

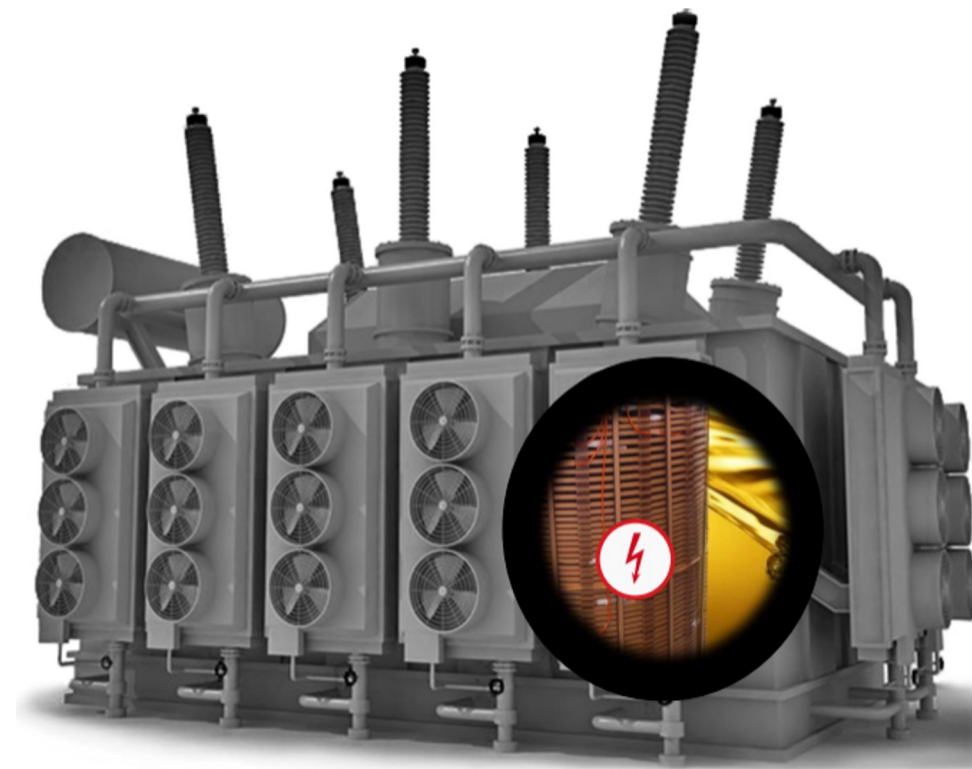


Universidade Federal
de Campina Grande



MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS POR DESCARGAS PARCIAIS

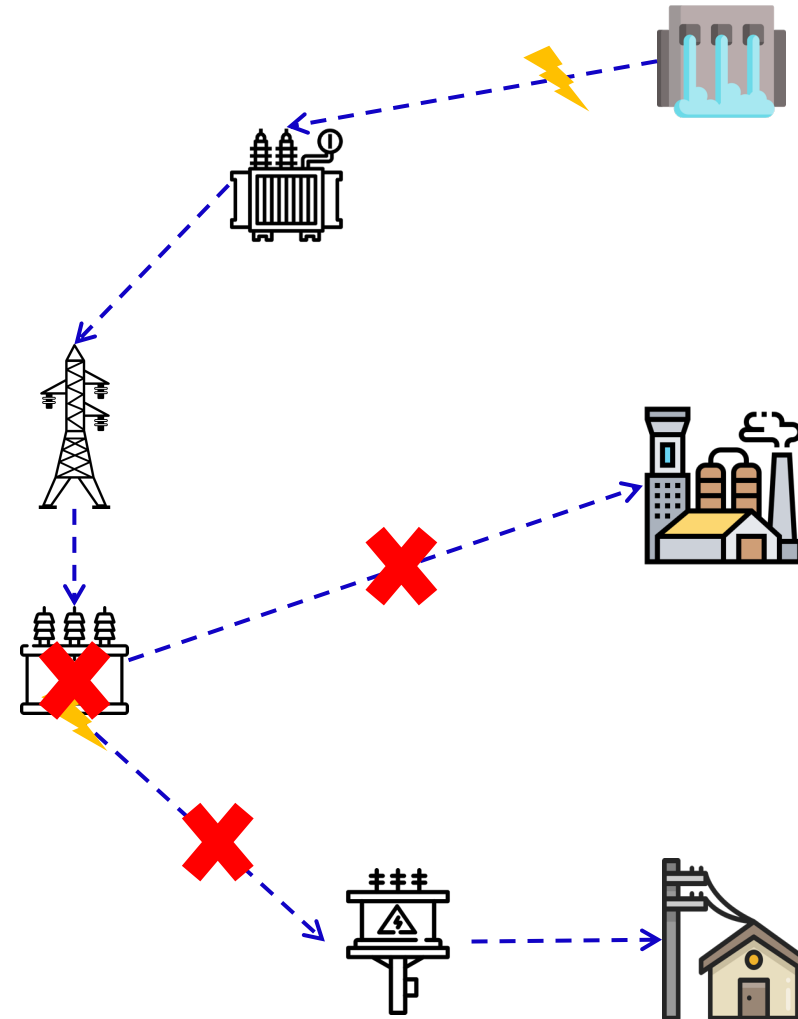
Palestrante: Edson Guedes da Costa



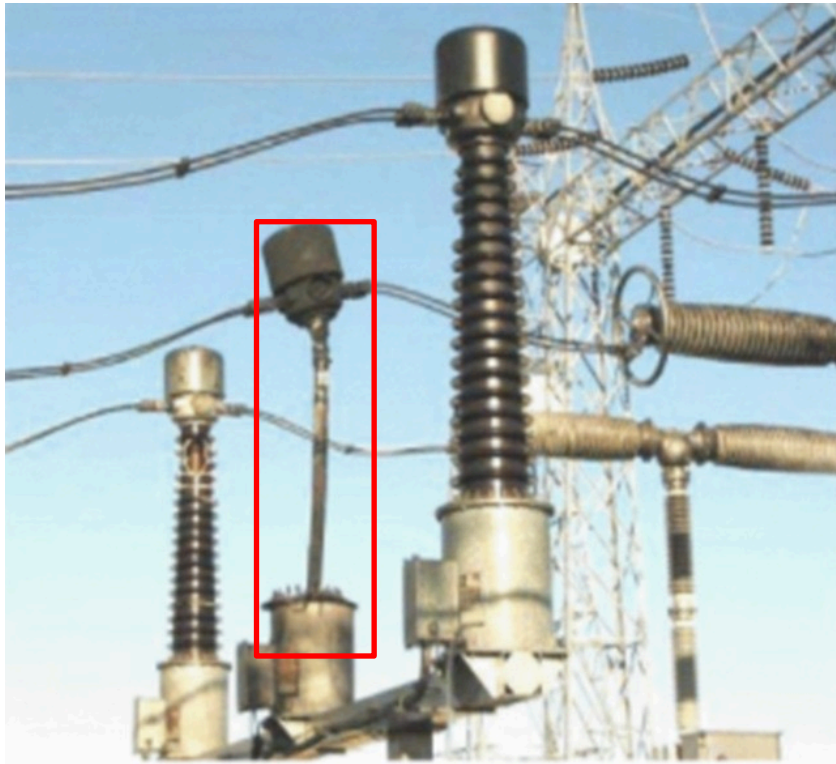
São Luís - Outubro de 2023

Introdução

- Sistema elétrico de potência requer grau elevado de **DISPONIBILIDADE**
 - Muitas regulatórias
- Esquemas de proteção eficazes;
- Melhoria nos índices de qualidade de energia;
- Redução do número de interrupções no sistema e do tempo de **indisponibilidade**.



Falhas em equipamentos



Falhas em equipamentos

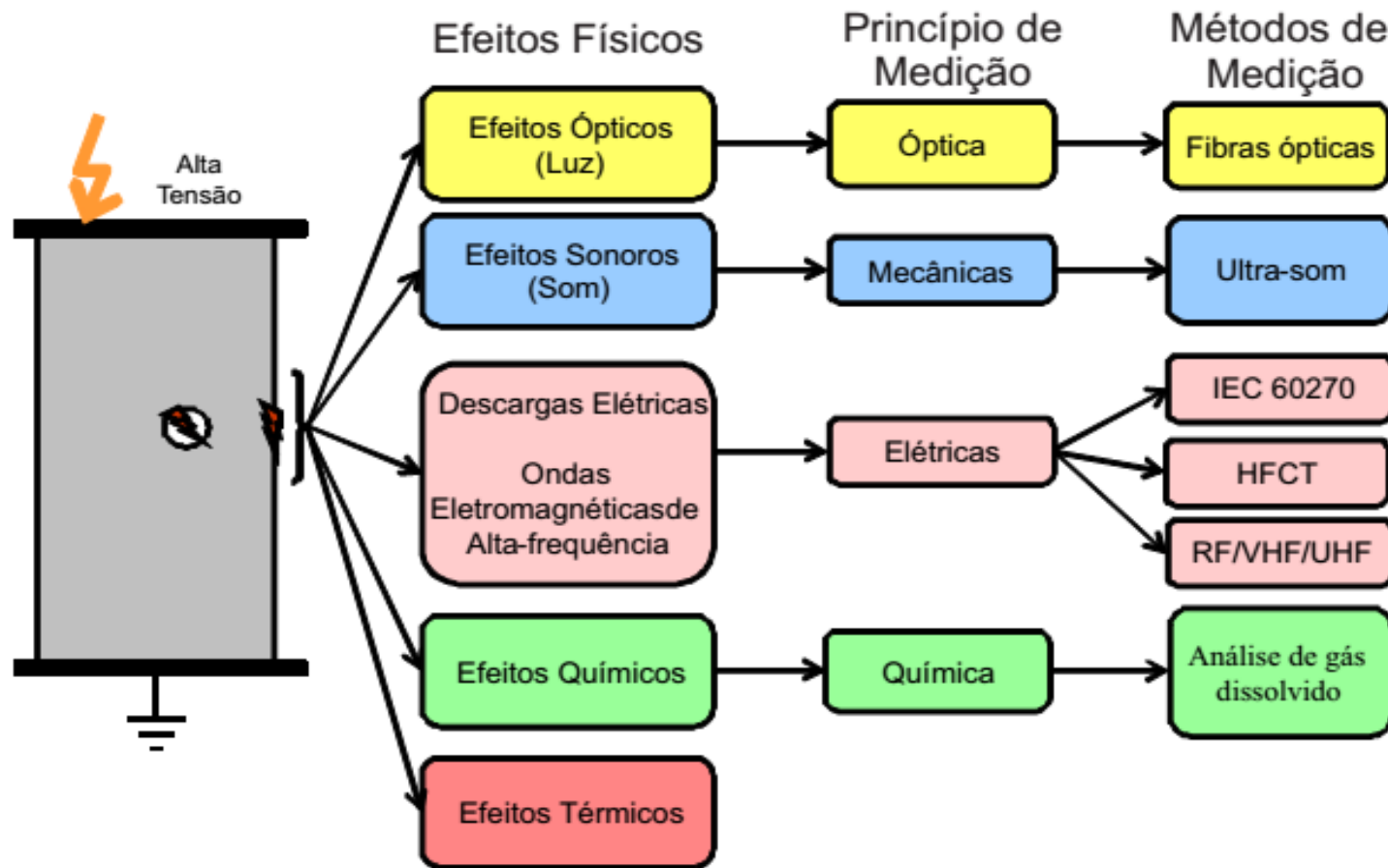


Defeito Interno em Transformador



- **Ensaio Elétricos**
 - **Ensaio Destrutivos**
 - Tensão suportável na frequência industrial (duração 1 minuto);
 - Tensão suportável sob impulso atmosférico e de manobra;
 - Tensão induzida.
 - **Ensaio não Destrutivos**
 - Resistência de isolamento;
 - Tangente de perdas;
 - **Descargas parciais**

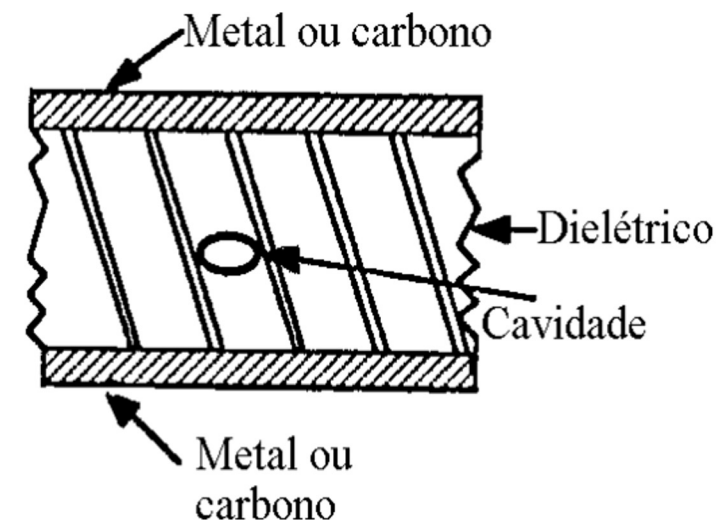
Descargas Parciais



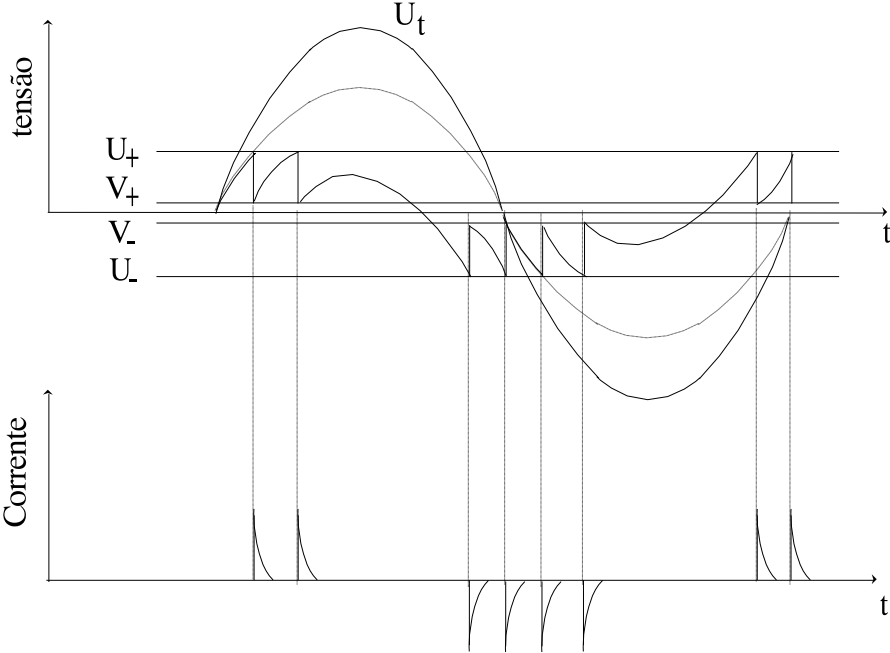
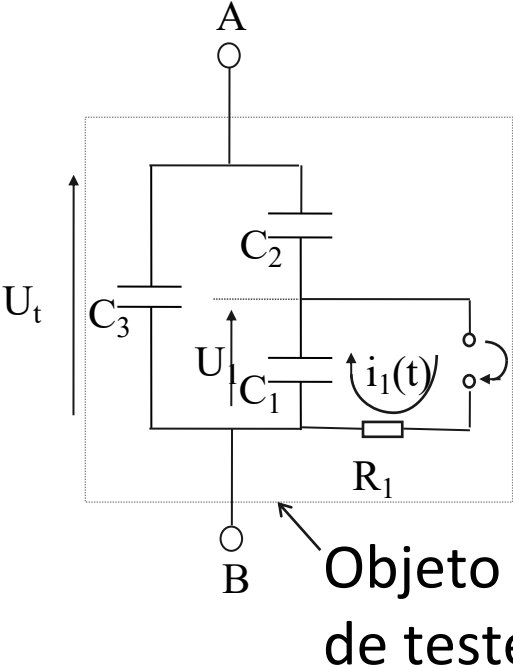
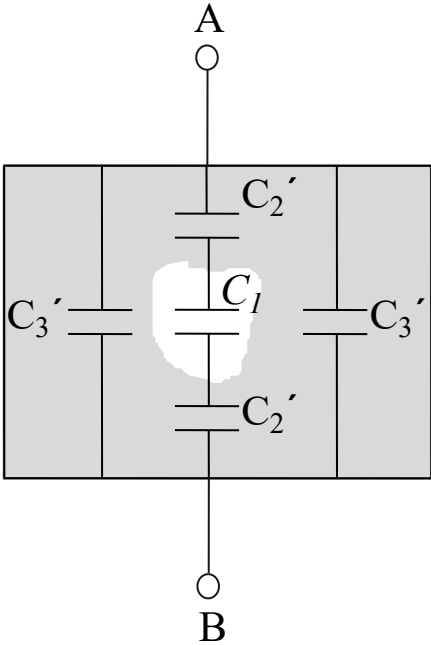
Referência
Alternativos

Definição de Descargas Parciais

- São descargas elétricas que **curto-circuitam parcialmente** o isolamento;
- Podem ocorrer em **cavidades gasosas**, em meio isolante **sólido ou líquido**, ou ao longo de uma superfície ao redor de pontas;
- São conhecidas como **corona**, as descargas parciais **em gases**, em torno de um condutor.



