



PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA – ITAJUBÁ
2021**



PD-06491-0509/2018

SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO DA DETERIORAÇÃO DE PARA- RAIOS

1. Projeto	3
2. Relatórios Mensais	53
3. Relatórios de Etapa	395
4. Solicitações de Ajuste	652
5. Processos de Compra	672

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS

CURITIBA – ITAJUBÁ
2021

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

Projeto

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA – ITAJUBÁ
2021**

Identificação

Título

SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO DA DETERIORAÇÃO DE PARA-RAIOS

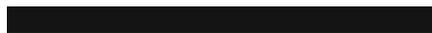
Gerente do projeto

 RAFAEL MARTINS

Coordenador do projeto

GERMANO LAMBERT TORRES

Gerente do programa



Empresa proponente

Razão social: COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A.

Nome fantasia: COPEL GET

Empresa(s) executora(s)

Razão social: INSTITUTO GNARUS

Nome fantasia: GNARUS

Duração do projeto



Valor total contratante



Valor total contratada



Valor total projeto



Resumo

Este projeto visa monitorar o desgaste de para-raios face à passagem das descargas atmosféricas. Será desenvolvido um sistema (hardware e software) para a monitoração on-line das condições das pastilhas desse equipamento através da técnica de espectro de impedância. Sinais de várias frequências serão injetados de forma inofensiva no para-raios para coletar sua resposta em frequência. Então, os algoritmos de processamento de sinais irão coletar estas respostas e estabelecer o grau de desgaste das pastilhas desse equipamento, que, ao final, representam a sua eficácia em conter as descargas atmosféricas que chegam via as linhas de transmissão na subestação. Os sinais serão injetados nos para-raios através de um dispositivo gerador de sinais a ser construído para esta finalidade. O sistema desenvolvido (hardware e software) será testado em laboratório com para-raios do tipo estação com resistores de óxido metálico visando estabelecer uma carta de desgastes, que é um tabela que tenta relacionar os eventos ocorridos no sistema elétrico com as queimas que vão ocorrendo nas pastilhas. O sistema desenvolvido será instalado em um para-raios da COPEL.

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

Relatórios Mensais

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA – ITAJUBÁ
2021**

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

Relatórios de Etapa

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA – ITAJUBÁ
2021**

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

**Relatório da Etapa 01: Revisão
Bibliográfica**

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA / ITAJUBÁ
2020**

INSTITUTO GNARUS

CNPJ/MF 07.863.331/0001-02

Rua Cel. Francisco Braz, 185 - Sala 302 - Centro, Itajubá - MG, 37500-052

PD-06491-0509/2018

SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO DA DETERIORAÇÃO DE PARA-RAIOS

Relatório da Etapa 01: Revisão Bibliográfica

DOCUMENTO RESTRITO

RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS

CURITIBA / ITAJUBÁ
2020

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	DESENVOLVIMENTO DA ETAPA.....	13
2.1	DESENVOLVIMENTOS POR ÁREA DE ATUAÇÃO	13
2.2	OBJETIVOS DO PROJETO.....	15
2.3	ESTADO DA ARTE E TRABALHOS CORRELATOS	15
2.3.1	Revisão dos principais trabalhos sobre o efeito das descargas atmosféricas sobre as pastilhas dos para-raios.....	16
2.3.2	Revisão da técnica de espectroscopia de impedância	17
2.3.3	Revisão dos projetos de P&D da ANEEL para outras empresas	19
2.3.4	Revisão dos projetos correlatos desenvolvidos por este grupo de pesquisa...	19
3	REVISÃO SOBRE AS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA	21
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS.....	21
3.1.1	Perdas dielétricas.....	22
3.1.2	Teste do índice de polarização	25
3.1.3	Teste de corrente de fuga com rampa de tensão.....	26
3.2	ESTUDO DA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA	27
3.2.1	Técnica da análise por espectroscopia dielétrica - <i>DS</i>	28
3.2.2	Técnica da análise por espectroscopia eletroquímica - <i>EIS/IS</i>	34
3.2.3	Técnica da análise por resposta em frequência - <i>FRA</i>	36
3.3	CONCLUINDO.....	62
4	REVISÃO SOBRE AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DOS PARA-RAIOS	65
4.1	METAS DE TESTES DE CAMPO	65
4.2	MODOS DE FALHA	67
4.3	MÉTODOS DE MONITORAMENTO ON-LINE	70

4.3.1	Imagem infravermelha	70
4.3.2	Componente resistivo da corrente	72
4.3.3	Medição de Terceiro Harmônico.....	73
4.3.4	Temperatura Absoluta	73
4.3.5	Perda de energia na MOV	74
4.4	CONCLUINDO	74
5	ELEMENTOS DE UMA PASTILHA MOV	75
5.1	MATÉRIAS-PRIMAS E PROCESSOS FABRIS DE UMA PASTILHA MOV	76
5.1.1	Processo de fabricação de uma pastilha MOV.....	76
5.1.2	Condição Física	77
5.1.3	Teste de Impulso de Alta Corrente.....	78
5.2	CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UMA PASTILHA MOV	79
5.2.1	Sensível térmico de uma pastilha MOV	79
5.2.2	Envelhecimento de uma pastilha MOV	80
5.3	TESTES DE ROTINA	81
6	FALHAS EM PARA-RAIOS POLIMÉRICOS ABRIGADOS E SUAS CAUSAS	83
6.1	AS FALHAS E A UMIDADE.....	83
6.2	DESCRIÇÃO DE PARA-RAIOS POLIMÉRICOS ABRIGADOS.....	84
6.3	DEGRADAÇÃO DE ZNO EM PARA-RAIOS.....	85
6.3.1	Defeito de vedação.....	86
6.3.2	Entrada de umidade	87
6.3.3	Influência da umidade no ZnO do para-raios	88
6.4	MODOS DE FALHAS DE ZNO EM PARA-RAIOS	88
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
8	REFERÊNCIAS.....	95
8.1	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 2	95

