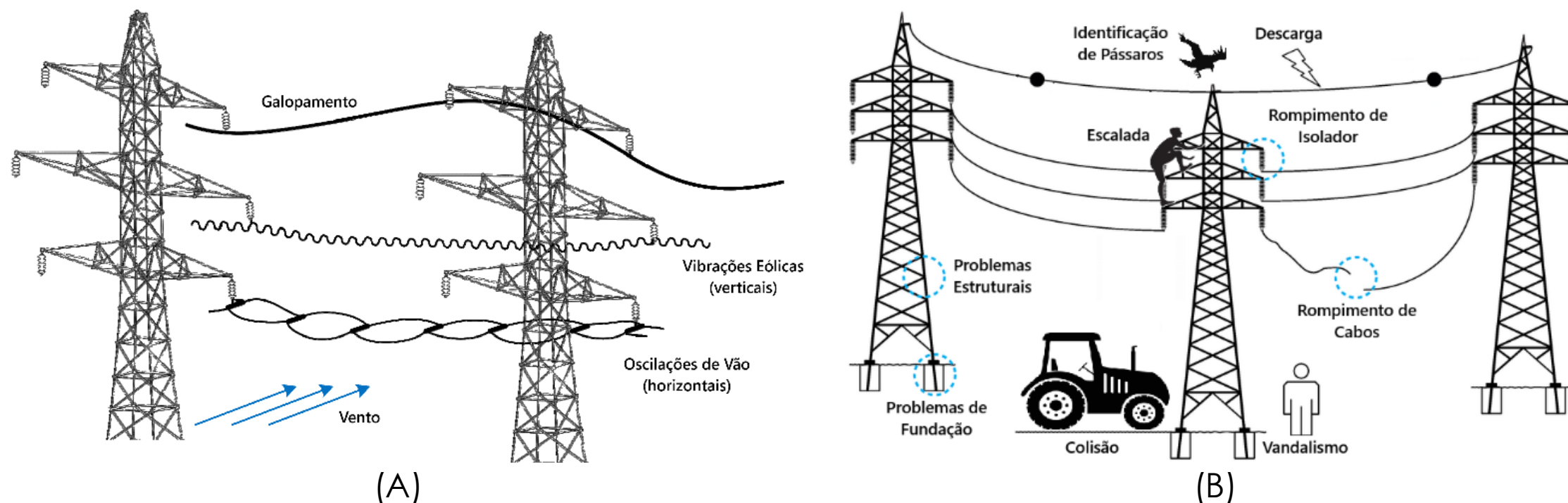


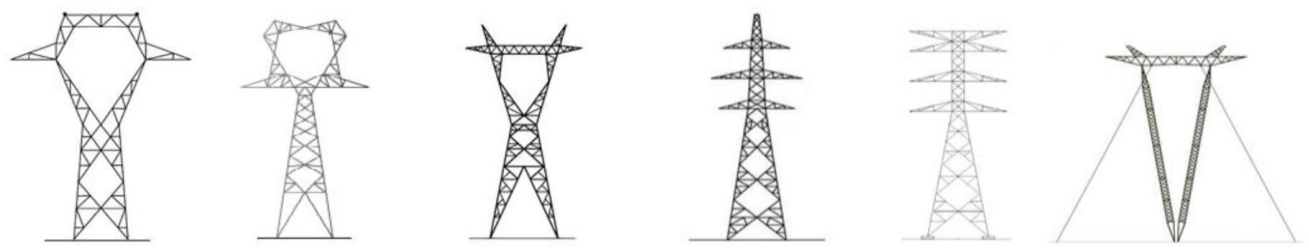
FIGURA 5: Exemplos de fenômenos vibracionais que podem ser identificados. (A) efeitos meteorológicos e (B) fontes mecânicas externas.

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)

Do TRL-6 ao TRL-9: ampliando o monitoramento de torres com uma solução contínua, remota e escalável.

