



## Relatório Final

Projeto de P&D

# Equipamento Estático de Autorrecuperação

Março 2021



O presente projeto, intitulado “Equipamento Estático de Autorrecuperação”, foi desenvolvido entre as proponentes, EDP-São Paulo (EDP-SP) e EDP-Espírito Santo (EDP-ES), e a executora, Instituto Gnarus (GNARUS), dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico dessa empresa, no ano base de 2019, conforme regras vigentes da ANEEL, tendo duração 39 meses, de julho de 2017 a dezembro de 2019 e de julho de 2020 a março de 2021. O projeto ficou interrompido de janeiro a junho de 2020, devido a pandemia que se instalou no mundo.

Os dados principais do projeto são:

Código interno do projeto: BD-ES-0026-17

Projeto com código ANEEL: PD-0391-0026/2017

Contratos: 5300004070 (EDP SP) e 5300004071 (EDP ES)

Coordenador: Germano Lambert Torres

Gerente: Joselino Santana Filho

Relatorio\_Final\_Serie

Este Relatório Final é composto por dois relatórios, a saber: Relatório Técnico Final e Relatório Financeiro Final.



## Relatório Técnico Final

Projeto de P&D

# Equipamento Estático de Autorrecuperação

Março 2021



## Índice

1	Introdução.....	8
1.1	Identificação das Entidades e Respectivas Equipes Executoras.....	8
1.2	Histórico da Linha de Pesquisa .....	10
2	Apresentação do Projeto .....	11
2.1	Justificativa do Desenvolvimento do Projeto .....	11
2.2	Contextualização da Pesquisa .....	12
2.3	Objetivos do Projeto.....	14
2.4	Resultados Pretendidos.....	15
2.5	Produtos Desenvolvidos .....	16
2.6	Palavras-Chaves.....	18
3	Etapas Desenvolvidas neste Projeto .....	19
3.1	Cronograma de Atividades .....	19
3.2	Descrição Mensal das Etapas .....	22
3.2.1	Etapa 1 - Definição do Elemento de Eletrônica de Potência (IGBT ou GTO).. .....	22
3.2.2	Etapa 2 - Projeto e Simulação do Sistema de Controle de Mitigação de Harmônicos.....	23
3.2.3	Etapa 3 - Projeto e Simulação do Sistema de Controle de Fluxo de Potência .....	25
3.2.4	Etapa 4 - Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência do Protótipo de 500 kVA .....	28
3.2.5	Etapa 5 – Transferência Tecnológica 1 .....	30
3.2.6	Etapa 6 - Montagem das Placas do Sistema de Controle dos Dois Protótipos .....	31
3.2.7	Etapa 7 - Montagem do Sistema de Comando do Protótipo de 500 kVA..	32
3.2.8	Etapa 8 - Testes em Laboratório do Protótipo de 500 kVA.....	33
3.2.9	Etapa 9 - Instalação e Acompanhamento em Campo do Protótipo de 500 kVA .....	35
3.2.10	Etapa 10 - Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência do Protótipo de 1.000 kVA .....	38



