

## Projeto de P&D

Desenvolvimento de um Sistema de  
Detecção Online de Falhas no  
Isolamento de Motores Elétricos pelo  
Método da Resposta em Frequência

### Relatório Atividades

**Descrição:**

Relatório Final das Atividades Realizadas  
no Projeto

**Relatório EDF**

F01-00 / Revisão 00

**Código ANEEL**

PD-00678-0219/2019

# Projeto de P&D

Desenvolvimento de um Sistema de Detecção Online de Falhas no Isolamento de Motores Elétricos pelo Método da Resposta em Frequência

## **Relatório Final**

Atividades Realizadas no Projeto

**Relatório EDF-NF**  
F01-00 / Revisão 00

Relatório Elaborado por:

---

**Erik Leandro Bonaldi**  
Coordenador do Projeto  
Instituto Gnarus

---

**Rafael Bartholomeu Bernardo Carvalho**  
Gerente do Projeto  
EDF

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E RESPECTIVAS EQUIPES EXECUTORAS .....	11
1.2	ALTERAÇÃO NA EQUIPE EXECUTORA .....	13
1.3	HISTÓRICO DA LINHA DE PESQUISA.....	16
<b>2</b>	<b>APRESENTAÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO DO PROJETO .....	17
2.2	PALAVRAS-CHAVES .....	17
2.3	JUSTIFICATIVA DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	17
2.4	ESTADO-DA-ARTE DA ÁREA DO PROJETO .....	18
2.5	METODOLOGIA ADOTADA NO PROJETO.....	19
2.6	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO .....	20
2.6.1	Levantamento Estatístico sobre Falhas em Máquinas Rotativas.....	20
2.6.2	Estudo dos Processos de Falhas em Máquinas Elétricas.....	21
2.6.2.1	Mecanismos de falhas em isolamentos.....	21
2.6.2.2	Caracterização das propriedades dielétricas.....	23
2.6.2.3	Perdas dielétricas.....	26
2.6.3	Estudo das Técnicas de Diagnóstico de Falhas em Máquinas Elétricas.....	28
2.6.3.1	Inspeção visual .....	29
2.6.3.2	Teste de resistência ôhmica dos enrolamentos .....	29
2.6.3.3	Teste de resistência do isolamento .....	30
2.6.3.4	Teste do índice de polarização.....	31
2.6.3.5	Teste Hipot (AC e DC) .....	32
2.6.3.6	Monitoramento de descargas parciais.....	32
2.6.3.7	Medição de capacitância .....	34
2.6.3.8	Teste da tangente de perdas.....	34
2.6.3.9	Surge test (teste de impulso) .....	34
2.7	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA.....	35
2.7.1	Técnica de Espectroscopia Dielétrica (DS) .....	35
2.7.1.1	Espectroscopia dielétrica no domínio do tempo.....	36
2.7.1.2	Espectroscopia dielétrica no domínio da frequência .....	41
2.7.2	Técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS/IS) .....	47
2.7.3	Técnica de Análise por Resposta em Frequência (FRA).....	52
2.7.3.1	Descrição da técnica.....	52
2.7.3.2	Resultados diversos de FRA publicados na literatura científica .....	55
2.8	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ACOPLAMENTO PASSIVO.....	59
2.8.1	Métodos de Acoplamento Passivo usados em Sistemas PLC.....	61
2.8.2	Métodos de Acoplamento Passivo propostos para FRA On-line de Transformadores .....	67
2.8.3	Métodos de Acoplamento Passivo usados em Monitoração On-line da Degradação de Isolamento de Máquinas Rotativas .....	70
2.8.4	Projeto de Acoplamento Passivo .....	72
2.9	ESTUDO DE TÉCNICAS DE FRA OU PLC QUE NÃO REQUEREM ACOPLAMENTO PASSIVO .....	75
2.9.1	Técnicas de Geração e Análise de Distúrbios para IFRA.....	76