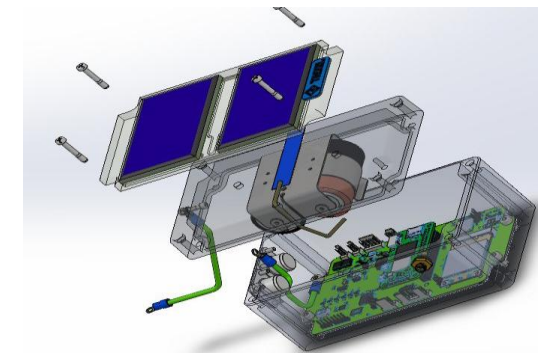
- Assinatura vibracional das estruturas.
- Reduzir falhas por meio de sensoriamento vibracional.
- Detecção e classificação automática de eventos.
- Custo unitário reduzido para escalabilidade.
- Estruturas de transmissão e distribuição percorrem todo o território brasileiro.



Diferentes modelos de estruturas.



(A)



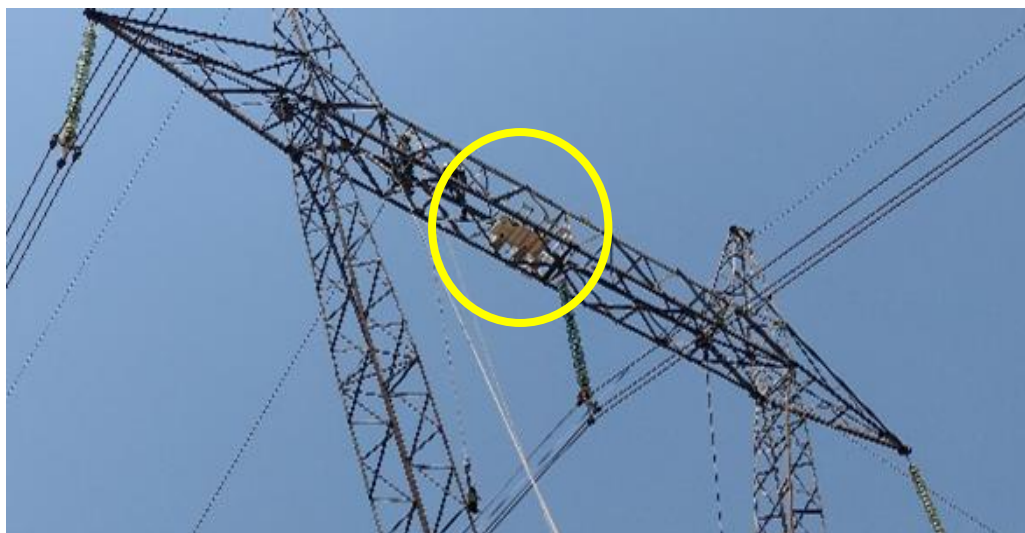
(B)

Evolução no TRL-9. (A) Protótipo 2 e (B) Slim.

REALIZAÇÃO:

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)



Instalado em 2021 – Torre 821 (LT 500 kV)