Modelo Físico



Definições de Carga Aparente e Carga Medida

- A queda de tensão ΔU_1 , provocada pela corrente de descarga i_1 na cavidade, libera uma carga Δq_1 , onde:

$$\Delta q_1 = \Delta U_1 \cdot C_1 \quad (1)$$

- A corrente local i_1 não pode ser medida, mas a descarga provoca uma queda de tensão ΔU_1 em C_1 e uma transferência de carga para C_2 . Assim, a carga transferida é:

$$q = C_2 \cdot \Delta U_1 \quad (2)$$

- A carga é redistribuída entre C_2 e C_3 . Logo,

$$q = C_2 \cdot \Delta U_1 = (C_2 + C_3) \cdot \Delta U \quad (3)$$

Definições de Carga Aparente e Carga Medida

- Assim, a queda de tensão resultante ΔU pode ser obtida por:

$$\Delta U = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \Delta U_1 \quad (4)$$

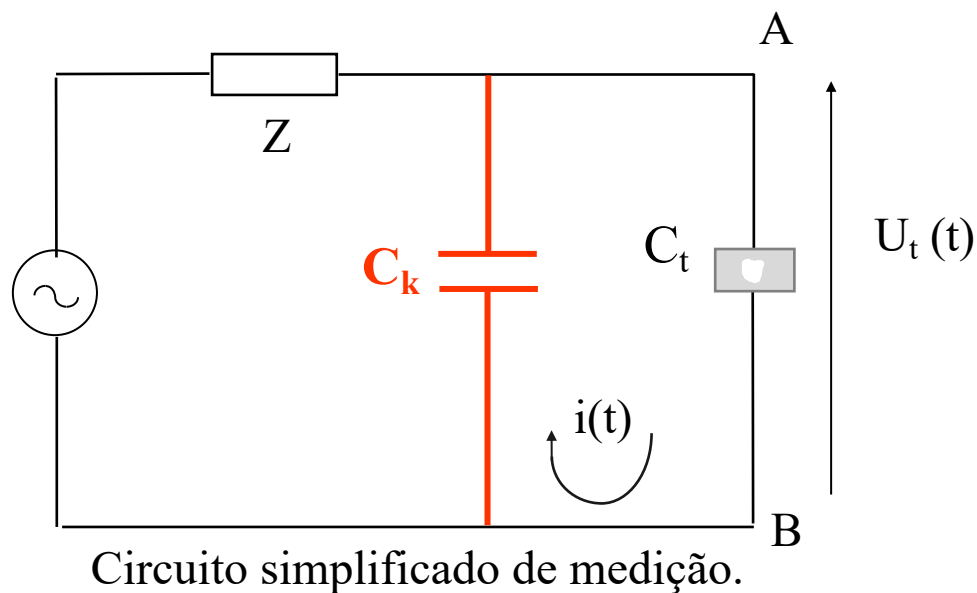
- Substituindo a equação (1) em (4) tem-se:

$$\Delta U = \frac{C_2}{(C_2 + C_3) C_1} \Delta q_1 \quad (5)$$

- Como os valores precisos para C_2 e C_3 são normalmente desconhecidos, ΔU_1 e Δq_1 não podem ser determinados diretamente.

Definições de Carga Aparente e Carga Medida

- A medição de descargas parciais pode ser feita com o auxílio do circuito da figura abaixo, onde C_k é a capacitância de acoplamento e C_t é a capacitância equivalente da amostra.



$$q = \frac{C_2}{C_1} \Delta q_1 \quad (6)$$

Definições de Carga Aparente e Carga Medida

- A carga q é denominada de “**carga aparente**” do pulso de descarga parcial, porque ela é somente relacionada com Δq_1 via a razão de capacitâncias C_2/C_1 .
- Considerando-se o circuito da figura sem o capacitor de acoplamento, a carga transferida para o objeto de teste devido à ocorrência de descargas parciais é:

$$q = C_t \cdot \Delta U \quad (7)$$

- Incluindo o capacitor de acoplamento, a carga é redistribuída entre C_k e C_t , sendo:

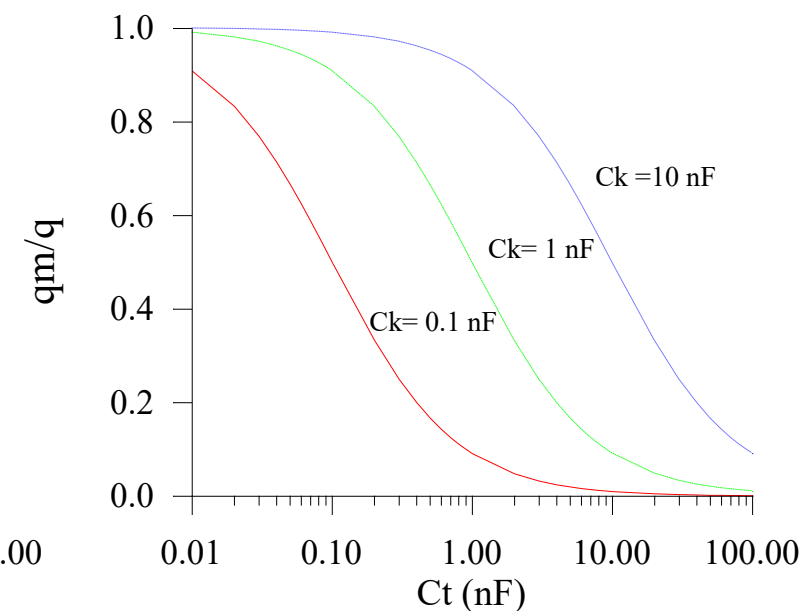
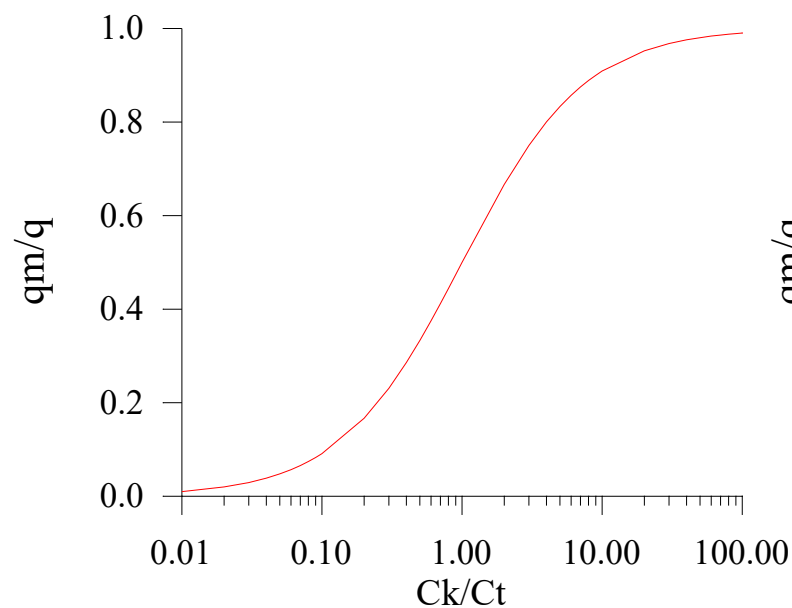
$$q = (C_t + C_k) \cdot \Delta U' \quad (8)$$

Definições de Carga Aparente e Carga Medida

- A **carga q_m** , liberada pelo capacitor de acoplamento, pode agora ser medida e comparada com a **carga q no objeto de teste**. Assim,

$$q_m = C_k \cdot \Delta U' \quad (9)$$

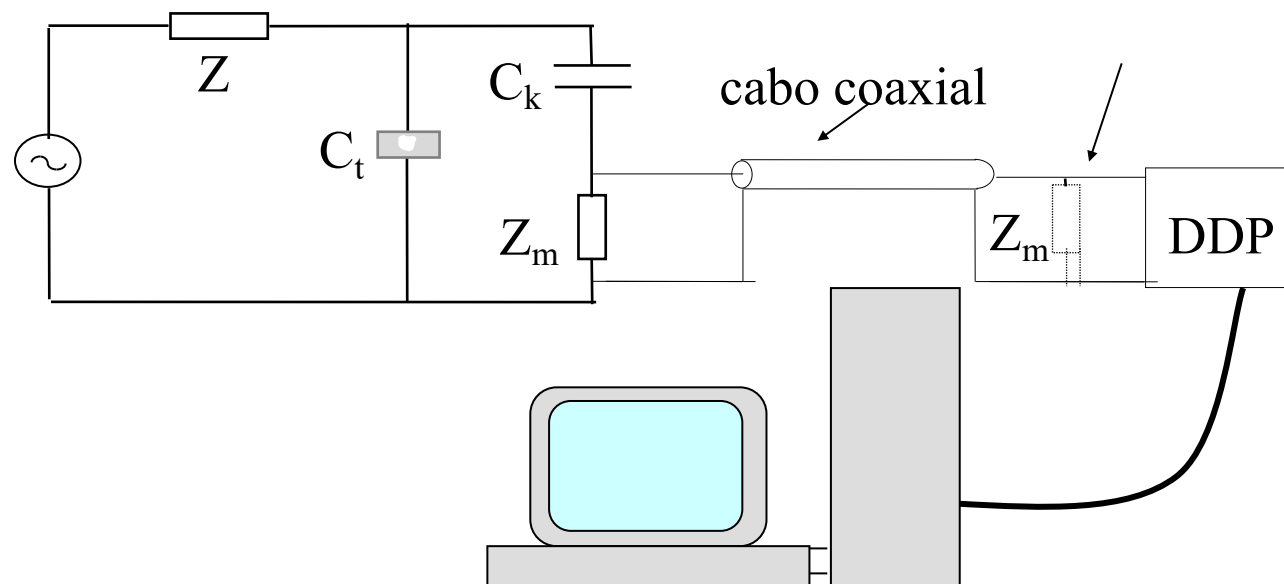
$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (10)$$



Influência do capacitor de acoplamento C_k sobre a relação q_m/q .

Circuito de Medição Tradicional

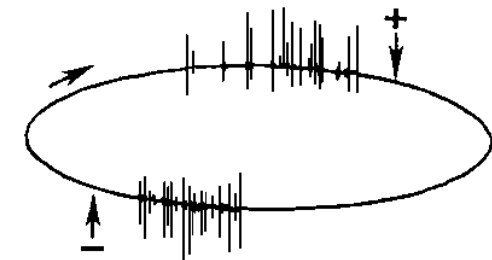
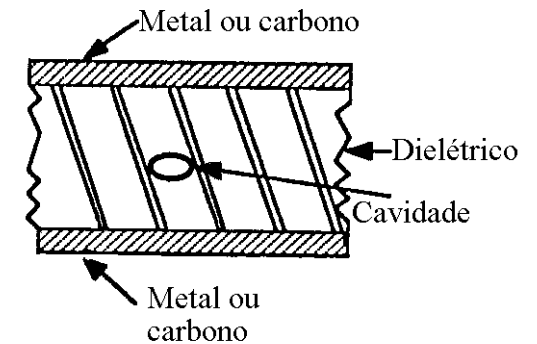
Impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento.



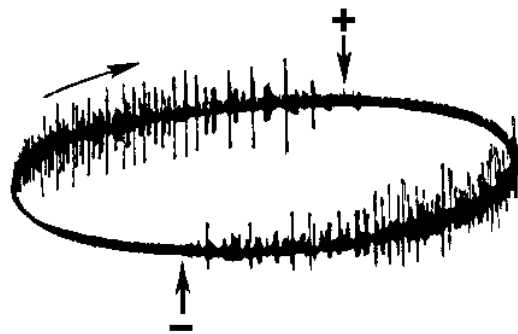
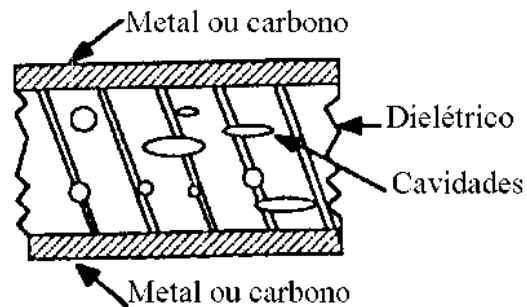
- vantagem: se ocorrer **ruptura** em C_t , o circuito de medição não estará sujeito à **alta tensão**.
- desvantagem: medição indireta dos pulsos. Precisão depende da **relação** C_k/C_t .

- **Exemplo 1 – DP em Sólidos**

- As descargas ocorrem na **subida da onda** de tensão (positiva e negativa)
- Com aproximadamente mesma amplitude e número, contudo diferenças de intensidade de 3:1 são normais.
- O **tempo de tensão aplicada** geralmente pouco afeta o padrão durante um único ensaio (~10 min).

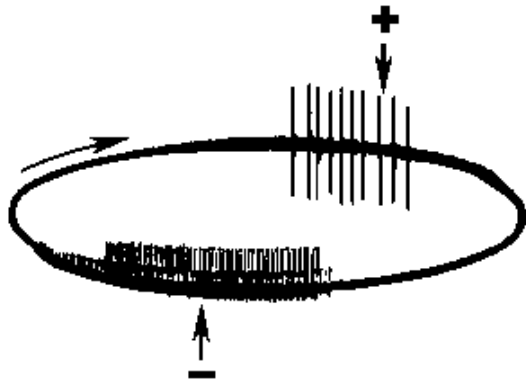


- **Exemplo 2 – Múltiplas Cavidades**



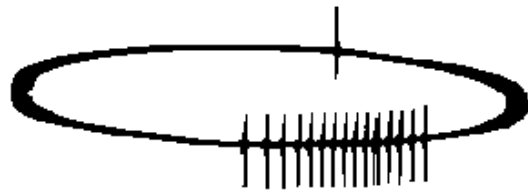
- A ação de descargas sobre a resina, dentro da cavidade, pode resultar na formação de **produtos condutores** (carbono ou gases).
- As descargas são normalmente do mesmo número e intensidade nas tensões de pico positivo e negativo.
- Se tensão for mantida em **nível máximo**, a intensidade das descargas **decrece gradualmente**.
- As tensões de extinção e de reiniciação serão bem maiores do que a tensão original.

- **Exemplo 3 – Descargas em meios Líquidos**



- O **aumento da tensão**, provoca o aparecimento das descargas de maior intensidade.
- Quando a **tensão é reduzida**, a tensão de **extinção** coincide com a tensão de **iniciação**.
- A **iniciação** pode levar **alguns segundos** para se manifestar após a estabilização da tensão, ficando em seguida **estável**.

- **Exemplo 4 – Descargas em meios Gasosos**

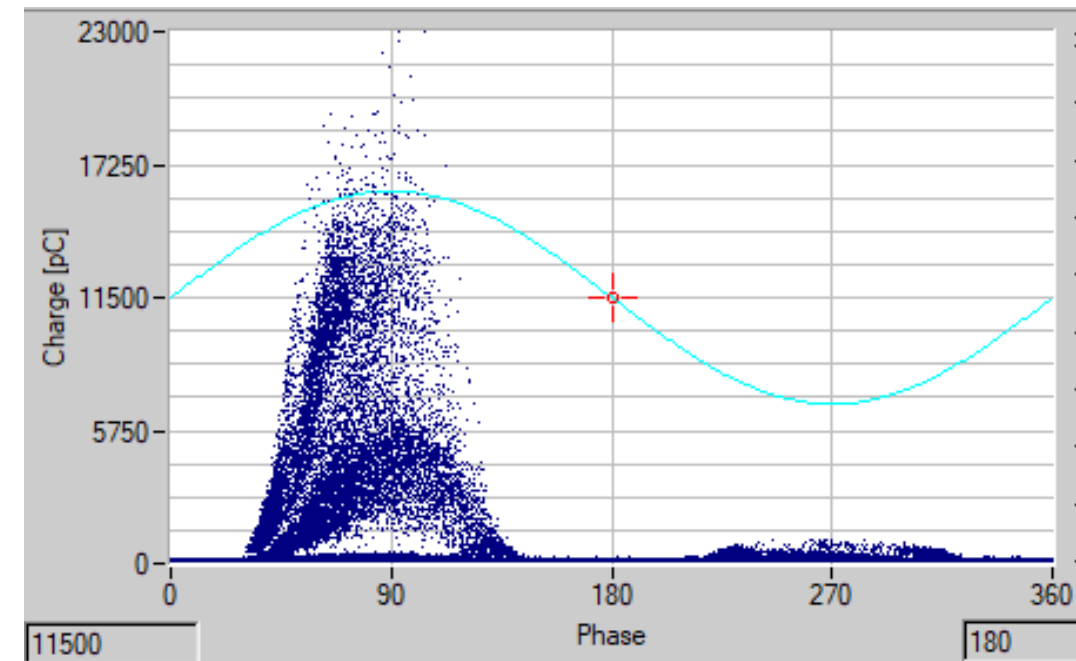


- **Descargas corona** ocorrendo em **eletrodos tipo ponta ou borda** em campos elétricos altos.
- O padrão é bem definido e as descargas corona são **distribuídas uniformemente** ao redor do pico **negativo da tensão**.
- **Descargas corona** ao redor do **pico positivo da tensão**, tem-se a indicação de um campo elétrico intenso em um **eletrodo tipo ponta no potencial de terra**.

Representação de descargas parciais em PRPD

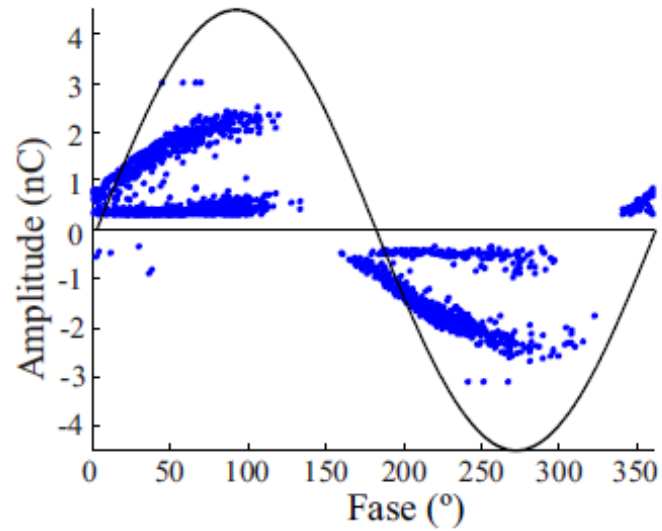
Phase Resolved Partial Discharges

- A PRPD consiste na representação da fase de ocorrência e da intensidade da carga aparente das descargas parciais, ao longo de vários ciclos de tensão em um único gráfico, de forma acumulativa.
- A IEC 60270 recomenda a representação de DP em padrões PRPD para classificação do fenômeno.

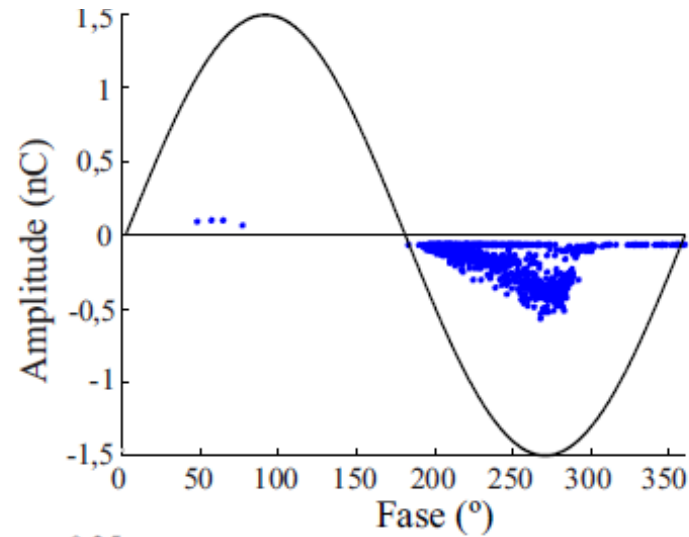


Phase Resolved Partial Discharge (PRPD)

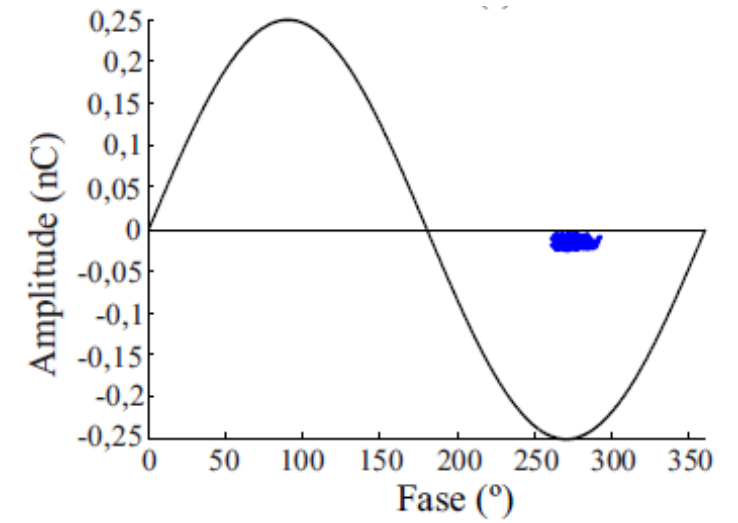
Interna



Superficial



Corona



Transformador de Corrente de Alta Frequência

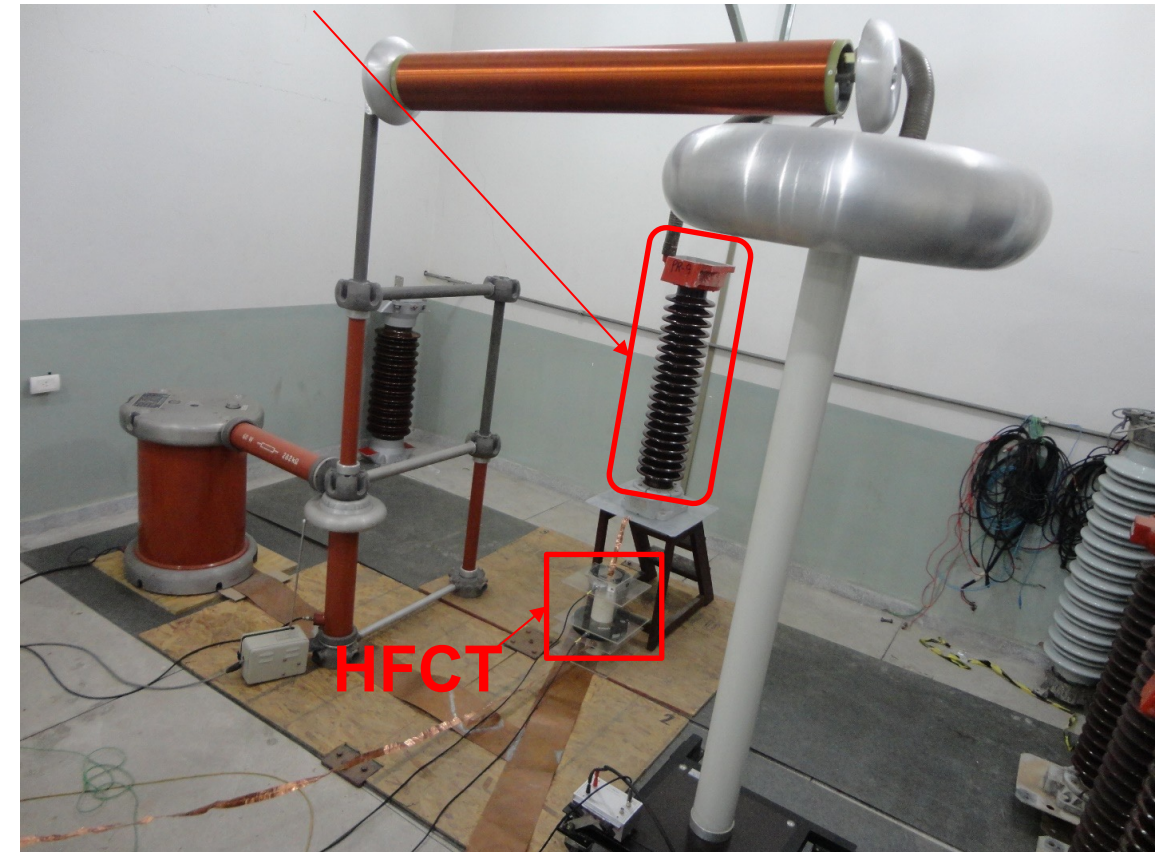


- Acoplado em volta do cabo de terra;
- Satura caso ocorra uma Falha de isolamento;
- Princípio de funcionamento baseado na indução eletromagnética.

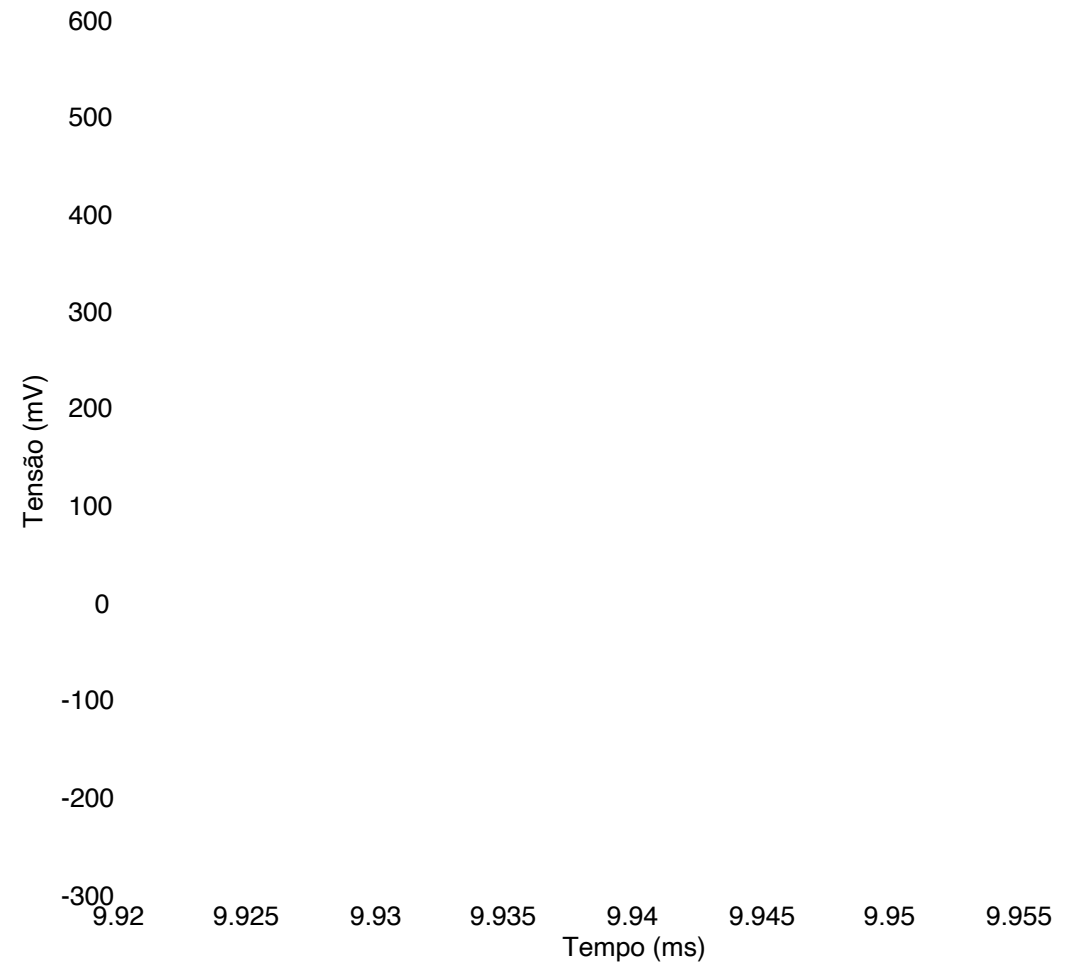
Transformador de Corrente de Alta Frequência



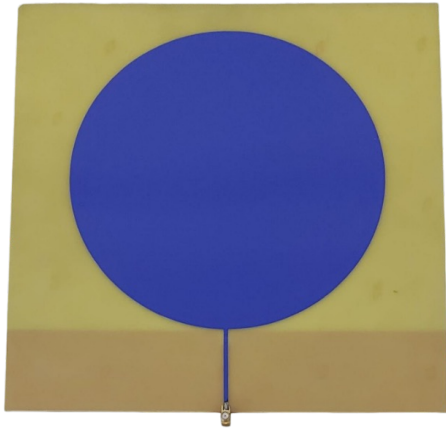
Para-Raios



Transformador de Corrente de Alta Frequência

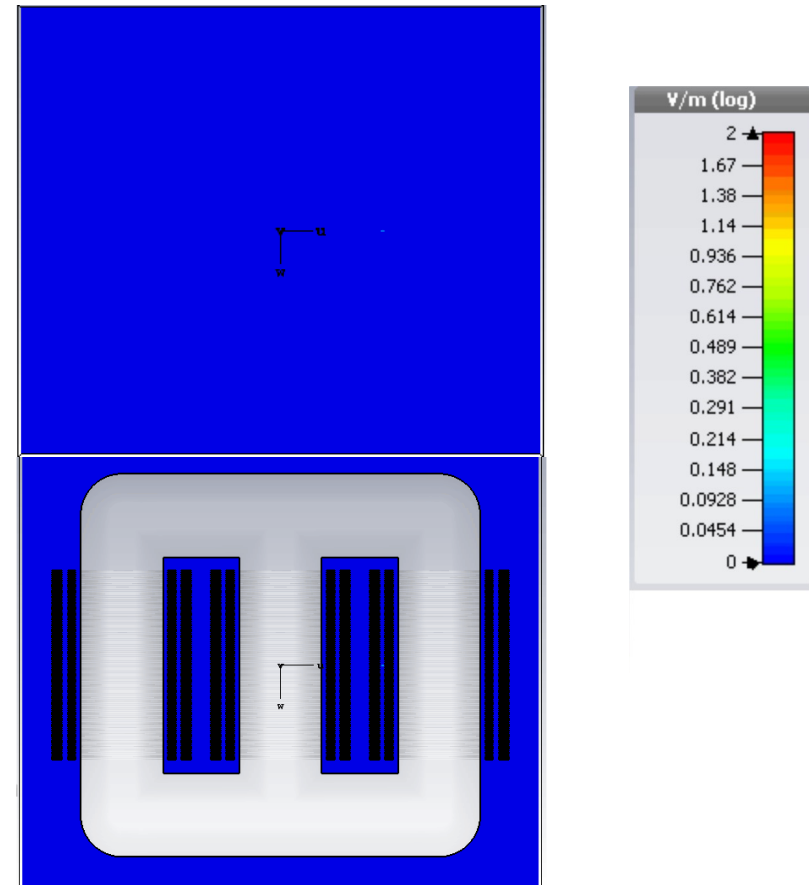


Antena UHF

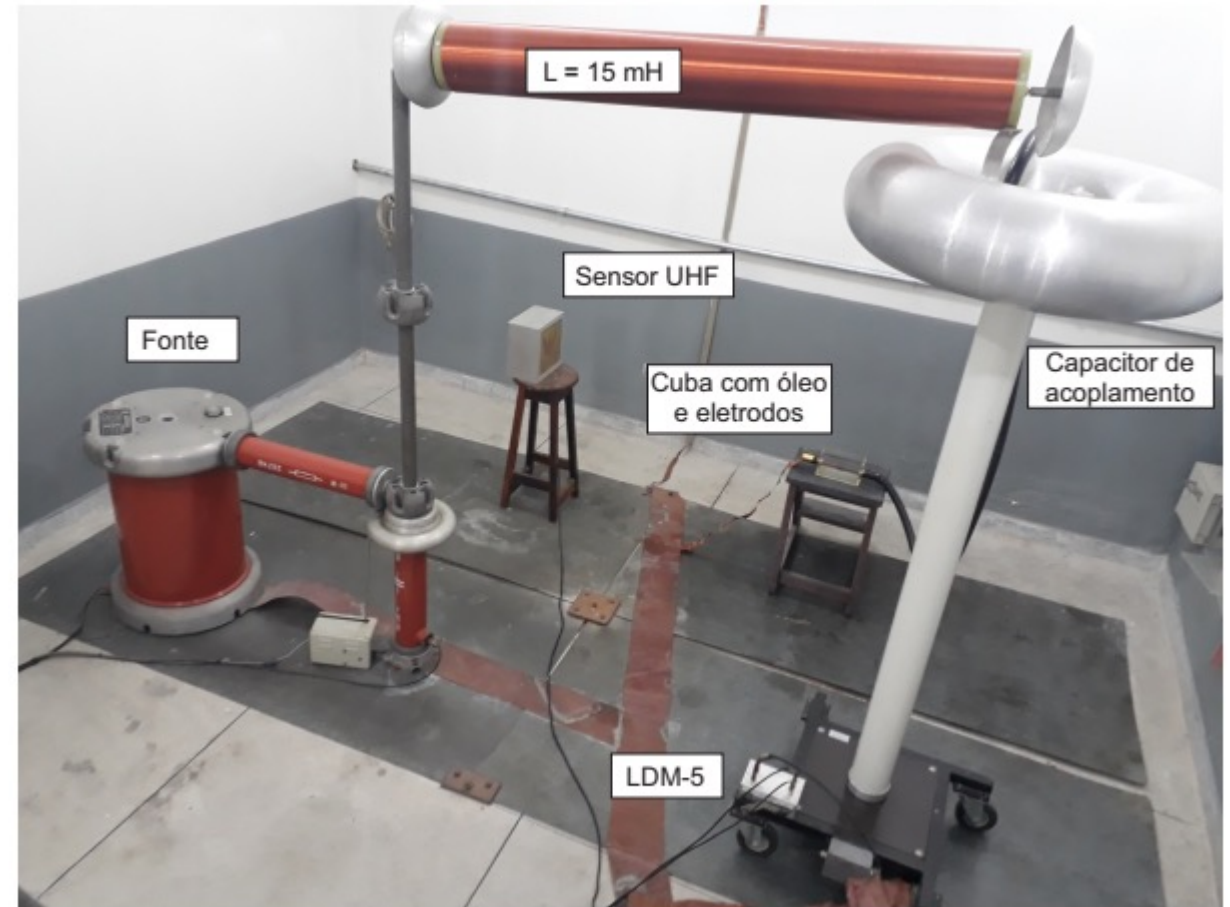


- Faixa de frequência 300 – 3000 MHz
- Não há acoplamento elétrico
- Capta a irradiação emitida pela DP

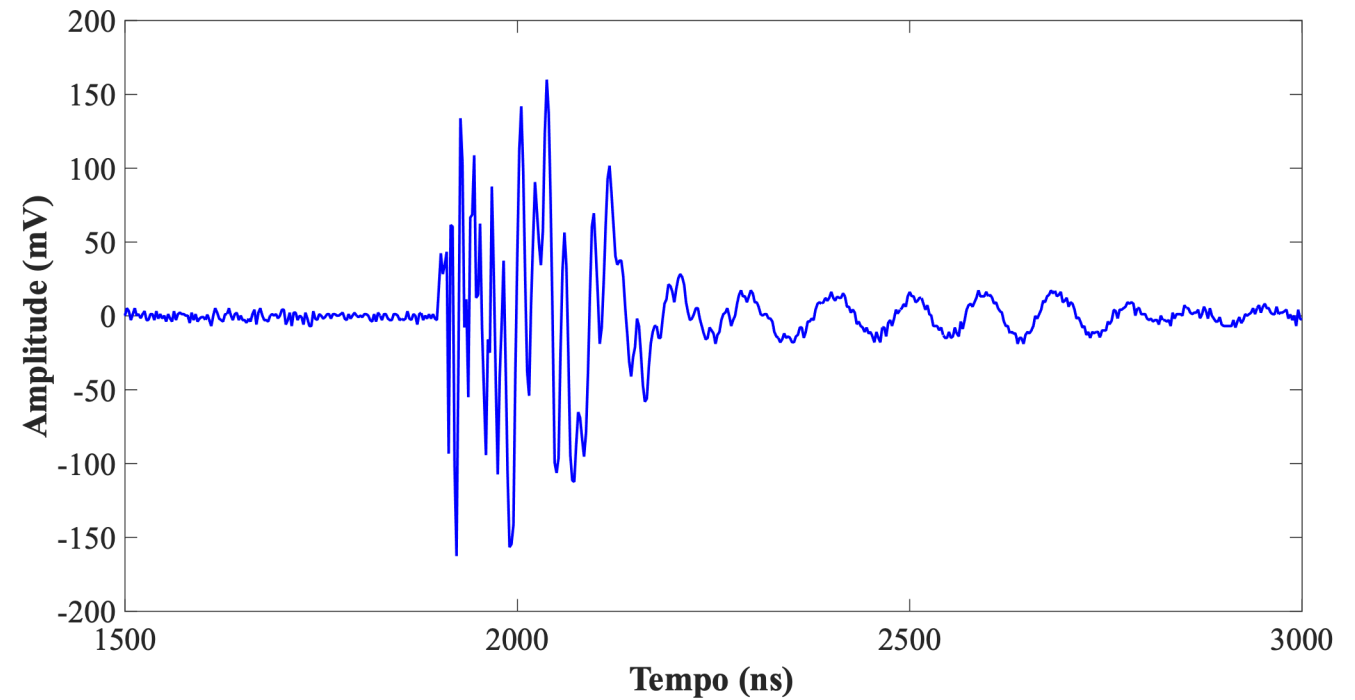
- Propagação UHF Sem Obstáculos
- Propagação UHF com Obstáculos



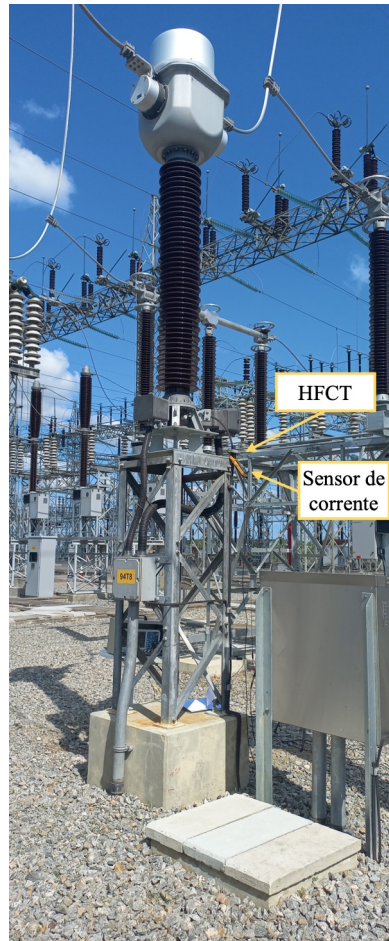
Antena UHF



Antena UHF



Monitoramento com HFCT: TC



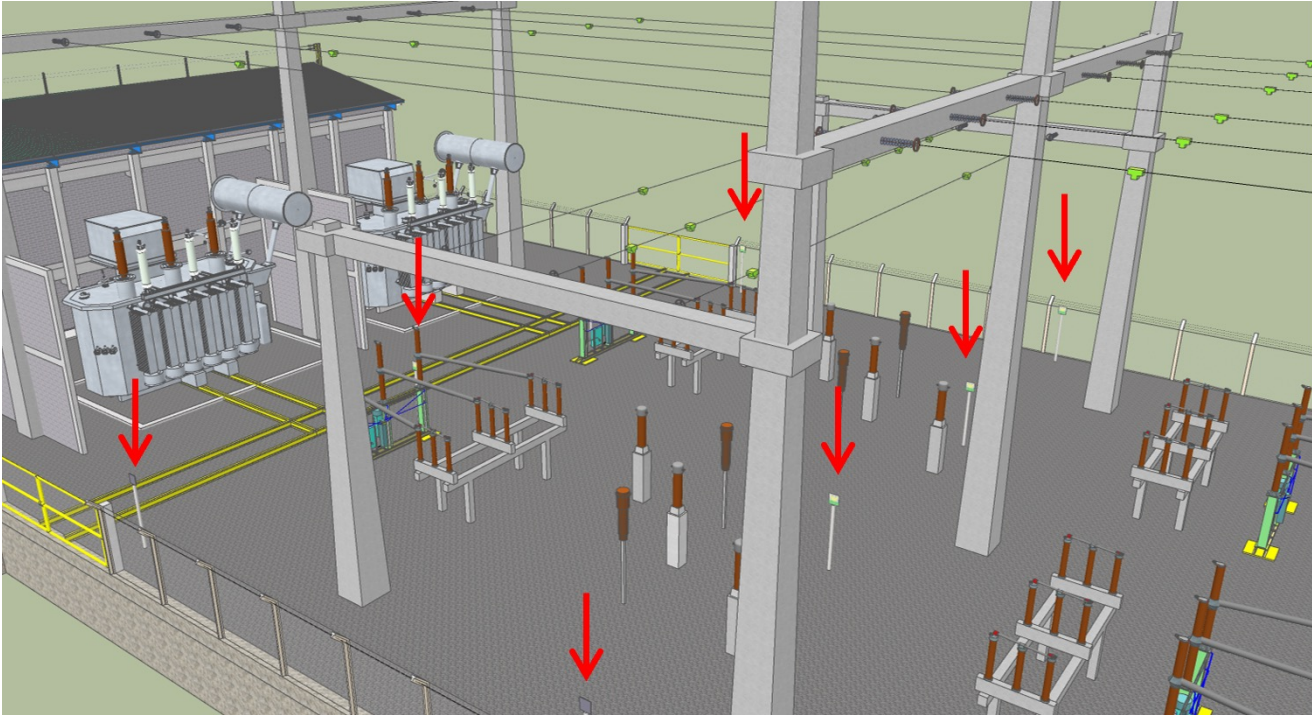
Monitoramento com Antena UHF: TC e TP



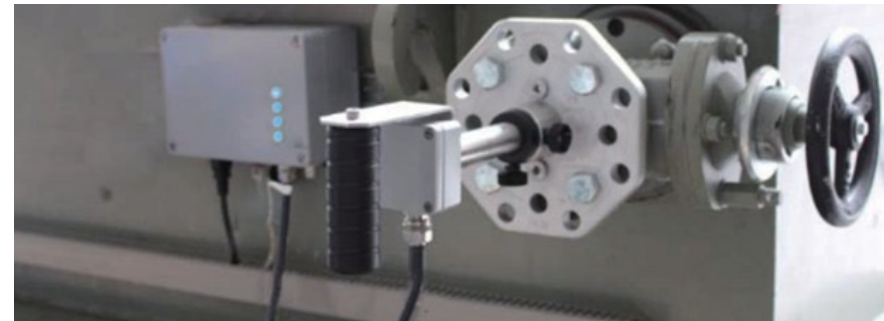
Sensores Externos: Redes de Sensores



Universidade Federal de Campina Grande

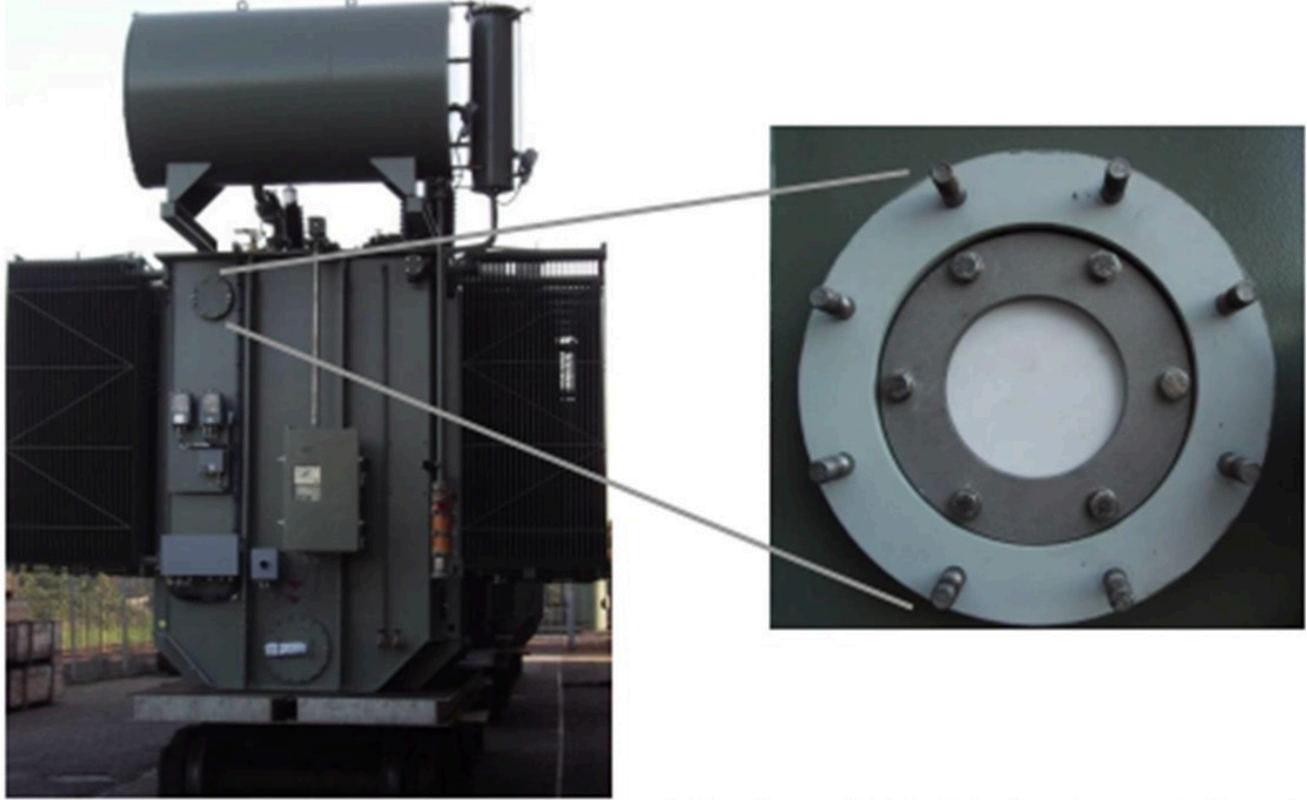
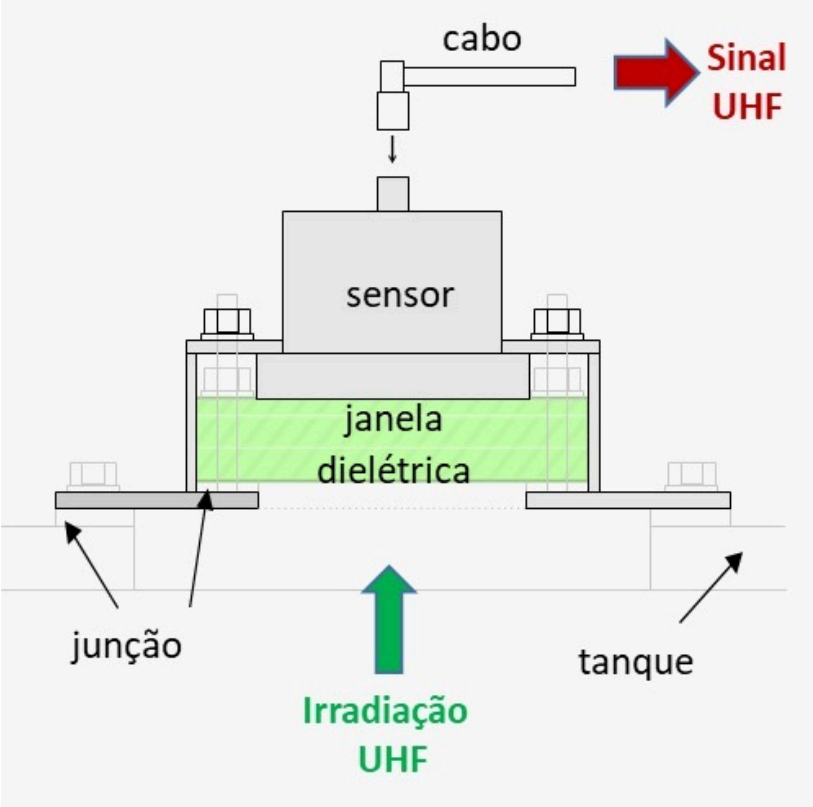