3.2.11	Etapa 11 - Montagem do Sistema de Comando do Protótipo de 1.000 kVA .....	39
3.2.12	Etapa 12 - Testes em Laboratório do Protótipo de 1.000 kVA .....	40
3.2.13	Etapa 13 - Transferência Tecnológica 2.....	41
3.2.14	Etapa 14 - Acompanhamento do funcionamento em campo do protótipo de 500 kVA .....	42
3.2.15	Etapa 15 – Produto Viável Mínimo (MVP) do Equipamento de 1.000 kVA .....	47
3.2.16	Etapa 16 - Aprimoramento e Especificação Final do Equipamento para Cabeça-de-Série.....	52
3.2.17	Etapa 17 - Pedido de Proteção Industrial.....	56
3.2.18	Etapa 18 - Preparação da Documentação Final para a ANEEL e Transferência Tecnológica 3.....	58
4	Estudos Iniciais para o Desenvolvimento do Equipamento Estático de Autorrecuperação .....	60
4.1	Estudo da Definição do Semicondutor de Potência do Projeto .....	60
4.1.1	Semicondutores de Potência.....	62
4.1.2	GTO .....	66
4.1.3	IGBT.....	71
4.1.4	Decisão sobre a Escolha do Semicondutor.....	76
4.2	Conversores Multiníveis .....	76
4.2.1	Topologia dos Conversores Multiníveis.....	77
4.2.2	Conversor Multinível com Ponte-H em Cascata.....	80
4.3	Formulação Matemática da Introdução de um Equipamento de Autorrecuperação.....	85
4.3.1	Modelagem em Regime Permanente.....	87
4.3.2	Representação Simplificada da Dinâmica do Sistema e o Modelo DQ .....	97
4.3.3	Representação Dinâmica pelo Método de Impedâncias considerando os Distúrbios das Cargas.....	105
5	Fundamentação Teórica dos Desenvolvimentos Realizados .....	110
5.1	Compensação Dinâmica de Reativo .....	110
5.1.1	Algoritmos de Extração da Componente Reativa Fundamental pela Referência Síncrono.....	111
5.1.2	Algoritmos de Extração da Componente Reativa Fundamental pela	



Referência Síncrona Modificada.....	113
5.2 Controle Preditivo.....	115
5.2.1 Controle Preditivo Baseado em Modelo .....	117
5.2.2 Método da Aproximação Discreta de Euler .....	117
5.2.3 Estados do Conversor Chaveado .....	118
5.2.4 Controle Preditivo Baseado em Modelo com Conjunto de Controle Finito .. .....	120
5.2.5 Compensação do Atraso Devido ao Tempo de Processamento do Algoritmo .....	122
5.2.6 Modelo Discreto do Sistema .....	124
5.2.7 Definição da Função Custo .....	125
6 Contribuições e Originalidade do Projeto .....	127
6.1 Estudo de Anterioridade.....	127
6.2 Contribuições Teóricas ao Estado-da-Arte: Os Algoritmos de Controle .....	133
6.2.1 Algoritmos de Sincronismo, Medições e Transformadas.....	134
6.2.2 Algoritmos de Controle para Mitigação de Harmônicos.....	139
6.3 Originalidade do Equipamento Desenvolvido.....	151
6.3.1 Elementos de Projeto dos Sistemas de Controle .....	151
6.3.2 MPC aplicado ao conversor CHB .....	199
7 Aplicabilidade e Abrangência do Projeto .....	224
7.1 Especificação e Montagem dos Circuitos de Controle .....	225
7.1.1 Controlador Digital de Sinal - TMS320F28335.....	227
7.1.2 Placa de Conexão.....	229
7.1.3 Placa de Driver.....	231
7.1.4 Placa de Comando .....	233
7.1.5 Placas de Condicionamento de Sinais .....	234
7.1.6 Placa de Condicionamento de Sinal CA .....	235
7.1.7 Placa de Condicionamento de Sinal CC .....	237
7.1.8 Placas de Sensores de Efeito Hall .....	238
7.2 Especificação e Montagem do Sistema de Comando dos Protótipos de 500 e 1.000 kVA.....	240
7.2.1 Procedimento de Ligar/Desligar o Equipamento .....	244
7.2.2 Procedimento de Proteção do Equipamento .....	248



7.3	Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência do Protótipo de 500 kVA .....	252
7.3.1	Sistema de Controle .....	254
7.3.2	Inversor de Frequência .....	255
7.3.3	Transformador de Acoplamento .....	258
7.3.4	Transformador para Carga do Link CC.....	259
7.3.5	Transformador de Alimentação do Sistema de Controle.....	260
7.3.6	Sistema NoBreak.....	262
7.3.7	Transformadores de Potencial e de Corrente .....	263
7.3.8	Chave Seccionadora.....	265
7.3.9	Proteção do Equipamento.....	267
7.4	Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência do Protótipo de 1.000 kVA.....	272
7.4.1	Inversor de Frequência .....	273
7.4.2	Transformador de Acoplamento .....	276
7.4.3	Nobreak e Alimentação do Sistema de Controle .....	276
7.4.4	Transformadores de Potência e Transformadores de Corrente .....	278
7.4.5	Chave Seccionadora a Óleo .....	281
7.4.6	Proteção do Equipamento.....	283
7.4.7	Armário Elétrico.....	286
7.5	Montagem do Equipamento de 500 kVA .....	288
7.5.1	Montagem da Eletrônica .....	289
7.5.2	Montagem do Circuito de Potência.....	292
7.5.3	Montagem da Chave Estática .....	294
7.5.4	Equipamento Concluído e Energizado.....	297
7.6	Testes no Sistema de Controle de Fluxo de Potência .....	304
7.6.1	Projeto do Sistema de Controle e Medição .....	305
7.6.2	Testes de Entrega do Equipamento e de seus Acessórios .....	312
7.6.3	Apresentação dos Circuitos Utilizados .....	313
7.6.4	Topologias de Teste.....	315
7.6.5	Modelo MT - Sem Loop Físico .....	319
7.6.6	Modelo MT - Com Loop Físico .....	322
7.6.7	Breve Análise Comparativa das Perdas .....	325



7.7	Testes de Recepção do Equipamento de 500 kVA .....	326
7.7.1	Medições e Oscilografias no Modelo MT no Modo V1=V2.....	326
7.7.2	Desempenho do Sistema de Controle no Modelo MT no Modo V1=V2..	338
7.7.3	Desempenho do Sistema de Controle no Modelo MT no Modo Flutuação .. .....	346
7.7.4	Desempenho do Sistema de Controle no Modelo BT no Modo V1=V2 ...	353
7.7.5	Desempenho do Sistema de Controle no Modelo BT no Modo V1=V2 Limitado a 3A RMS.....	357
7.7.6	Desempenho do Sistema de Controle no Experimento Laboratorial BT .	361
7.8	Montagem em Campo.....	378
7.8.1	Entrega do Equipamento, de seus Acessórios e das Baterias .....	378
7.8.2	Desenhos Esquemáticos de Ligação do Equipamento em Campo.....	380
7.8.3	Estruturação das Atividades e Testes de Campo .....	384
7.8.4	Detalhes da Instalação em Campo .....	388
7.9	Montagem dos Equipamentos de 1.000 kVA .....	394
7.9.1	Detalhes da Montagem .....	394
7.9.2	Desenhos Esquemáticos de Confecção dos Equipamentos de 1.000 kVA	396
7.10	Resultados da Prova de Conceito (POC) e Produto Viável Mínimo (MVP) para o Equipamento de 1.000 kVA .....	404
7.10.1	Teste 1: Fluxo de Potência Ativa.....	408
7.10.2	Teste 2: Fluxo de Potência Reativa.....	414
7.10.3	Teste 3: Fluxo de Potência Ativa e Reativa.....	421
7.11	Aplicabilidade dos Equipamentos Desenvolvidos nas Redes da EDP-SP, da EDP-ES e das demais Concessionárias de Distribuição .....	426
7.11.1	Perda de Alimentação em um Ramal com Carga nele .....	429
7.11.2	Perda de Alimentação em um Ramal com Carga no outro Ramal .....	430
7.11.3	Perda de Alimentação em um Ramal com Carga em ambos os Ramais .... .....	432
7.11.4	Afundamento Severo.....	434
8	Contribuições e Relevância do Projeto .....	437
8.1	Contribuições e Impactos Econômicos.....	437
8.1.1	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Produtividade.....	437
8.1.2	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Qualidade do	





Fornecimento .....	438
8.1.3 Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Gestão de Ativos .....	439
8.1.4 Contribuições e Impactos Econômicos ligados ao Mercado de Energia ..	440
8.1.5 Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Eficiência Energética ...	441
8.2 Contribuições e Impactos Tecnológicos .....	442
8.2.1 Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados à Infraestrutura Laboratorial .....	442
8.2.2 Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados à Propriedade Industrial	480
8.2.3 Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados ao Registro de Programa Computacional.....	488
8.2.4 Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados à Transferência de Conhecimento e à Capacitação Técnica e Tecnológica .....	491
8.3 Contribuições Científicas .....	493
8.3.1 Contribuições Científicas relacionadas à Produção Técnico-Científica....	493
8.3.2 Contribuições Científicas relacionadas à Titulação em Programas de Pós-Graduação.....	495
8.4 Contribuições e Impactos Socioambientais.....	499
8.4.1 Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Riscos e Impactos Ambientais .....	499
8.4.2 Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Riscos e Impactos Sociais .....	500
8.4.3 Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados ao Desenvolvimento de Novas Atividades Socioeconômicas .....	500
8.4.4 Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Benefícios para a Sociedade .....	501
9 Documentos Complementares .....	503
9.1 Desenhos Esquemáticos para Ligação em Campo do Equipamento Estático de Autorrecuperação.....	503
9.2 Patente 1: Sistema de Pré-Carga para Capacitores de Conversores Eletrônicos de Potência .....	527
9.3 Patente 2: Sistema de Comando e Intertravamento Modular Monofásico para Conversor Estático Trifásico .....	540
9.4 Patente 3: Método e Sistema de Proteção de Conversor Série de Média Tensão através de Chave Estática Bidirecional Baseada em Tiristor SCR .....	556
9.5 Programa Computacional Registrado 1: EquipoSerie – Algoritmos das	



Proteções do Sistema .....	571
9.6 Programa Computacional Registrado 2: EquipoSerie – Algoritmos de Interrupções .....	580
9.7 Programa Computacional Registrado 3: EquipoSerie – Algoritmos de Referências Síncronas e Filtros Passa-Baixas .....	589
9.8 Slides do Processo de Transferência Tecnológica do Ano 2.....	598
9.9 Slides do Processo de Transferência Tecnológica Final.....	639
9.10 Artigo na Revista IEEE Transactions on Industrial Electronics.....	690
9.11 Artigos em Publicados em Conferências .....	701
9.12 Dissertação de Mestrado (Páginas Iniciais) .....	707
9.13 Exame de Qualificação de Doutorado (Páginas Iniciais) .....	723
9.14 Pós-Doutorado (Documentos Comprobatórios) .....	729



## Relatório Financeiro Final

Projeto de P&D

# Equipamento Estático de Autorrecuperação

Março 2021



## Índice

1	Identificação das Entidades e Respectivas Equipes Executoras .....	2
2	Recursos Empregados e Justificativas .....	4
2.1	Relação dos Valores das Rubricas das Executoras .....	4
2.2	Carga Horária dos Pesquisadores do Projeto da Executora .....	5
2.3	Despesas da Rubrica Recursos Humanos .....	8
2.4	Despesas da Rubrica Material de Consumo .....	11
2.5	Despesas da Rubrica Viagens e Diárias .....	12
2.6	Despesas da Rubrica Outros .....	13
2.7	Razoabilidade dos Custos e Estudo de Viabilidade Econômica.....	16
3	Comprovação das Rubricas.....	18
3.1	Notas Fiscais da Rubrica Recursos Humanos pagas pela EDP-SP.....	18
3.2	Notas Fiscais da Rubrica Recursos Humanos pagas pela EDP-ES.....	53
3.3	Notas de Débito da Rubrica Material de Consumo .....	88
3.4	Notas de Débito da Rubrica Viagens e Diárias .....	378
3.5	Notas de Débito da Rubrica Outros.....	459
3.6	Notas Fiscais Rubrica Outros pagas pela EDP-SP .....	464
3.7	Notas Fiscais Rubrica Outros pagas pela EDP-ES.....	497