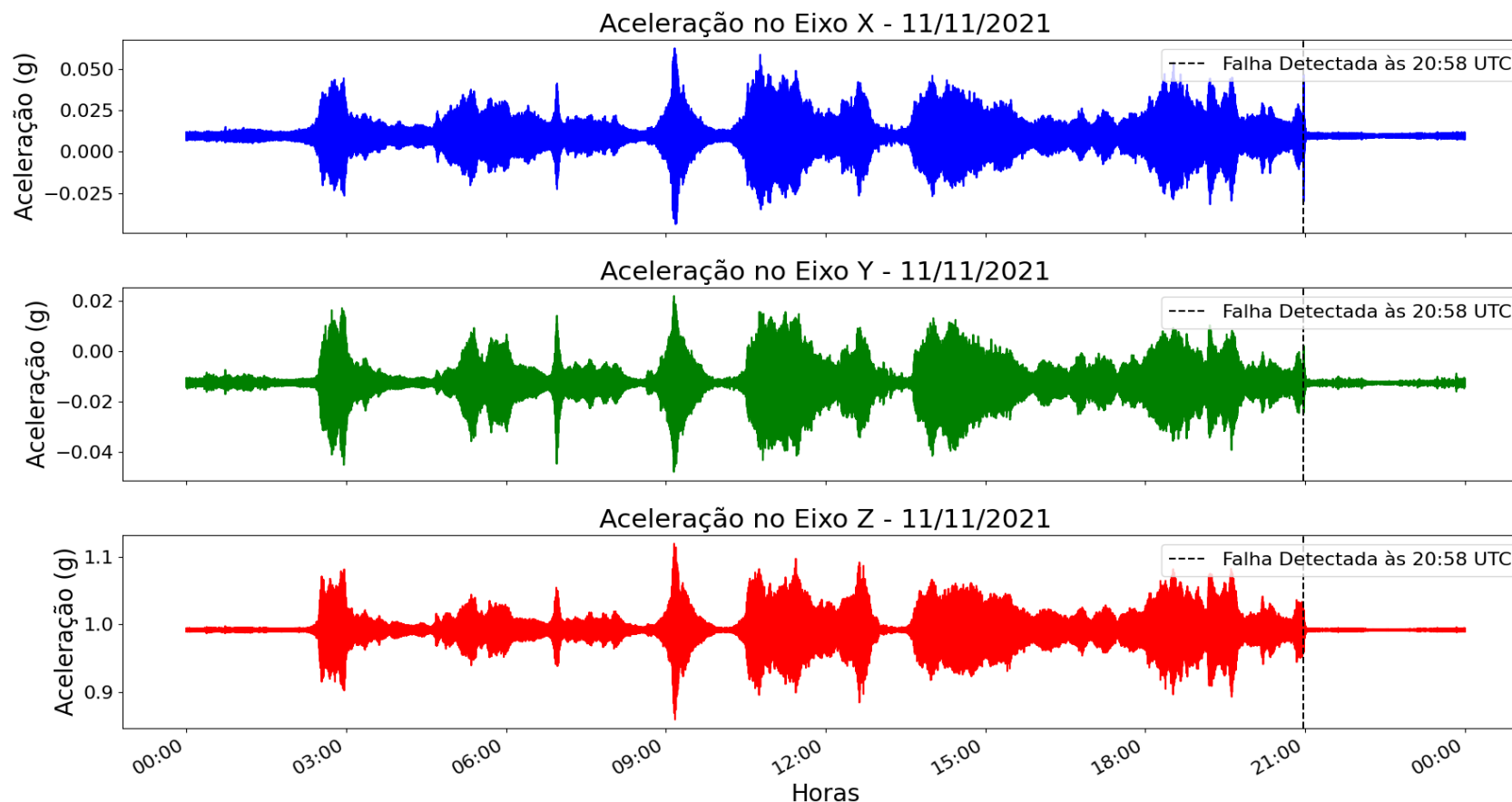


Rompimento do isolador na estrutura 814

REALIZAÇÃO:

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)



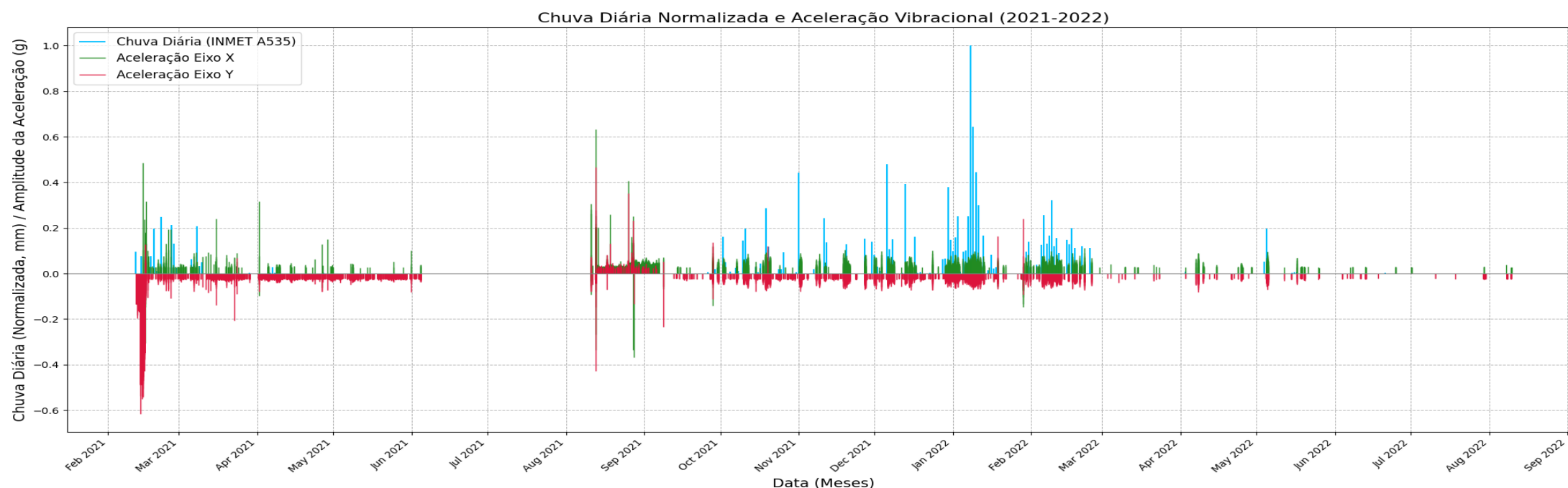
Dados de aceleração registrados pelo equipamento instalado na estrutura 821 no dia da falha.