8.2	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 3.....	97
8.3	REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 6.....	97

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

**Relatório da Etapa 02: Estudo da
Espectroscopia de Impedância nos
Para-Raios**

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA / ITAJUBÁ
2020**

INSTITUTO GNARUS

CNPJ/MF 07.863.331/0001-02

Rua Cel. Francisco Braz, 185 - Sala 302 - Centro, Itajubá - MG, 37500-052

PD-06491-0509/2018

SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO DA DETERIORAÇÃO DE PARA-RAIOS

Relatório da Etapa 02: Estudo da Espectroscopia de Impedância nos Para- Raios

DOCUMENTO RESTRITO

RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS

CURITIBA / ITAJUBÁ
2021

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	DESENVOLVIMENTO DA ETAPA.....	9
2.1	DESENVOLVIMENTO POR ÁREA DE ATUAÇÃO	9
2.2	OBJETIVOS DO PROJETO.....	12
3	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA	13
3.1	ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	13
3.2	ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	19
3.3	TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIS/IS).....	25
3.4	TÉCNICA DE ANÁLISE POR RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRA)	30
3.5	RESULTADOS DIVERSOS DE FRA PUBLICADOS PARA MÁQUINAS ROTATIVAS	33
4	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ACOPLAMENTO PASSIVO.....	39
4.1	MÉTODOS DE ACOPLAMENTO PASSIVO USADOS EM SISTEMAS PLC.....	40
4.2	MÉTODOS DE ACOPLAMENTO PASSIVO PROPOSTOS PARA FRA ON-LINE DE TRANSFORMADORES	46
4.3	MÉTODOS DE ACOPLAMENTO PASSIVO USADOS EM MONITORAÇÃO ON-LINE DA DEGRADAÇÃO DE ISOLAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS.....	49
5	PROJETO DE ACOPLAMENTO PASSIVO	53
6	ESTUDO DE TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA PARA ISOLAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	57
6.1	TÉCNICAS DE GERAÇÃO E ANÁLISE DE DISTÚRBIOS PARA IFRA	57
6.2	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DISTÚRBIOS IFRA	59
7	REFERÊNCIAS	65

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

**Relatório da Etapa 03:
Desenvolvimento de Sensores e
Algoritmos de Injeção dos Sinais**

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA / ITAJUBÁ
2021**

INSTITUTO GNARUS

CNPJ/MF 07.863.331/0001-02

Rua Cel. Francisco Braz, 185 - Sala 302 - Centro, Itajubá - MG, 37500-052

PD-06491-0509/2018

SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO DA DETERIORAÇÃO DE PARA-RAIOS

Relatório da Etapa 03: Desenvolvimento de Sensores e Algoritmos de Injeção dos Sinais

DOCUMENTO RESTRITO

RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS

CURITIBA / ITAJUBÁ
2021

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	DESENVOLVIMENTO DA ETAPA.....	9
2.1	DESENVOLVIMENTO POR ÁREA DE ATUAÇÃO	9
2.2	OBJETIVOS DO PROJETO.....	12
3	MONITORAMENTO DE PARA-RAIOS	15
3.1	EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO	15
3.1.1	LCM500 leakage current monitor	15
3.1.2	SA 30i+ leakage current monitor	16
3.1.3	Surge monitor EXCOUNT-II	17
3.1.4	SAM 3.0 surge arrester monitoring system	18
3.1.5	SCAR-10 surge arrester testing	19
3.1.6	3EX5 050-0	19
3.1.7	ACM advanced 3EX5 080-1	20
3.1.8	ALCL-40L.....	21
3.2	TRANSFORMADORES DE CORRENTE	22
3.2.1	ETCR0xxKU série	22
3.2.2	CT-xxx série	23
3.3	PROBES	24
3.3.1	N278xB série	24
4	ALGORITMO DE VARREDURA	27
4.1	ESTRUTURA DESENVOLVIDA PARA TESTES	27
4.2	VARREDURAS DE VALIDAÇÃO	29
4.2.1	Limites de medidas	29
4.2.2	Varreduras em resistor	30

4.2.3	Varreduras em capacitor	31
4.2.4	Varreduras em arranjo RC	33
5	ACOPLAMENTO PARA OPERAÇÃO ON-LINE	35
5.1	O ACOPLAMENTO E O EFEITO DE “SOMBRA” NO ESPECTRO	35
5.2	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO FILTRO DE ACOPLAMENTO	36
5.3	ACOPLAMENTO PASSIVO PURO	44
5.3.1	Teste de atenuação	47
5.4	ACOPLAMENTO PASSIVO BUFFERIZADO COM AMPOPS	55
5.5	MONTAGEM E TESTE DAS PLACAS BUFFER	63
5.6	PROTEÇÃO CONTRA TRANSITÓRIOS	72
5.6.1	Teste de varredura espectral offline com as placas buffer	76
5.6.2	Teste online com acoplamento 25nF-800mH-25nF e SAC6.0	79

PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

Solicitações de Ajuste

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA – ITAJUBÁ
2021**



PD-06491-0509/2018

**SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO
DA DETERIORAÇÃO DE PARA-
RAIOS**

Processos de Compra

Ano 1

DOCUMENTO RESTRITO

**RAFAEL MARTINS – COPEL GeT
GERMANO LAMBERT-TORRES - INSTITUTO GNARUS**

**CURITIBA – ITAJUBÁ
2021**

672