2.9.1.1	Técnicas de geração de distúrbios IFRA .....	76
2.9.1.2	Técnicas de análise de distúrbios IFRA.....	78
2.9.2	Técnicas de Compensação Ativa .....	82
2.10	CONCLUSÕES DESTA SEÇÃO.....	88
2.11	REFERÊNCIAS DESTA SEÇÃO .....	90
<b>3</b>	<b>ETAPAS DESTE PROJETO .....</b>	<b>99</b>
3.1	ETAPAS E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO .....	99
3.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROJETO .....	102
<b>4</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES E ORIGINALIDADE DO PROJETO .....</b>	<b>237</b>
4.1	ESTUDO DE ANTERIORIDADE .....	237
4.1.1	Busca no Banco de Dados da ANEEL.....	237
4.1.2	Busca no INPI .....	238
4.1.2.1	Busca por "Espectro de Impedância" .....	238
4.1.2.2	Busca por "Isolamento Motor".....	239
4.1.2.3	Busca por "Frequência Isolamento" .....	240
4.1.2.4	Busca por "Falhas Isolamento" .....	240
4.1.3	Conclusão da Busca de Anterioridade Realizado antes do Início do Projeto..	240
4.1.4	Busca de Anterioridade Realizado para o Pedido de Patente 1 .....	241
4.1.5	Busca de Anterioridade Realizado para o Pedido de Patente 2 .....	242
4.1.6	Análise da Contribuição do Projeto Face às Patentes Pesquisadas .....	243
4.2	CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO-DA-ARTE .....	243
4.2.1	Contribuições Científicas do Projeto .....	244
4.2.1.1	Método para Direcionamento da Corrente de Alta frequência Injetada .....	246
4.2.1.2	Método para Realizar o Bloqueio Ativo de Tensão da Rede .....	256
4.2.1.2.1	Métodos Monofásicos para Extração de Referências .....	256
4.2.1.2.1.1	Método por Adaptive Noise Cancellation (ANC).....	256
4.2.1.2.1.2	Método Goertzel.....	258
4.2.1.2.1.3	Método Notch .....	259
4.2.1.2.2	Métodos Trifásicos para Extração de Referências.....	260
4.2.1.2.2.1	Método da potência reativa instantânea (p-q) .....	260
4.2.1.2.2.2	Método da referência síncrona (SRF) .....	262
4.2.1.2.2.3	Simulação do acoplamento ativo para bloqueio de alta tensão ..	265
4.2.1.2.3	Acoplamento Ativo .....	266
4.2.1.2.3.1	Prova de conceito do acoplamento ativo .....	267
4.3	CONTRIBUIÇÕES TECNOLÓGICAS DO PROJETO .....	283
4.3.1	Dispositivo ativo para direcionamento ativo de corrente de alta frequência em rede energizada.....	283
4.3.1.1	Estudo, Modelagem e Simulação de Bobinas do tipo Rogowski.....	283
4.3.1.1.1	Modelagem matemática de bobinas do tipo Rogowski .....	285
4.3.1.1.2	Núcleo toroidal com seção retangular .....	286
4.3.1.1.3	Núcleo toroidal com seção circular .....	288
4.3.1.1.4	Formulário resumo .....	289
4.3.1.2	Construção das bobinas.....	290
4.3.1.2.1	Núcleo impresso e bobinagem.....	294

4.3.1.2.2 Varreduras de parametrização nas bobinas .....	295
4.3.1.2.3 Bobinas com núcleo de ferrite .....	301
4.3.1.3 Experimentos de acoplamento e desacoplamento das bobinas .....	309
4.3.1.3.1 Injeção no secundário e medição no primário .....	309
4.3.1.3.2 Injeção no primário e medição no secundário .....	320
4.3.1.4 Sistema de Direcionamento da Corrente de Alta Frequência.....	330
4.3.2 Dispositivo ativo baseado em um filtro ativo para testes de máquinas elétricas ou linhas de transmissão energizadas .....	333
4.3.2.1 Projeto do acoplamento ativo real .....	333
4.3.2.2 Projeto do Sistema de Bloqueio de Alta Tensão .....	357
4.3.2.2.1 Definição dos Elementos Passivos de Potência do Conversor MMC Bifásico .....	357
4.3.2.2.2 Definição dos Circuitos de Interface Ótica e Disparo dos IGBTs.....	360
4.3.2.2.2.1 Circuito de disparo (gate-driver) dos IGBTs.....	360
4.3.2.2.2.2 Circuito de interface por fibras ópticas .....	367
4.3.2.2.3 Idealização do sistema como um todo .....	370
4.3.2.2.4 Entrada DC dos conversores série .....	379
4.3.2.2.4.1 Entrada DC por retificador a diodos .....	379
4.3.2.2.4.2 Entrada DC por retificador ativo MMC shunt.....	380
4.3.2.2.5 Teste da comunicação por fibra óptica.....	382
4.3.2.2.6 Teste dos gate-drivers.....	385
4.3.2.2.7 Kit FPGA .....	390
4.3.2.2.8 Kit DSP .....	404
4.3.2.3 Projeto, Montagem e Testes das Placas.....	410
4.3.2.3.1 Placa de interface GPIO - fibras ópticas .....	410
4.3.2.3.2 Projeto CAD da placa de interface ótica .....	413
4.3.2.3.3 Placa de interface óptica finalizada e testes .....	414
4.3.2.3.4 Placa de submódulo (SM) em meia ponte .....	422
4.3.2.3.5 Projeto CAD da placa SM .....	427
4.3.2.3.6 Placa SM finalizada e testes .....	429
4.3.2.3.6.1 Teste em configuração ponte H.....	435
4.3.2.3.6.2 Teste em configuração ponte trifásica.....	439
4.3.2.3.6.3 Teste em configuração multinível pontes H em cascata (CHB)...	441
4.3.2.3.6.4 Teste em configuração multinível MMC.....	444
4.3.2.3.7 Placa do conversor de autoalimentação dos SMs .....	448
4.3.2.3.8 Projeto CAD de auto alimentação .....	449
4.3.2.3.9 Placa de autoalimentação finalizada .....	450
4.3.2.3.10 Placa sensor Hall de baixa tensão .....	451
4.3.2.3.11 Projeto CAD da placa LV2-P .....	453
4.3.2.3.12 Placa LV25-P finalizada .....	454
4.3.2.3.13 Placa condicionamento de sinais analógicos .....	454
4.3.2.3.13.1 Circuito do filtro passa baixas .....	455
4.3.2.3.13.2 Circuito para atenuação .....	456
4.3.2.3.13.3 Circuito para offset .....	456
4.3.2.3.13.4 Regulador de tensão para o último estágio.....	458

4.3.2.3.13.5 Projeto CAD da placa de condicionamento analógico (para quatro canais) .....	459
4.3.2.3.13.6 Placa de condicionamento analógico finalizada e testes.....	461
4.3.3 Sistema de Varreduras – FRA Online.....	466
4.3.3.1 Especificação das Placas .....	467
4.3.3.1.1 Circuitos integrados dedicados para varredura espectral .....	467
4.3.3.1.2 Circuitos integrados dedicados para geração de formas de ondas....	468
4.3.3.1.3 Conversores analógico-para-digital de alta velocidade .....	468
4.3.3.1.4 Kits de desenvolvimento para FPGAs contendo ADCs e DACs de alta velocidade .....	470
4.3.3.2 Descrição da Placa Escolhida.....	472
4.3.3.2.1 Informações técnicas do dispositivo.....	473
4.3.3.2.2 Conversor analógico-digital (ADC) de alta velocidade.....	476
4.3.3.2.3 Conversor digital-analógico (DAC) de alta velocidade.....	484
4.3.3.3 Desenvolvimento do Hardware.....	487
4.3.3.3.1 Sistema de geração de sinais .....	487
4.3.3.3.2 Sistema de aquisição de sinais .....	492
4.3.3.3.3 Sistema de geração e aquisição de sinais.....	502
4.3.3.3.4 Desenvolvimento do circuito de medição .....	504
4.3.3.4 Desenvolvimento do Software .....	507
4.3.3.4.1 Software servidor .....	507
4.3.3.4.2 Software cliente .....	508
4.3.3.5 Ensaios em Máquina de Indução .....	515
4.3.3.5.1 Espectros obtidos com a aplicação da técnica de FRA.....	515
4.3.3.5.2 Análise através de indicador estatístico.....	517
4.3.3.6 Ensaios em Máquina Síncrona .....	518
4.3.3.6.1 Espectros obtidos com a aplicação da técnica de FRA.....	519
4.3.3.6.2 Análise através de indicador estatístico.....	520
4.4 CONFECÇÃO E MONTAGEM FINAL DAS PLACAS DO PROTÓTIPO .....	521
4.4.1 Placas analógicas.....	522
4.4.1.1 Placa analógica single-ended.....	524
4.4.2 Placas de acionamento óptico.....	526
4.4.2.1 Placa de acionamento óptico - lado da eletrônica (2i+2o).....	526
4.4.2.2 Placa de acionamento óptico - lado da potência (relé).....	530
4.4.3 Placa de interface óptica (conexão com SMs) .....	533
4.4.4 Placa Mãe .....	535
4.4.4.1 Conexão das placas analógicas ao DSP .....	535
4.4.4.2 Conexão das placas de interface óptica ao DSP.....	537
4.4.4.3 Conexão das placas de interface óptica ao FPGA e comunicação entre DSP e FPGA .....	538
4.4.4.4 Conexão das placas de acionamento óptico ao DSP.....	541
4.4.4.5 Projeto CAD da placa mãe .....	543
4.5 SOFTWARE FINAL DE ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA .....	550
4.5.1 Interface do Sistema Desenvolvido com o Usuário .....	553
4.5.1.1 Tela de aquisições.....	554
4.5.1.2 Tela de análises estatísticas .....	557
4.5.1.3 Tela de sinais no tempo.....	559

4.5.1.4	Tela de agendamento.....	560
4.5.1.5	Tela de inicialização do servidor .....	561
4.5.2	Projeto do Banco de Dados Desenvolvido.....	562
4.5.3	Protocolo de Comunicação Desenvolvido.....	570
4.5.3.1	Função para configurar a geração de sinais.....	573
4.5.3.2	Função para iniciar a geração de sinais.....	574
4.5.3.3	Função desativar a geração de sinais.....	575
4.5.3.4	Função para configurar e iniciar a aquisição de sinais.....	575
4.5.3.5	Função para salvar as aquisições no servidor.....	577
4.5.3.6	Função para transferir os dados salvos no servidor .....	577
4.5.4	Algoritmo de Varreduras Desenvolvido.....	579
4.6	<b>CRIAÇÃO E MONTAGEM DO LABORATÓRIO DE TESTES DE MÉDIA TENSÃO PARA MÁQUINAS ELÉTRICAS .....</b>	<b>581</b>
4.6.1	Projeto da subestação de média tensão .....	582
4.6.2	Visão final do laboratório de média tensão .....	584
<b>5</b>	<b>APLICABILIDADE DO PROJETO.....</b>	<b>586</b>
5.1	ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO .....	586
5.2	TESTES DE FUNCIONALIDADE.....	587
5.2.1	Simulações computacionais .....	587
5.2.2	Testes Controlados em Laboratório de Modelo Reduzido .....	587
5.2.2.1	Validação do Software Desenvolvido.....	587
5.2.2.1.1	Ensaio em Máquina de Indução .....	588
5.2.2.1.1.1	Configurações de teste .....	588
5.2.2.1.1.2	Tela de sinais no tempo .....	589
5.2.2.1.1.3	Tela de aquisições.....	591
5.2.2.1.1.4	Tela de análises estatísticas .....	593
5.2.2.1.2	Ensaio em Máquina Síncrona .....	599
5.2.2.1.2.1	Configurações de teste .....	599
5.2.2.1.2.2	Tela de análises estatísticas .....	600
5.2.2.2	Validação do Protótipo.....	601
5.2.2.2.1	Influência da posição do rotor nas varreduras.....	601
5.2.2.2.2	Influência da temperatura e da umidade nas varreduras.....	617
5.2.2.2.3	Uso de técnicas estatísticas para minimizar subjetividade nas análises... .....	619
5.2.2.2.4	Comparação dos indicadores estatísticos .....	628
5.2.3	Testes no Produto Mínimo Viável .....	653
5.2.3.1	Testes da placa mãe com o FPGA snickerdoodle e placas de interface óptica.....	653
5.2.3.2	Testes da placa mãe com o DSP e placas single-ended e placas de acionamento óptico .....	670
5.2.3.2.1	Teste das placas Single-Ended pela placa mãe.....	670
5.2.3.2.2	Teste das placas de acionamento óptico pela placa mãe.....	672
5.2.3.3	Teste das conexões SPI entre DSP e FPGA pela placa mãe .....	677
5.2.3.3.1	SPI-A (do DSP) recebe comandos do FPGA e envia status de flags ..	678
5.2.3.3.2	SPI-C (do DSP) envia índices de modulação para o FPGA e recebe status de erros.....	682
5.2.3.4	Teste em Média Tensão.....	693

5.2.3.4.1	Estimativa de queda de tensão sobre as indutâncias .....	693
5.2.3.4.2	Preparação para os testes em média tensão .....	695
5.2.3.4.3	Teste do conversor autoalimentado.....	697
5.2.3.4.4	Operação do conversor em média tensão .....	707
5.2.3.4.5	Verificação dos TPs de medição .....	713
5.2.3.4.6	Bloqueio de média tensão.....	718
5.2.3.5	Melhorias Produzidas após os Testes no Produto Mínimo Viável.....	718
5.2.3.5.1	Implementação das melhorias para redução dos pontos de maior aquecimento do hardware .....	718
5.2.3.5.2	Implementação de proteção contra perda de sincronismo.....	720
5.2.3.5.3	Implementação de segunda interface DSP-FPGA para o acionamento remoto dos contatores .....	722
5.2.3.5.3.1	Definição do protocolo de transferência de dados.....	724
5.2.3.5.3.2	Implementação do protocolo de transferência de dados.....	727
5.2.3.5.3.3	Testes do protocolo de transferência de dados.....	740
5.2.4	Testes em Campo.....	743
<b>6</b>	<b>RELEVÂNCIA .....</b>	<b>758</b>
6.1	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS .....	758
6.1.1	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Produtividade .....	758
6.1.2	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Qualidade do Fornecimento .....	760
6.1.3	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Gestão de Ativos.....	761
6.1.4	Contribuições e Impactos Econômicos ligados ao Mercado de Energia .....	761
6.1.5	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Eficiência Energética .....	762
6.2	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS .....	763
6.2.1	Contribuições e Impactos Tecnológicos relacionados à Infraestrutura Laboratorial.....	763
6.2.1.1	Apresentação do Laboratório de Média Tensão criado neste Projeto .....	764
6.2.1.1.1	Transformadores 220/√3: 4160/√3.....	769
6.2.1.1.2	Transformadores de Potencial (TP).....	773
6.2.1.2	Montagem do Laboratório .....	776
6.2.2	Contribuições e Impactos Tecnológicos relacionados à Propriedade Industrial ... ..	780
6.2.2.1	Pedido de Patente 1 .....	780
6.2.2.2	Pedido de Patente 2 .....	789
6.2.3	Contribuições e Impactos Tecnológicos relacionados à Transferência de Conhecimento e à Capacitação Técnica e Tecnológica.....	796
6.3	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS .....	797
6.3.1	Contribuições Científicas relacionadas à Técnica Desenvolvida.....	797
6.3.2	Contribuições Científicas relacionadas à Produção Técnico-Científica.....	809
6.3.3	Contribuições Científicas relacionadas à Titulação em Programas de Pós-Graduação .....	812
6.4	CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS.....	813
6.4.1	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas aos Riscos e Impactos Ambientais .....	814



6.4.2	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas aos Riscos e Impactos Sociais .....	814
6.4.3	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas ao Desenvolvimento de Novas Atividades Socioeconômicas .....	815
6.4.4	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionadas aos Benefícios para a Sociedade .....	816
<b>7</b>	<b>RAZOABILIDADE DOS CUSTOS.....</b>	<b>818</b>
7.1	ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	818
7.2	ANÁLISE PRELIMINAR DE MERCADO .....	821
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>825</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>829</b>
9.1	PEDIDO DE PATENTE BR102020019156-0 (EXTRATO) .....	830
9.2	PEDIDO DE PATENTE BR102020019149-7 (EXTRATO) .....	844
9.3	SLIDES DO SEGUNDO PROCESSO FORMAL DE TRANSFERÊNCIA TECNOLÓGICA.....	856
9.4	ARTIGO – IEEE ACCESS .....	890
9.5	ARTIGO - REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA .....	909
9.6	ARTIGO - 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEM APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS .....	919
9.7	DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PÁGINAS INICIAIS .....	926