REALIZAÇÃO:

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)

Um dos objetivos iniciais da PoC VibraTorre foi entender como as condições ambientais influenciam a resposta vibracional das estruturas de transmissão.

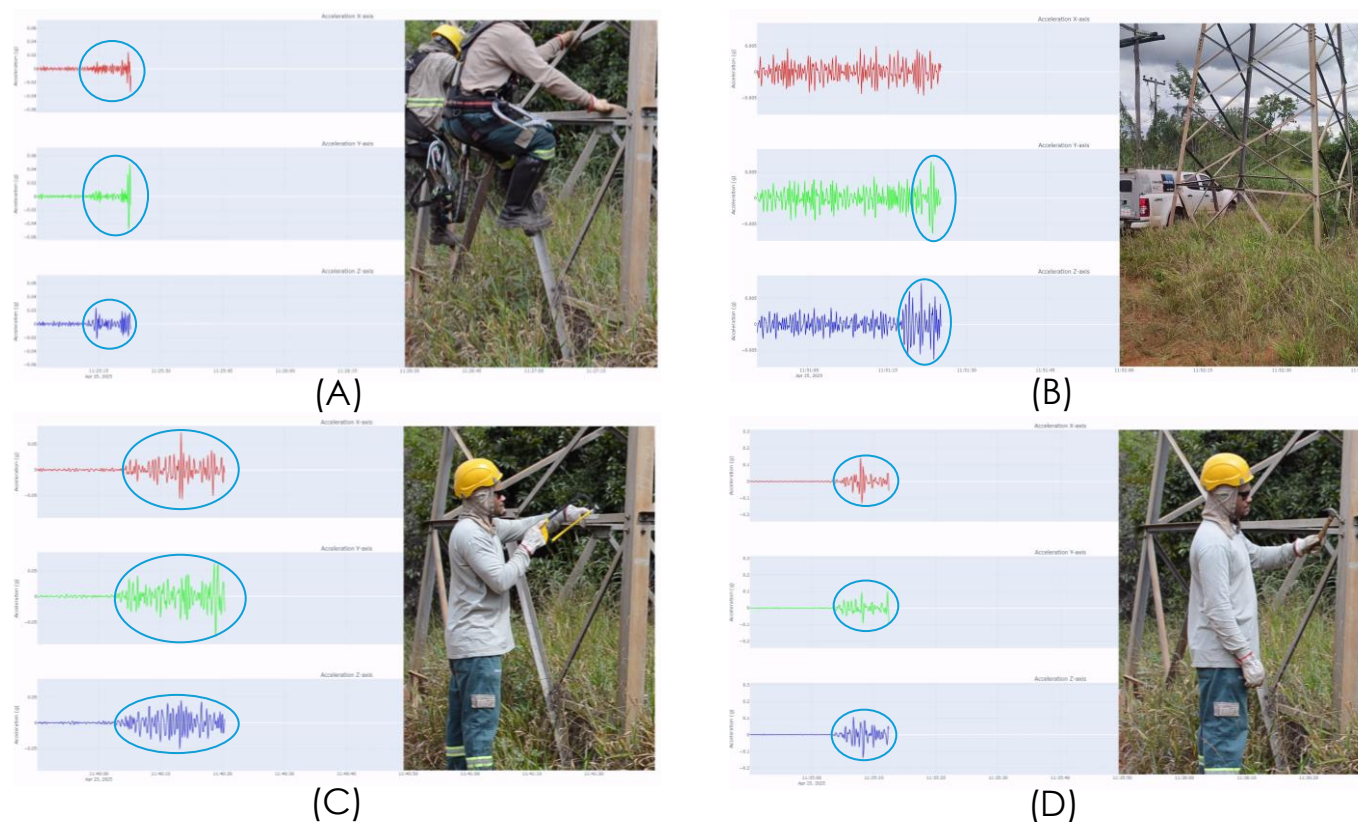


Relação entre chuvas intensas e picos de aceleração ao longo de 2021-2022.

REALIZAÇÃO:

3. Saúde Estrutural de Linha Aérea

b. Exemplo 2: Projeto VibraTORRE (**DLR-H**)



Exemplos de eventos aplicados à estrutura e suas respectivas respostas nos sinais de aceleração. (A) subida de técnicos na estrutura; (B) passagem de veículo próximo; (C) tentativa de corte e (D) impacto com martelo.

REALIZAÇÃO:

4. Estado da Arte (DLR) Conclusões com os testes

A implementação de **gêmeos digitais** aplicados ao cálculo da **capacidade dinâmica (DLR)** de linhas de transmissão representa uma importante iniciativa na gestão de ativos do setor elétrico mundial.

- ✓ Modelagem detalhada com algoritmos baseados nas referências internacionais, integrando variáveis meteorológicas locais;
- ✓ Dados confiáveis do projeto das linhas;
- ✓ predição da capacidade com alguns dias de antecedência, permitindo antecipação a cenários climáticos críticos;
- ✓ Abordagem tecnicamente viável e estratégica para os desafios do setor elétrico.

REALIZAÇÃO:

4. Estado da Arte (DLR-H)

Conclusões com os projetos de P&D

- Detecção e classificação automática de eventos.
- Projeção: monitorar 2% das estruturas brasileiras.