Aplicação em Transformadores: Sensores Internos



Sensor Tipo Válvula

Aplicação em Transformadores: Janelas Dielétricas



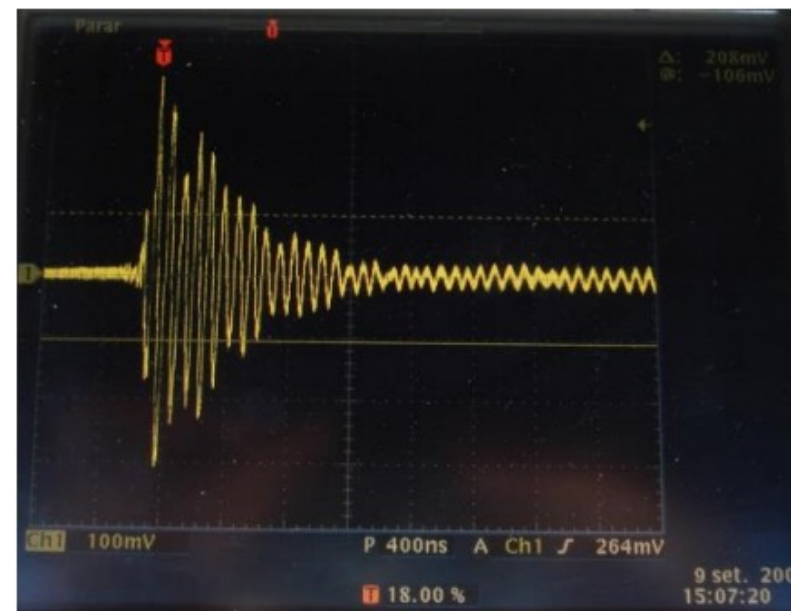
Alguns trabalhos desenvolvidos na UFCG

Parametrização de HFCT para Medição de Descargas Parciais em Para-Raios de ZnO

Parametrização de HFCT

MOTIVAÇÃO

- Método utilizando Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT)



OBJETIVO GERAL

Realizar uma parametrização de **Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT)** para a medição de descargas parciais em para-raios de ZnO, em campo.

A partir do resultado obtido, pretende-se utilizar HFCT para **avaliar o estado do operacional** de para-raios de ZnO, com base em parâmetros definidos por **normas de descargas parciais**.

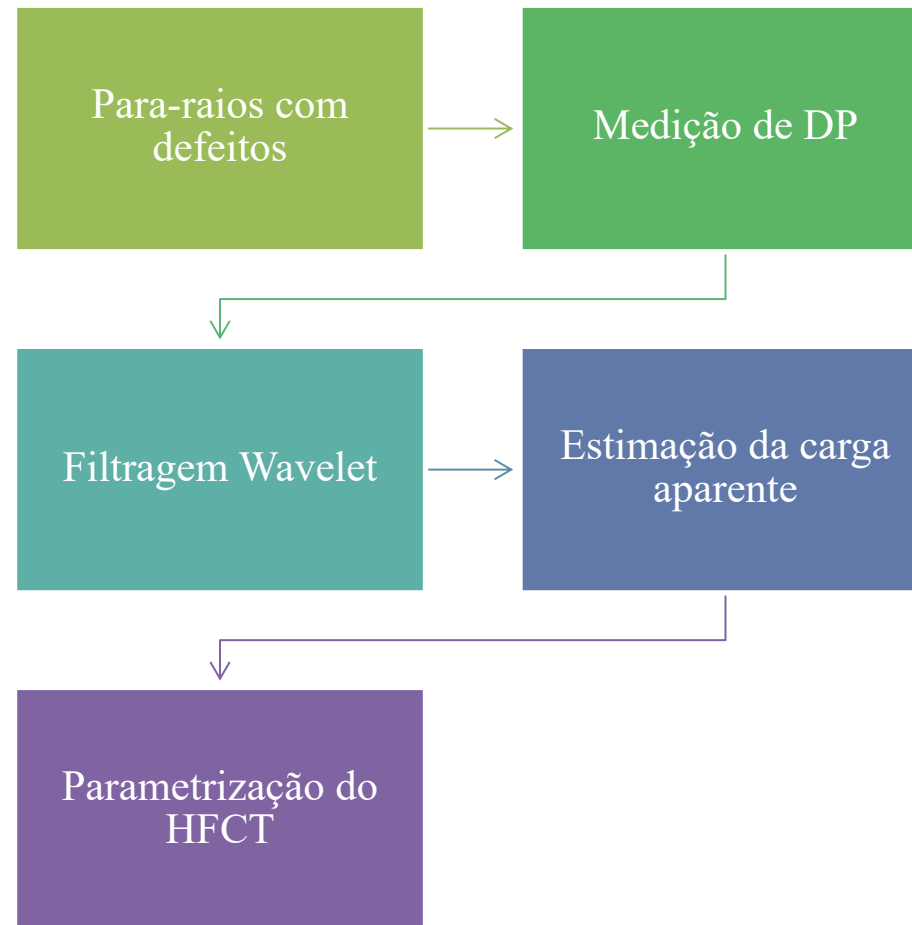
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aprimorar um sistema de medição de descargas parciais aplicando o método PRPD, utilizando um osciloscópio digital como equipamento de aquisição de dados;
- Avaliar a utilização da Transformada Wavelet como ferramenta de filtragem digital de sinais de descargas parciais em sistemas de medição em banda larga;

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a taxa de amostragem necessária em sistema de aquisição de dados (tais como osciloscópios) para medição de descargas parciais em banda larga;
- Demonstrar a viabilidade de se realizar o monitoramento de para-raios de ZnO, por meio da medição de descargas parciais utilizando HFCT.

METODOLOGIA



METODOLOGIA



METODOLOGIA

■ Defeitos inseridos

■ Poluição superficial

- Solução salina à base de Caulin (40 g/L de água), cloreto de sódio e água, seguindo as recomendações da [IEC 60570 \(2013\)](#). Condutividade de aproximadamente 80 mS/cm;
- Solução salina à base de bentonita (40 g/L de água), cloreto de sódio (5 g/L de água) e água, segundo recomendação de [Feser et al. \(1991\)](#). Condutividade de aproximadamente 10 mS/cm;

■ Umidade interna – perda da estanquidade

- Água limpa foi borrifada sobre a coluna de varistores.

METODOLOGIA

- **Processamento dos dados**
 - Filtragem dos sinais medidos utilizando a Transformada Wavelet Discreta;
 - Algoritmo de detecção dos pulsos de DP;
 - Realização da parametrização dos HFCT.

METODOLOGIA

- Filtragem dos sinais utilizando a Transformada Wavelet Discreta
 - A filtragem dos sinais foi realizada utilizando o processo de Limiarização de Coeficientes Wavelets (LCW);
 - Foi avaliada e escolhida a wavelet mãe mais adequada mediante o método SWTBWS proposto por [Carvalho *et al.* \(2015\)](#);
 - O número de níveis de decomposição foi escolhido utilizando o algoritmo DNN proposto por [Carvalho *et al.* \(2015\)](#).

Parametrização de HFCT

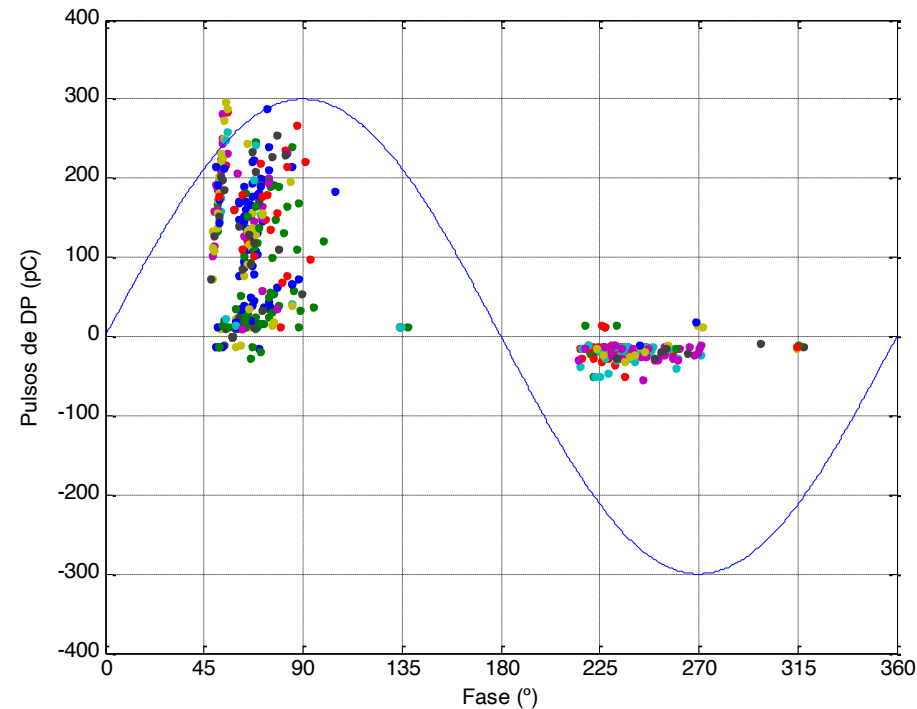
METODOLOGIA

- Filtragem dos sinais utilizando a Transformada Wavelet Discreta
 - A determinação dos limiares de ruído foi realizada utilizando o **Threshold Universal**, com estimação do nível do ruído a cada nível de decomposição;
 - A avaliação de um banco de filtros ortogonais foi aplicada.

Famílias Wavelet	Wavelets Mãe
Daubechies	'db1' ou 'haar', 'db2', ... , 'db45'.
Coiflets	'coif1', 'coif2', 'coif3', 'coif4', 'coif5'.
Symlet	'sym1', 'sym2', 'sym3', ... , 'sym15'.

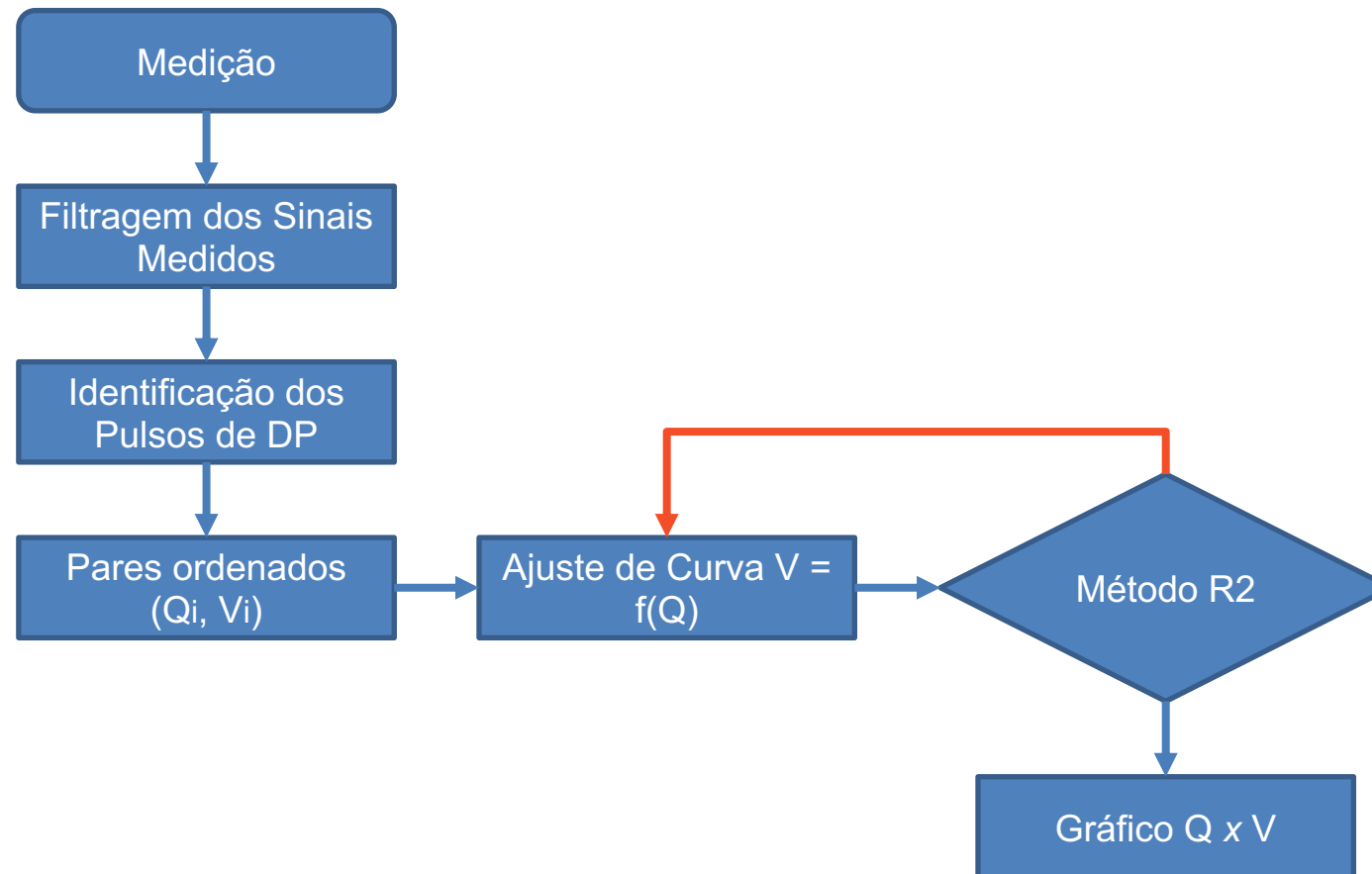
METODOLOGIA

- Padrões representados em função da tensão aplicada (PRPD)



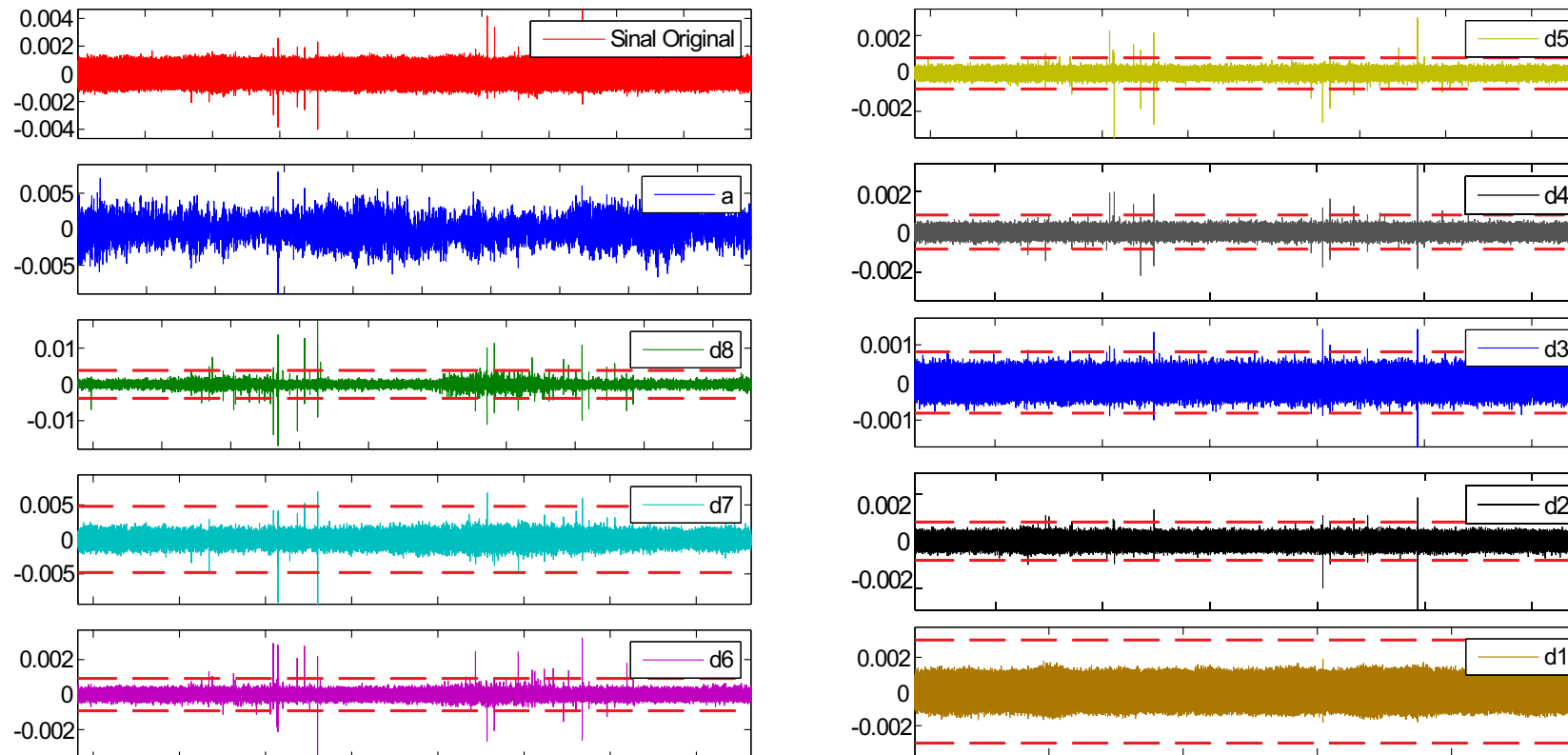
METODOLOGIA

■ Parametrização dos HFCT



Resultados e Análises

■ Avaliação da Melhor Topologia Wavelet

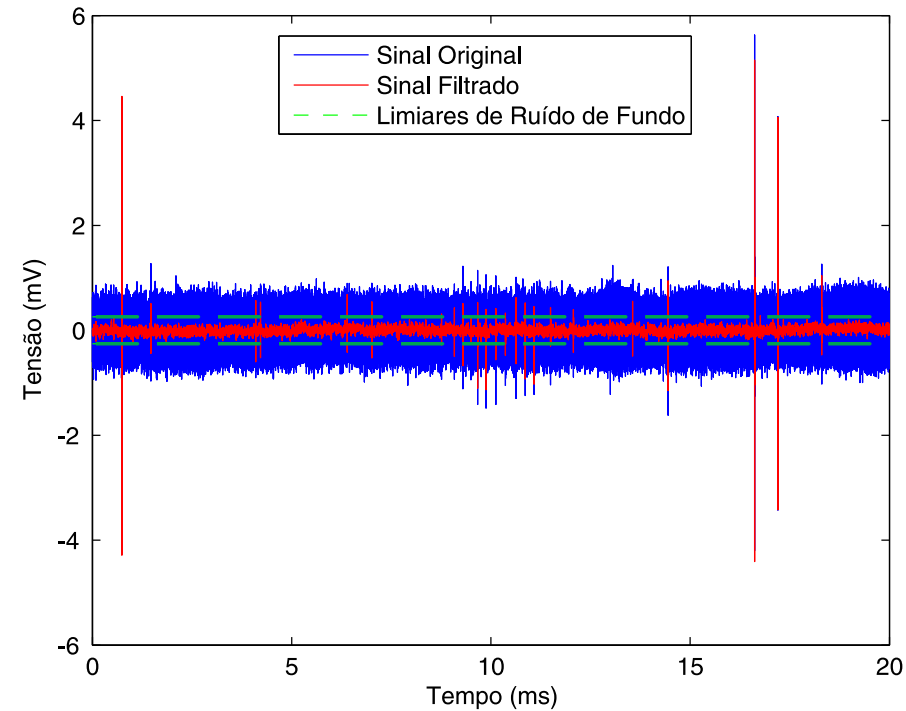


Coeficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o HFCT 200/150.

Resultados e Análises

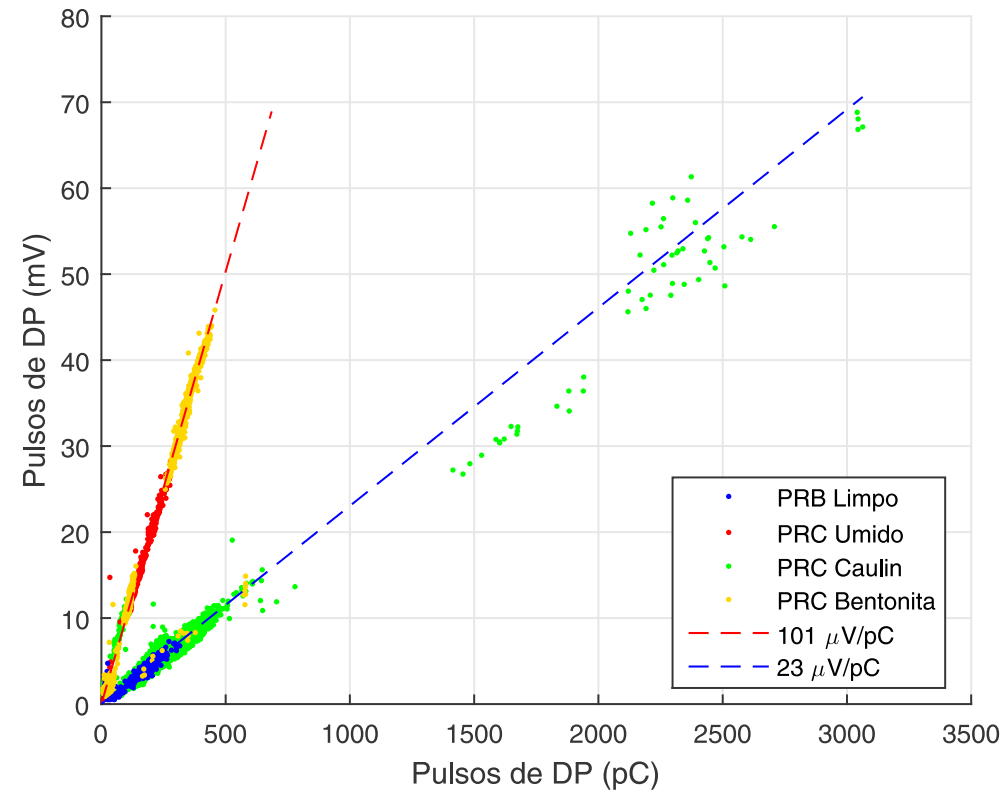
■ Resultado do Processo de Filtragem

Resultado do processo de
filtragem para o HFCT
200/150.



Resultados e Análises

Curvas de
correlação obtidas
para HFCT 140-
100HC.



Conclusões mais relevantes

- Na análise dos gráficos PRPD, verificou-se que cada defeito simulado permitiu a geração de sinais de descargas parciais com características bem definidas e diferentes entre si.
- Comprovou-se que a poluição superficial em para-raios pode provocar descargas internas e externas.
- Na parametrização dos HFCT, verificou-se um conjunto de pulsos de descargas parciais distribuídos em regiões bem definidas no plano bidimensional.

Conclusões mais relevantes

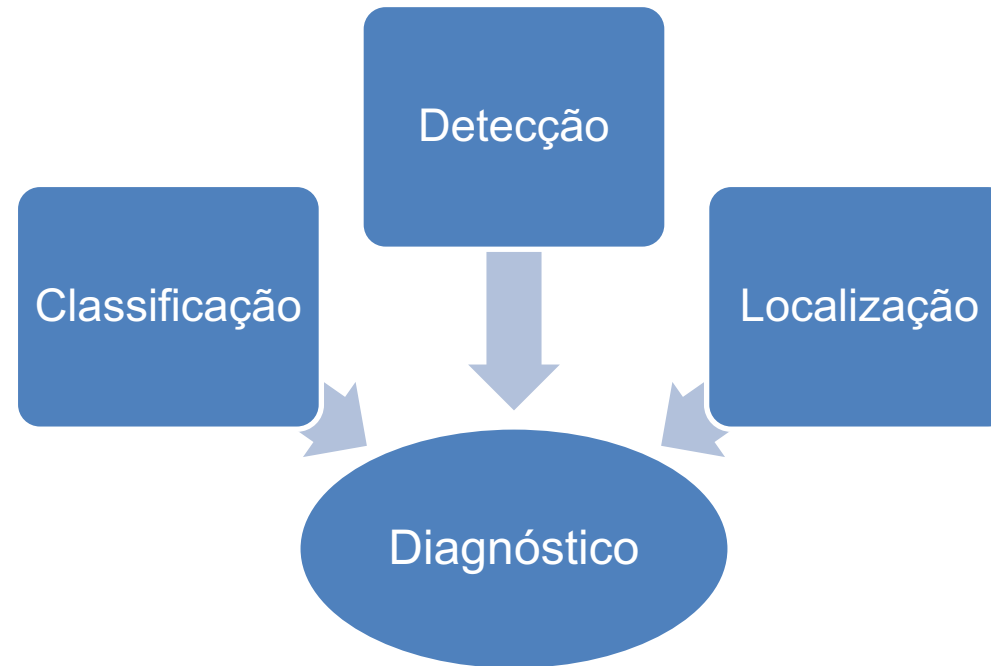
- Evidenciaram-se *dois clusters*, que representam pulsos internos no para-raios e pulsos ocorridos externamente na porcelana.
- As curvas que representam os *defeitos internos* representam os *fenômenos de interesse*, além de ser as mais conservativas. Por essa razão, devem ser as utilizadas em *medições em campo*.

Dissertação disponível no banco de dissertação da PPgEE da UFCG – Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega.

APLICAÇÃO DE ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS COM SUPERSTRATOS METAMATERIAIS NA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Contextualização

- O **monitoramento contínuo** da atividade de DP representa uma ferramenta poderosa para o **aprimoramento da qualidade** da energia e da **gestão de ativos** de uma concessionária de energia elétrica.



Relevância

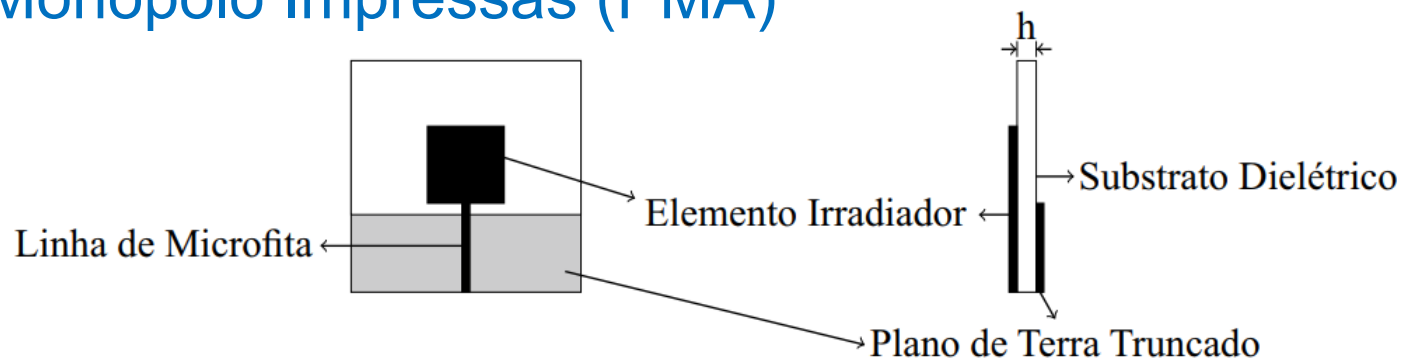
Método Radiométrico

- Detecção de ondas eletromagnéticas provenientes dos pulsos de corrente originários das DP na faixa de frequência de 300 – 3000 MHz (UHF);
- **Imunidade** a interferências;
- Minimamente **invasivo**.
- Eficiente na **detecção, classificação e localização de defeitos** em diversos equipamentos de alta tensão;
- Atualmente, projetos de equipamentos de alta tensão já consideram espaços específicos para a **alocação de sensores UHF**.

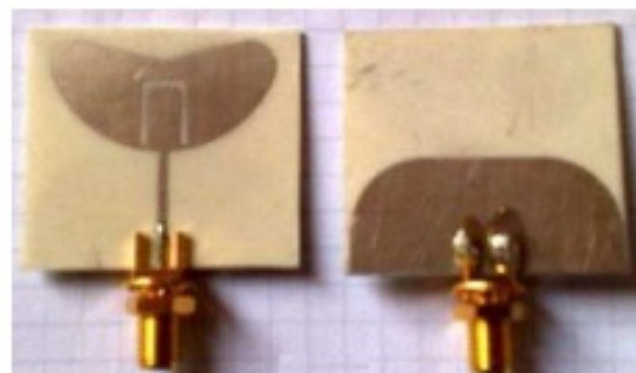
ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Motivação

Antenas Monopolo Impressas (PMA)



Geometrias fractais



Geometrias bio-inspiradas em plantas e animais



ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Motivação

Antenas Monopolo Impressas (PMA)

- **Vantagens**

- Baixo custo;
- Facilidade de instalação e construção;
- Diagramas de irradiação atrativos;
- Ampla largura de banda;
- Seleção de frequência e uso como filtro.

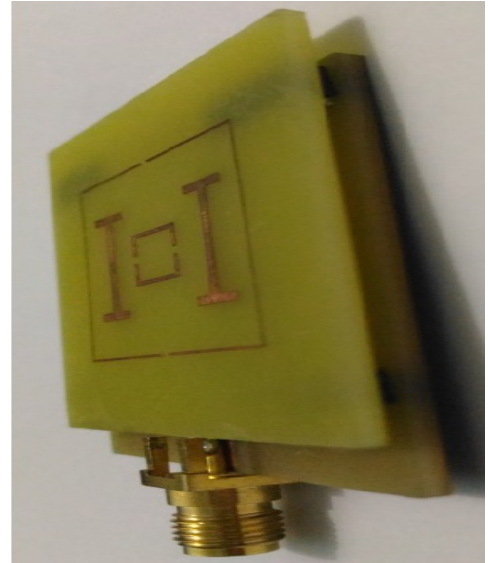
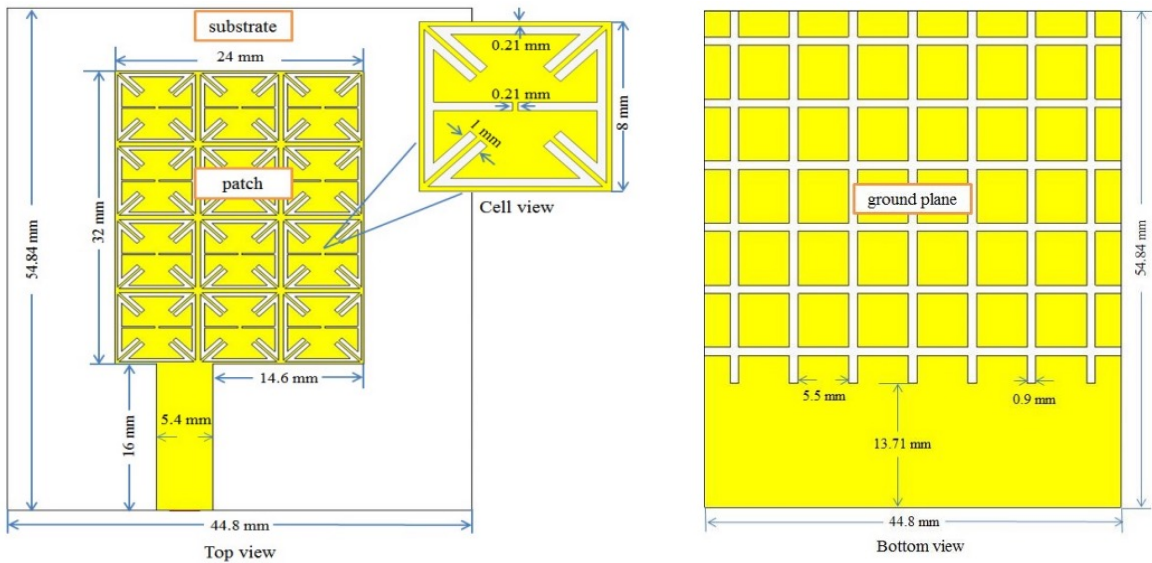
- **Desvantagens**

- Dimensões relativamente grandes para a faixa UHF, limitando sua aplicação prática, principalmente, quando **acopladas aos tanques dos equipamentos** de alta tensão por meio de **janelas dielétricas**.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Motivação

Metamateriais



ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Motivação

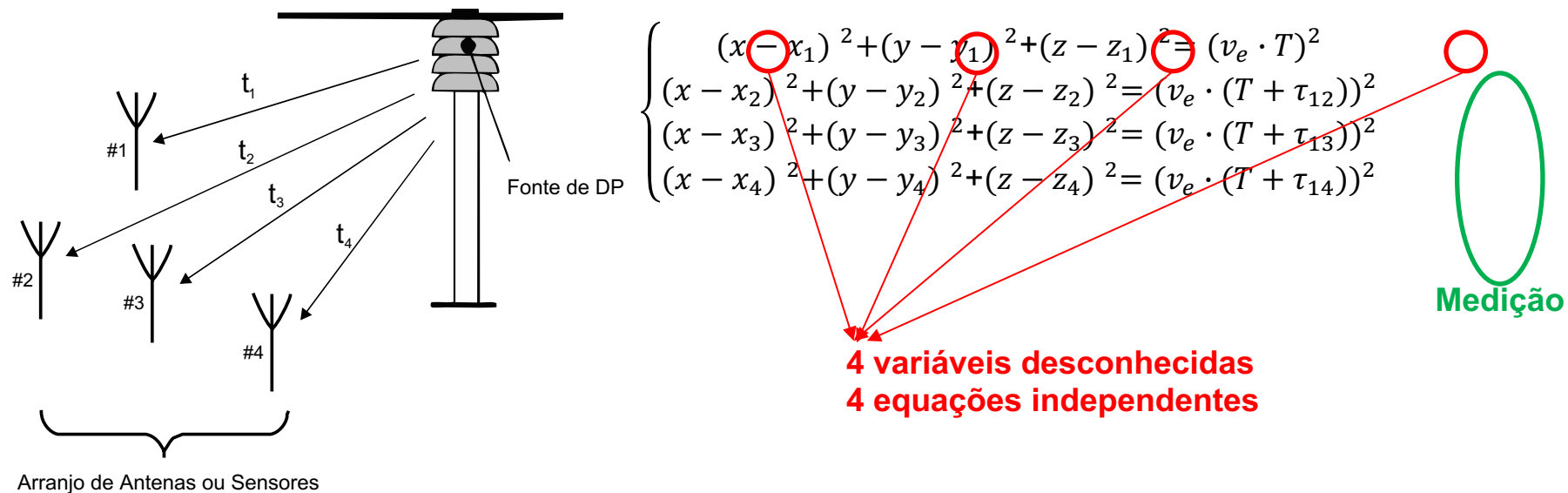
Metamateriais

- Vantagens
 - Característica de dupla negatividade de valores de permeabilidade magnética e permissividade elétrica.
- Aplicações
 - Modificações no elemento irradiador da antena;
 - Modificações no plano de terra;
 - Aplicações em superstratos dielétricos.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Motivação

Diferença de Tempo de Chegada (TDOA)



Visão conceitual de um sistema de localização de DP baseado no TDOA.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Objetivos

Geral

Desenvolver **um superstrato metamaterial** que possa ser aplicado em janelas dielétricas, visando o **aprimoramento do ganho** de PMA bio-inspiradas desenvolvidas para a detecção de DP.

Além disso, a **avaliação da eficiência da aplicação** de PMA na **localização de fontes de defeitos** também faz parte do objetivo geral desta pesquisa.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Objetivos

Específicos - Metamateriais

Investigar, via simulação, o impacto que **superstratos metamateriais** exercem sobre o **ganho e desempenho** de PMA bio-inspiradas;

Avaliar o **impacto da inserção**, na prática, da configuração **mais adequada** de superstrato metamaterial a partir de medições de **ganho e coeficiente de reflexão**;

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Objetivos

Específicos - Metamateriais

Verificar a **sensibilidade de detecção** de DP da PMA de **ganho aprimorado** por meio de comparativos com o método de medição da IEC 60270;

Avaliar, **em campo**, a **sensibilidade de detecção** de DP para as antenas **com e sem superstrato metamaterial**.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Objetivos

Específicos - Localização

Avaliar a **eficiência de técnicas de extração de TDOA na localização da fonte** de descargas parciais, a saber, primeiro pico e energia cumulativa;

Realizar uma **análise o impacto** que a **aplicação de técnicas de filtragem** de ruído exerce sobre o cálculo da TDOA;

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Objetivos

Específicos - Localização

Avaliar o **impacto sobre os resultados de localização** diante do uso de métodos de otimização para escolha de *wavelets* mãe no **processo de filtragem de ruído**;

Analisar a **influência que o erro de amostragem do instrumento de medição aplicado exerce sobre a estimação da localização** da fonte de DP.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Contribuições

As principais contribuições desta pesquisa são:

Desenvolvimento de uma metodologia de **aprimoramento da sensibilidade de detecção** de descargas parciais dos sensores UHF a partir da **adaptação de janelas dielétricas**;

Validação da eficiência da aplicação de PMA bio-inspiradas na **localização de fontes** de descargas parciais.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Considerações Finais

Metamateriais

Os metamateriais propostos apresentaram um **comportamento duplo negativo** para quase toda a frequência de principal atividade de DP (300 – 1500 MHz);

O **ganho médio medido** para a PMA bio-inspirada com superstrato metamaterial foi igual a **3,61 dBi**, resultando em um aumento de **0,7 dBi em relação a PMA bio-inspirada (2,92 dBi)**;

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Considerações Finais

Metamateriais

Nos **testes laboratoriais**, a PMA bio-inspirada com superstrato metamaterial foi capaz de detectar DP com **carga aparente superiores a 15 pC**;

Por fim, a PMA bio-inspirada com superstrato metamaterial se apresentou **eficaz na aplicação prática de detecção de DP**, visto que foi possível **detectar uma atividade significativa de DP** em um TC de 230 kV em operação.

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Considerações Finais

Localização de Fontes de DP

As **rotinas computacionais desenvolvidas** para a detecção automática dos instantes de primeiro pico e de ponto de joelho foram **eficazes no cálculo da TDOA**;

A aplicação das técnicas EBWS (*Energy Based Wavelet Selection*) e NWDLS (*Number of Wavelet Decomposition Levels*) foi **eficiente na filtragem do ruído** de fundo dos sinais do banco de dados avaliado, impactando de modo **pouco significativo** nos resultados de localização;

ANTENAS MONOPOLO IMPRESSAS BIO-INSPIRADAS

Considerações Finais

Localização de Fontes de DP

O **erro de localização** pode ser reduzido significativamente ao considerar o **erro de amostragem do instrumento de aquisição** nos cálculos de TDOA;

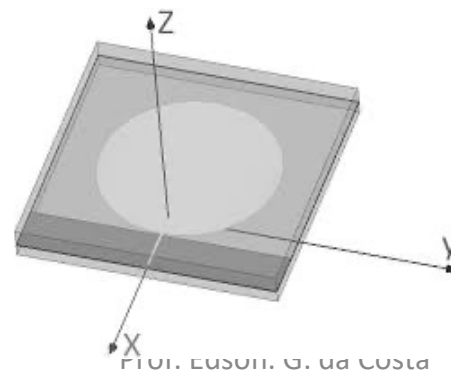
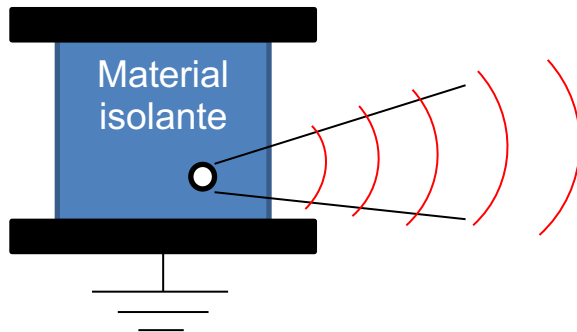
Por fim, **resultados satisfatórios de localização** foram obtidos para o espaço dimensional considerado (erros absolutos entre 5,40 cm e 10,96 cm), **atestando a potencialidade** para a aplicação prática de **PMA bio-inspiradas na localização de fontes de DP**.

Monitoramento Inteligente das Condições Operacionais de Transformadores de Corrente Por Descargas Parciais (Em andamento)

Monitoramento Inteligente

Motivação

- **Monitoramento e avaliação da degradação** do isolamento em campo são propostas diversas técnicas de medição:
 - **HFCT;**
 - **Antenas;**
 - **Sensores vibroacústicos**
- Importante: **monitoramento não invasivo**



Monitoramento Inteligente

Motivação

- A correta medição dos níveis de descargas parciais, especialmente quando em aplicações comerciais, carece da **minimização de ruído na medição**.
 - Descarga corona;
 - Descargas superficiais;
 - Sinal de rádio e TV;
 - Ruído branco.
- Necessidade de **identificar e separar fontes** de descarga ou ruído.

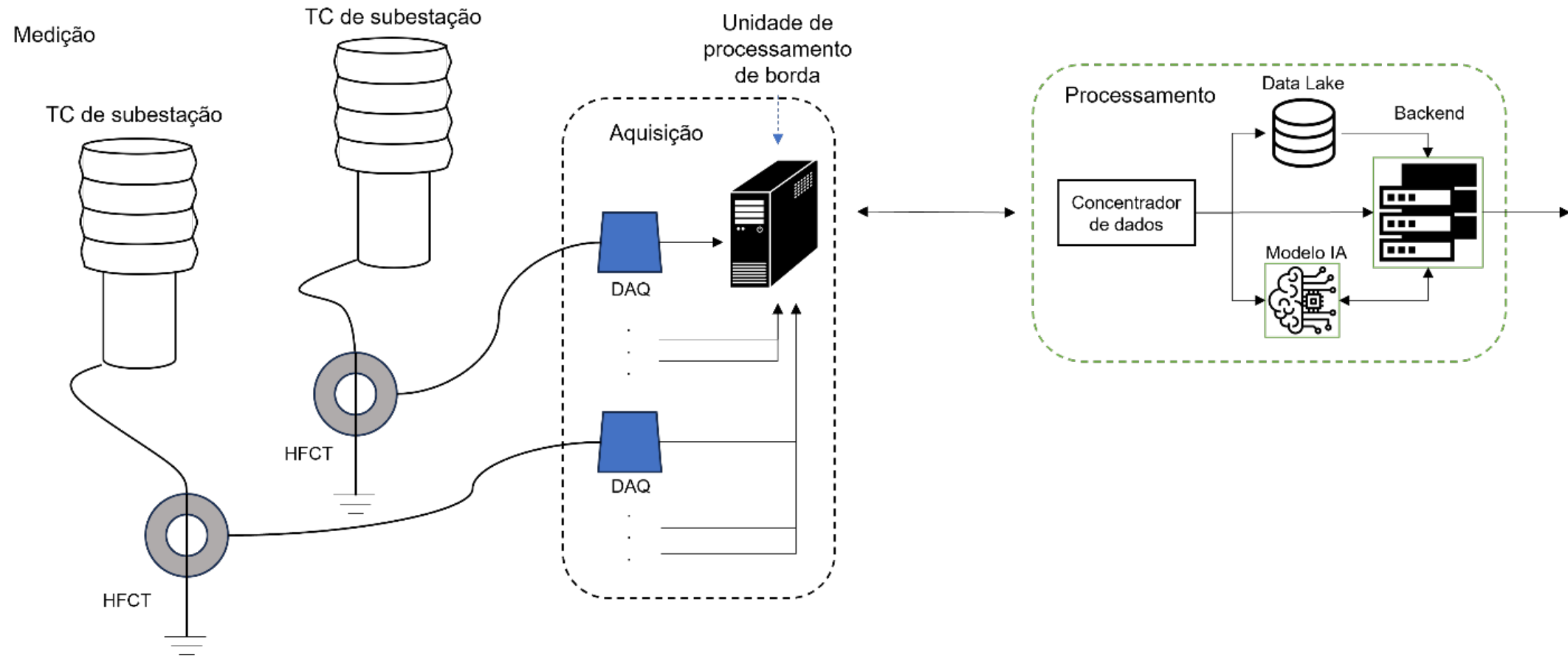
Monitoramento Inteligente

Objetivos

- Proposição de um sistema de monitoramento e previsão de falhas em transformadores de corrente.
 - Desenvolvimento de um sistema de medição de descargas parciais **minimamente invasivo**;
 - Análise das principais técnicas de separação de fontes de descargas e desenvolvimento de um sistema de identificação de descargas internas;
 - Desenvolvimento de modelos de identificação de falhas;
 - Desenvolvimento de modelos de previsão de falhas.

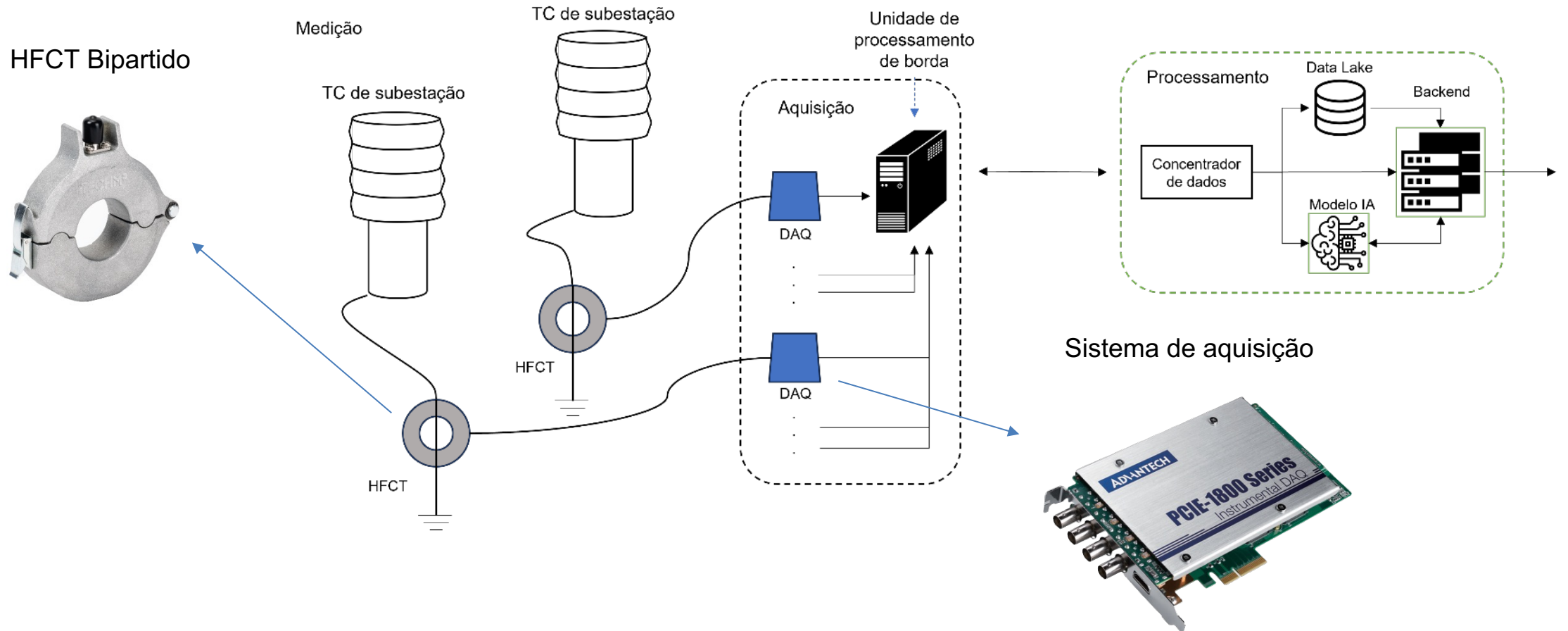
Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Medição



Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Medição



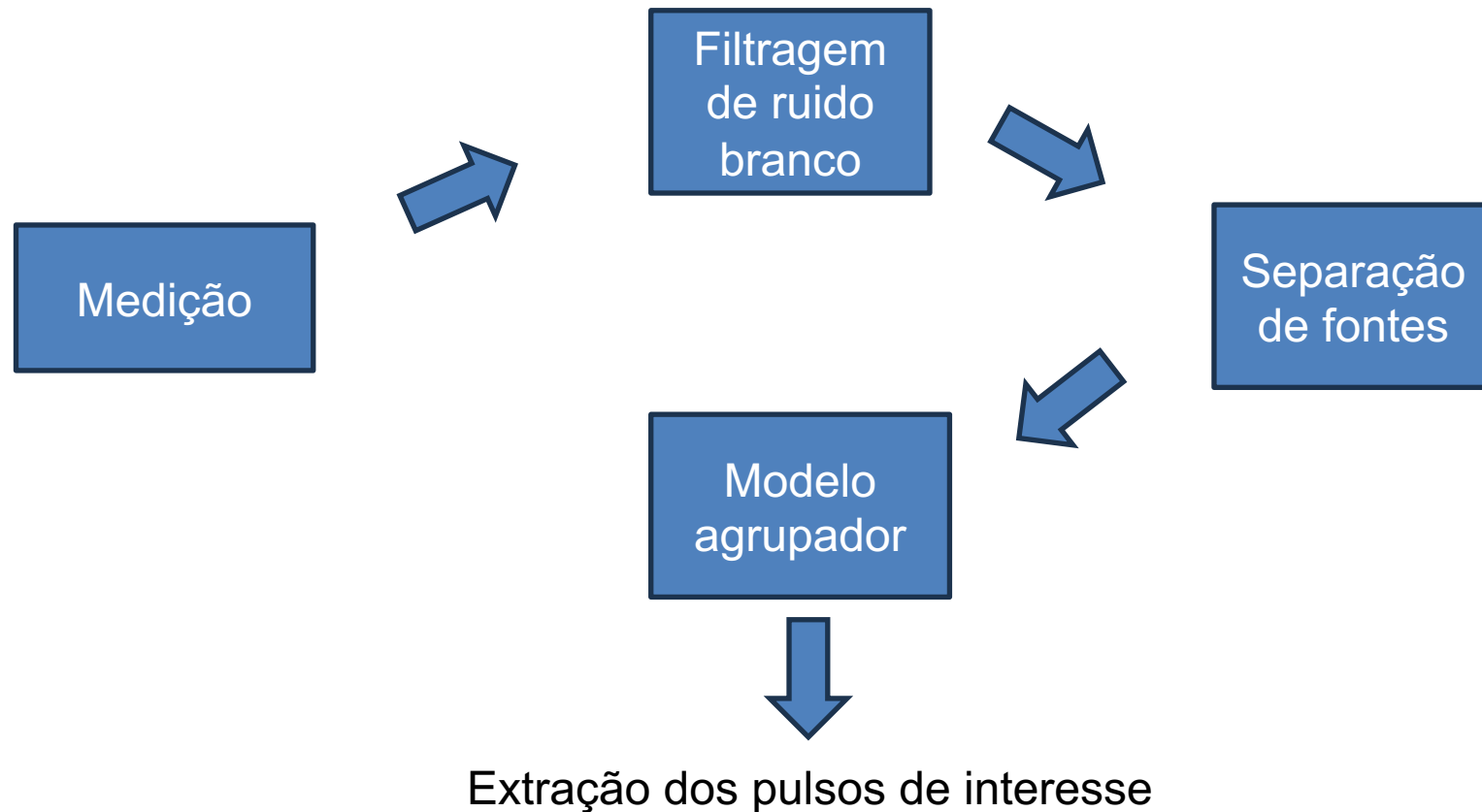
Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Rejeição de Ruído e Separação de Fontes

- Um sistema de monitoramento baseado na medição de descargas parciais deve ser capaz de identificar a fonte das descargas que está medindo;
- Muitas vezes as medições são formadas simultaneamente por:
 - Descarga Corona;
 - Descargas Superficiais;
 - Ruído Branco;
 - Além das Descarga Internas.
- Técnicas de separação e agrupamento podem ser utilizadas para identificar as **descargas internas** (foco principal do monitoramento).

Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Rejeição de Ruído e Separação de Fontes

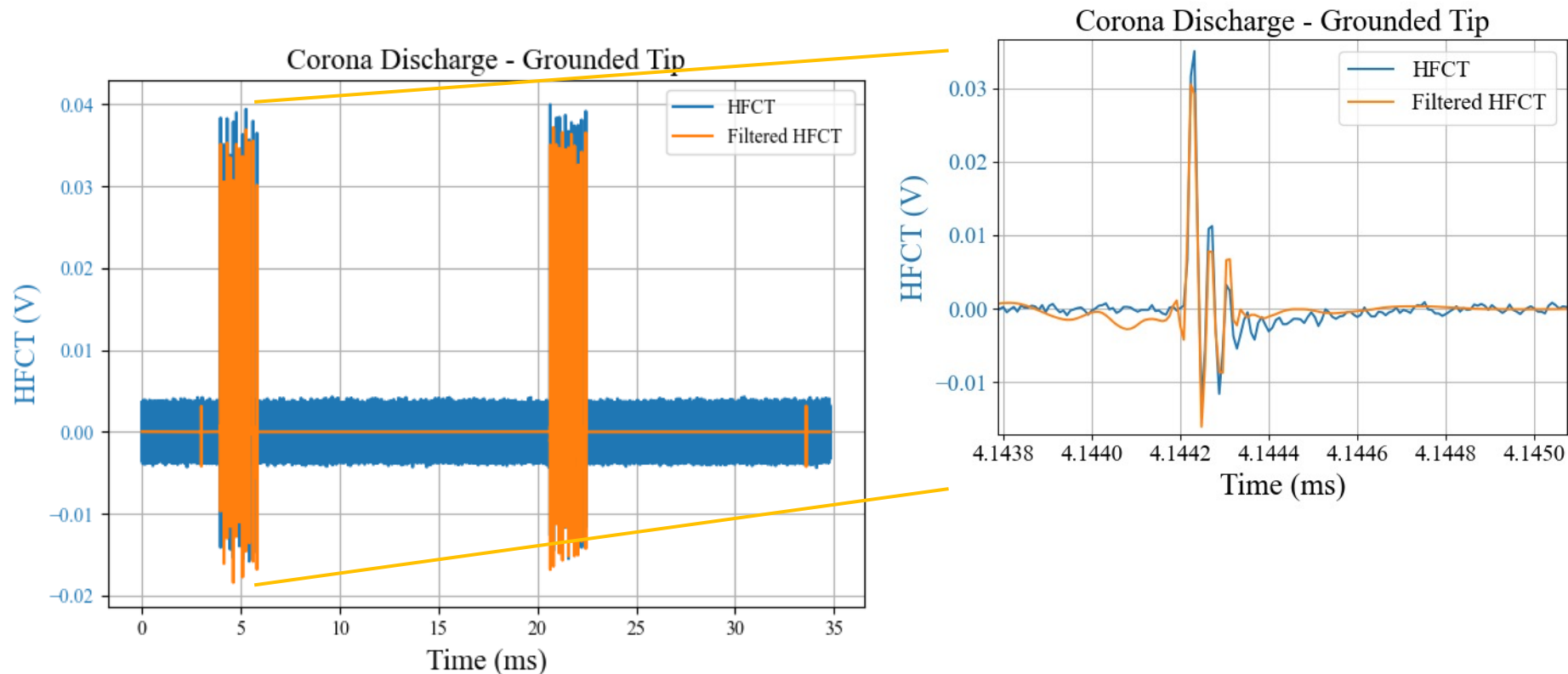


Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Rejeição de Ruído e Separação de Fontes

Filtragem

- Na filtragem utilizou-se a técnica *wavelet*

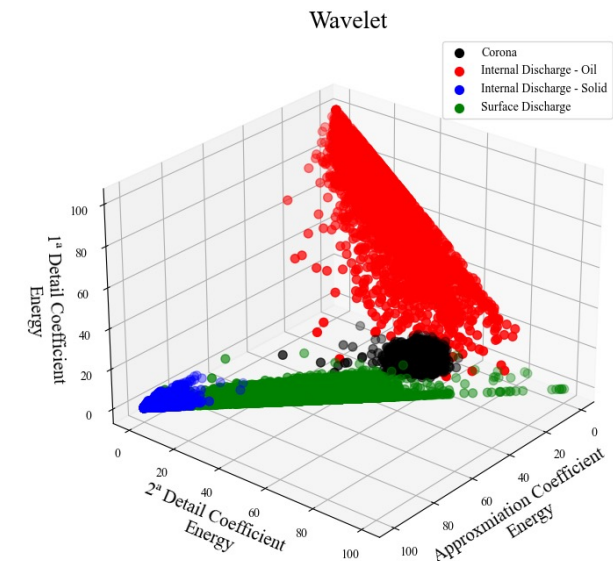
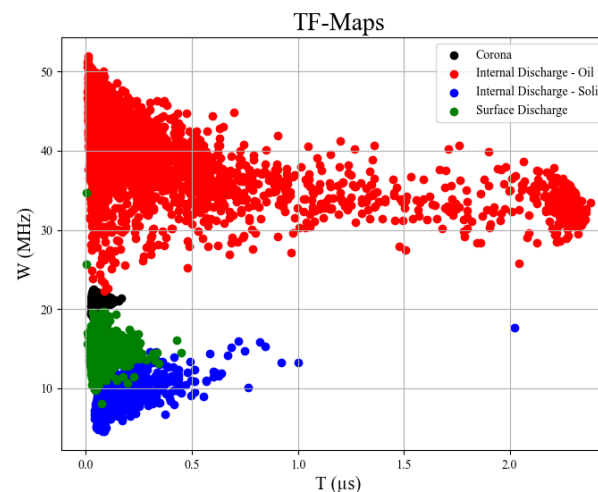
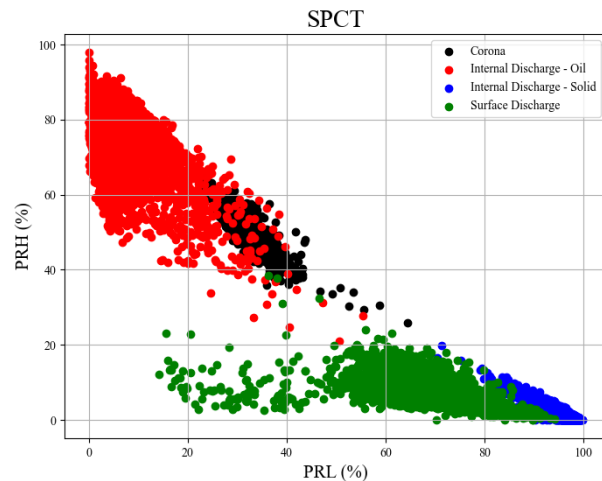


Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Rejeição de Ruído e Separação de Fontes

Técnicas de separação

- Após a filtragem, é necessário identificar, entre os pulsos medidos, quais são de interesse para o monitoramento;
- O princípio básico das **técnicas de separação** é **obter atributos** que possam caracterizar **a fonte da descarga** a partir do pulso medido.
- Ex: Largura de banda do sinal, tempo de duração médio, potência do sinal em diferentes faixas de frequência ...

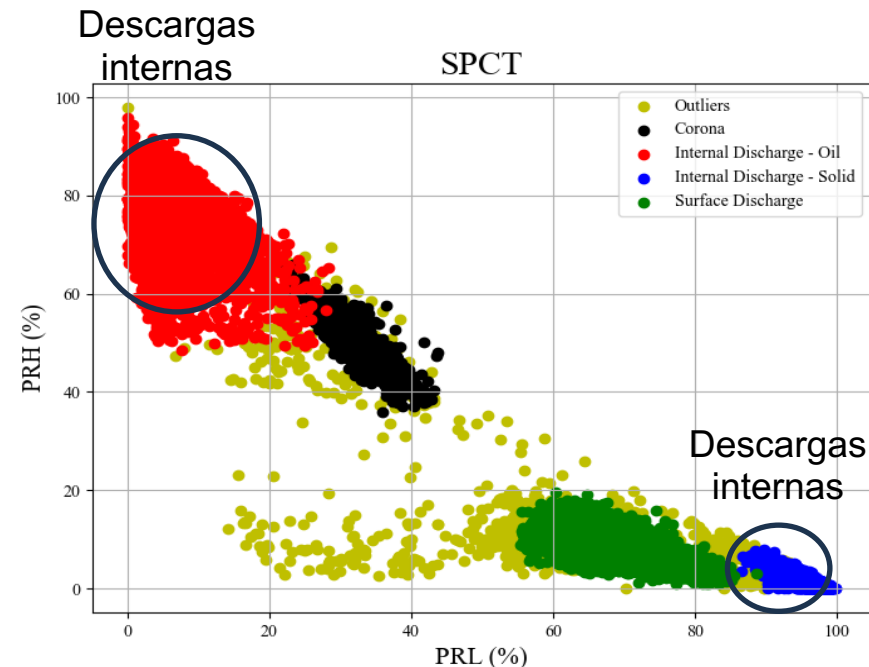


Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Rejeição de Ruído e Separação de Fontes

Agrupamento e identificação das descargas internas

- Após a aplicação das técnicas de separação, são utilizados **modelos de agrupamento** para identificar os **diferentes grupos de descargas**;
- As **descargas internas** são destacadas pois são o ponto de **interesse no monitoramento do equipamento**.

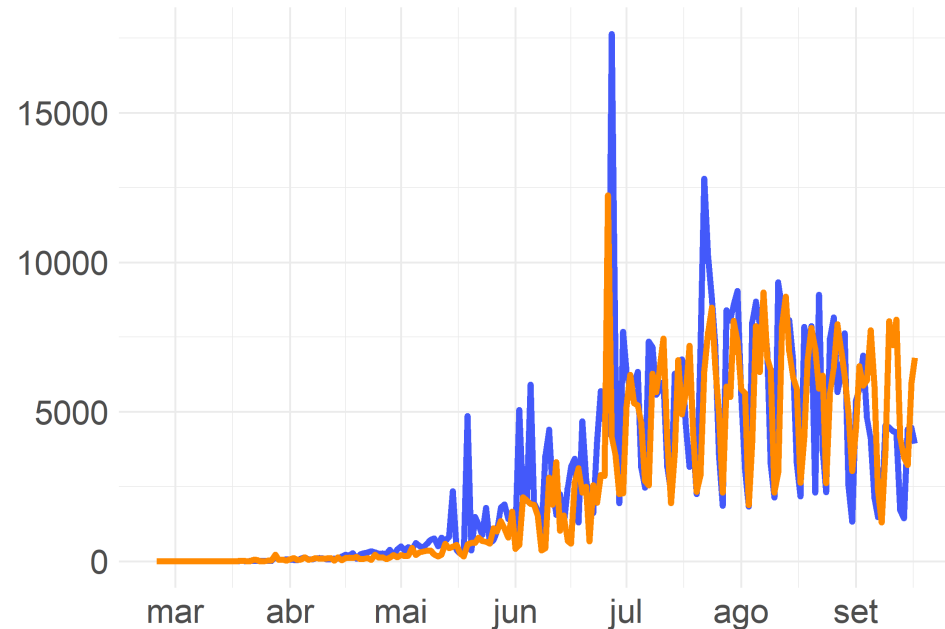


Monitoramento Inteligente

Desenvolvimento de um Sistema de Rejeição de Ruído e Separação de Fontes

Previsão

- A medição contínua de descargas parciais e o **crescimento do número de ocorrências** pode indicar o envelhecimento e uma **provável falha do equipamento**;
- Modelos de **previsão de séries temporais** podem ser utilizados para **estimar o tempo de vida útil restante** do TC.





Universidade Federal
de Campina Grande



**Obrigado pelo convite e pela
participação!**

Edson Guedes da Costa
edson@dee.ufcg.edu.br
+55 83 2101 1303