- Desafios:
 - transmissão de dados em áreas remotas
 - fornecimento de energia elétrica sensores
 - coleta de dados rotulados
 - Hardware robusto e de custo acessível.
- Desenvolvimento requer análises utilizando Inteligência Artificial.

REALIZAÇÃO:

4. Estado da Arte Internacional (DLR)

- **Novos equipamentos de monitoramento em tempo real**
- **Plataformas de serviços em DLR**
- Envolvimento da sociedade como partes envolvidas
- Uso de machine learning em abundância.



REALIZAÇÃO:

4. Estado da Arte Internacional (DLR)

Society is getting attention of DLR



[FERC Order No. 1920 - Securing a Reliable Energy Future \(youtube.com\)](#)

Reference to FERC Order 881: AAR and DLR are such a hot topic in Canada and the US is related to the Order

Thank you to [The White House](#) for inviting our CEO, [Michael Skelly](#), to participate in the Summit on Modernizing the Power Grid. This event underscores the need for collaboration and innovative leadership in advancing our nation's energy infrastructure. We are proud to contribute to the efforts towards creating a more resilient and reliable power grid.

REALIZAÇÃO:

4. Estado da Arte Futuro (DLR-OHL)

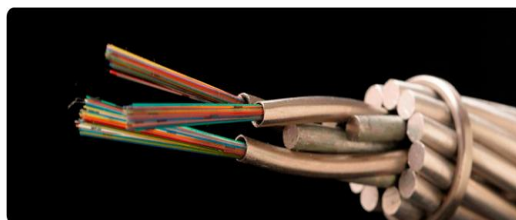
DLR-wildfire (Dynamic Line Rating **IN WILDFIRE**)



REALIZAÇÃO:

4. Estado da Arte (DLR-OHL) Nova configuração de Linha Aérea Sinérgica - LAS

OPPC
CIGRÉ Paris 2014
Meeting



Brazil - UniverCemig – 2016
Project R&D Aneel/Cemig D520



REALIZAÇÃO: