



## Relatório Final

Projeto de P&D

# **Cabeça-de-Série do Projeto Aprimoramento e Aplicação de Filtro Ativo de Potência**

Março 2021



O presente projeto, intitulado “Cabeça-de-Série do Projeto Aprimoramento e Aplicação de Filtro Ativo de Potência”, 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-0027-17

Projeto com código ANEEL: PD-0391-0027/2017

Contratos: 5300004067 (EDP-SP) e 5300004068 (EDP-ES)

Gerente: Denis Mollina

Coordenador: Germano Lambert-Torres

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



## Relatório Técnico Final

Projeto de P&D

# **Cabeça-de-Série do Projeto Aprimoramento e Aplicação de Filtro Ativo de Potência**

Março 2021



## Índice

1	Introdução .....	7
1.1	Identificação das Entidades e Respektivas Equipes Executoras.....	7
1.2	Histórico da Linha de Pesquisa .....	9
2	Apresentação do Projeto .....	10
2.1	Justificativa do Desenvolvimento do Projeto.....	10
2.2	Contextualização da Pesquisa .....	11
2.3	Objetivos do Projeto.....	12
2.4	Resultados Pretendidos.....	13
2.5	Produtos Desenvolvidos .....	14
2.6	Palavras-Chaves .....	14
3	Etapas Desenvolvidas neste Projeto .....	16
3.1	Cronograma de Atividades .....	16
3.2	Descrição Mensal das Etapas .....	19
3.2.1	Etapa 1 - Revisão Teórica do Estado da Arte.....	19
3.2.2	Etapa 2 - Atualização do Sistema de Controle para a Mitigação Harmônica... 20	
3.2.3	Etapa 3 - Projeto e Simulação do Sistema de Controle para a Formação de Grid e Armazenamento de Energia .....	21
3.2.4	Etapa 4 - Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência dos Primeiros Equipamentos de 100 kVA .....	24
3.2.5	Etapa 5 – Transferência Tecnológica 1 .....	25
3.2.6	Etapa 6 - Montagem das Placas do Sistema de Controle dos Dois Equipamentos.....	25
3.2.7	Etapa 7 - Montagem do Sistema de Comando dos Primeiros Equipamentos de 100 kVA.....	26
3.2.8	Etapa 8 - Testes em Laboratório dos Primeiros Equipamentos de 100 kVA.....	27
3.2.9	Etapa 9 - Instalação e Acompanhamento em Campo dos Primeiros Equipamentos de 100 kVA .....	28
3.2.10	Etapa 10 - Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência dos	



Segundos Equipamentos de 500 kVA.....	30
3.2.11 Etapa 11 - Montagem do Sistema de Comando dos Segundos Equipamentos de 500 kVA.....	31
3.2.12 Etapa 12 - Testes em Laboratório dos Segundos Equipamentos de 500 kVA..	32
3.2.13 Etapa 13 - Transferência Tecnológica 2.....	32
3.2.14 Etapa 14 - Acompanhamento do funcionamento em campo dos equipamentos de 100 kVA .....	33
3.2.15 Etapa 15 – Produto Viável Mínimo (MVP) dos Equipamentos de 500 kVA .	37
3.2.16 Etapa 16 - Aprimoramento e Especificação Final do Equipamento para Lote Pioneiro .....	41
3.2.17 Etapa 17 - Pedido de Proteção Industrial .....	45
3.2.18 Etapa 18 - Preparação da Documentação Final para a ANEEL e Transferência Tecnológica 3 .....	47
<b>4 Estudos Iniciais para a Aplicação de Conversores Multiníveis.....</b>	<b>48</b>
4.1 Estratégia dos Conversores Multiníveis .....	48
4.1.1 Topologias mais Utilizadas .....	49
4.1.2 Métodos de Modulação PWM com Portadora Triangular.....	55
4.1.3 Modulação PWM no TMS320F28335.....	63
4.2 Testes com Inversor Multiníveis Energizado.....	83
4.2.1 Testes dos Drivers SKHI22A.....	86
4.2.2 Testes com Carga Resistiva.....	89
4.2.3 Testes com Injeção de Conteúdo Harmônico .....	96
4.3 Testes com Inversor da Supplier .....	116
<b>5 Fundamentação Teórica dos Desenvolvimentos Realizados .....</b>	<b>124</b>
5.1 Modelagem Matemática e Estimação da Impedância Característica .....	124
5.1.1 Interpretação Física .....	125
5.1.2 Representação como Equação às-Diferenças .....	127
5.1.3 Estimador de Parâmetros ARIMAX.....	130
5.2 Técnicas de Detecção de Harmônicos .....	132
5.2.1 Técnicas Convencionais .....	133



5.2.2	Técnicas Adaptativas .....	139
5.3	Resultados das Simulações Realizadas nesta Parte do Projeto .....	157
5.3.1	Topologias mais Utilizadas .....	158
5.3.2	Comparação entre Ganhos Adaptativos .....	163
5.4	Conclusões dos estudos da Fundamentação Teórica .....	170
6	Contribuições e Originalidade do Projeto .....	172
6.1	Estudo de Anterioridade .....	172
6.2	Contribuições Teóricas ao Estado-da-Arte: Os Algoritmos de Controle .....	172
6.2.1	Controle da Corrente Ativa Injetada ou Absorvida do Sistema .....	173
6.2.2	Controle dos Bancos de Baterias.....	177
6.3	Originalidade do Produto Desenvolvido: Sistemas de Controle para a Formação de Grid e Armazenamento de Energia .....	183
6.3.1	Elementos de Projeto dos Sistemas de Controle .....	184
6.3.2	Sistema de Controle de Carga dos Bancos de Baterias .....	227
6.3.3	Sistema de Controle de Formação e Suporte de Grid .....	262
7	Aplicabilidade e Abrangência do Projeto .....	290
7.1	Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência dos Equipamentos de 100 kVA .....	290
7.1.1	Especificação do Conversor .....	294
7.1.2	Transformador de Acoplamento .....	301
7.1.3	Filtro de Saída .....	301
7.1.4	Chaves de Manobra .....	307
7.1.5	Instrumentação .....	311
7.2	Desenvolvimento das Placas do Sistema de Controle dos Equipamentos de 100 kVA .....	319
7.2.1	O Processador Digital de Sinais .....	320
7.2.2	Placa de Conexão.....	323
7.2.3	O Circuito de Condicionamento de Sinais .....	325
7.3	Sistema de Comando dos Equipamentos de 100 kVA.....	337
7.3.1	Placa de Comando .....	337



7.3.2	Lógica de Inicialização do Equipamento.....	344
7.4	Especificação e Montagem dos Circuitos de Potência dos Equipamentos de 500 kVA .....	347
7.4.1	Banco de Baterias .....	350
7.4.2	Especificação do Conversor .....	353
7.4.3	Transformador de Acoplamento .....	358
7.4.4	Filtro de Saída .....	359
7.4.5	Chaves de Manobra .....	360
7.4.6	Instrumentação .....	365
7.5	Sistema de Comando dos Equipamentos de 500 kVA.....	373
7.5.1	Placa de Comando .....	374
7.5.2	Lógica de Inicialização do Equipamento.....	379
7.6	Testes de Funcionalidade .....	383
7.6.1	Montagem dos Equipamentos de 100 kVA.....	383
7.6.2	Banco de Baterias .....	409
7.6.3	Resultado de Testes Laboratoriais .....	419
7.6.4	Ensaio de Comissionamento dos Equipamentos de 100 kVA.....	436
7.6.5	Montagem em Campo.....	439
7.6.6	Montagem dos Equipamentos de 500 kVA.....	455
7.6.7	Resultados da Prova de Conceito (POC) e Produto Viável Mínimo (MVP) para o Equipamento de 500 kVA .....	466
7.7	Aplicabilidade dos Equipamentos Desenvolvidos nas Redes da EDP-SP, da EDP-ES e das demais Concessionárias de Distribuição.....	475
7.7.1	Resultados Experimentais da Funcionalidade RAPF (Resistive Active Power Filter) .....	476
7.7.2	Corte de Pico de Demanda por Horário .....	486
8	Contribuições e Relevância do Projeto .....	495
8.1	Contribuições e Impactos Econômicos.....	495
8.1.1	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Produtividade.....	495
8.1.2	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Qualidade do Fornecimento ... ..	496



8.1.3	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Gestão de Ativos .....	496
8.1.4	Contribuições e Impactos Econômicos ligados ao Mercado de Energia.....	497
8.1.5	Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Eficiência Energética .....	497
8.2	Contribuições e Impactos Tecnológicos .....	498
8.2.1	Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados à Infraestrutura Laboratorial.... .....	498
8.2.2	Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados à Propriedade Industrial.....	518
8.2.3	Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados ao Registro de Programa Computacional.....	522
8.2.4	Contribuições e Impactos Tecnológicos ligados à Transferência de Conhecimento e à Capacitação Técnica e Tecnológica .....	525
8.3	Contribuições Científicas .....	527
8.3.1	Contribuições Científicas relacionadas à Produção Técnico-Científica.....	528
8.3.2	Contribuições Científicas relacionadas à Titulação em Programas de Pós- Graduação .....	531
8.4	Contribuições e Impactos Socioambientais .....	533
8.4.1	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Riscos e Impactos Ambientais.....	533
8.4.2	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Riscos e Impactos Sociais .....	533
8.4.3	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados ao Desenvolvimento de Novas Atividades Socioeconômicas .....	534
8.4.4	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Benefícios para a Sociedade.....	535
9	Documentos Complementares .....	537
9.1	Esquemáticos de Montagem do Cabeça-de-Série .....	537
9.2	Patente 1: Sistema de Pré-Driver para Compatibilização entre Sinais de Microcontroladores e Interface Ótica para Drivers .....	587
9.3	Patente 2: Equipamento de Corte de Picos de Demanda com Funcionalidade de Compensação de Distorções Harmônicas de Tensão.....	614
9.4	Programa Computacional Registrado 1: EquipoShunt – Algoritmos de Compensação de Propagação Harmônica.....	632
9.5	Programa Computacional Registrado 2: EquipoShunt – Algoritmos de Formação	





de Rede.....	641
9.6 Programa Computacional Registrado 3: EquipoShunt – Algoritmos de Tomada de Decisão de Injeção de Potência na Rede.....	650
9.7 Slides do Processo de Transferência Tecnológica .....	659
9.8 Artigo na Revista da SOBRAEP.....	670
9.9 Artigo na Revista ENERGIES.....	681
9.10 Artigo na Revista IEEE ACCESS.....	704
9.11 Artigos em Publicados em Conferências .....	722
9.12 Dissertação de Mestrado.....	722
9.13 Documentação do Pós-Doutorado.....	738



## **Relatório Financeiro Final**

Projeto de P&D

# **Cabeça-de-Série do Projeto Aprimoramento e Aplicação de Filtro Ativo de Potência**

Março 2021



## Índice

1	Identificação das Entidades e Respectivas Equipes Executoras.....	2
2	Recursos Empregados e Justificativas .....	5
2.1	Relação dos Valores das Rubricas das Executoras.....	5
2.2	Carga Horária dos Pesquisadores do Projeto da Executora.....	6
2.3	Despesas da Rubrica Recursos Humanos.....	9
2.4	Despesas da Rubrica Material de Consumo .....	12
2.5	Despesas da Rubrica Material Permanente e Equipamentos.....	13
2.6	Despesas da Rubrica Viagens e Diárias .....	14
2.7	Despesas da Rubrica Outros.....	15
2.8	Razoabilidade dos Custos e Estudo de Viabilidade Econômica.....	18
3	Comprovação das Rubricas.....	20
3.1	Notas Fiscais da Rubrica Recursos Humanos pagas pela EDP-SP .....	20
3.2	Notas Fiscais da Rubrica Recursos Humanos pagas pela EDP-ES .....	54
3.3	Notas de Débito da Rubrica Material de Consumo .....	85
3.4	Notas de Débito da Rubrica Material Permanente e Equipamentos.....	239
3.5	Notas de Débito da Rubrica Viagens e Diárias .....	250
3.6	Notas de Débito da Rubrica Outros.....	305
3.7	Notas Fiscais Rubrica Outros pagas pela EDP-SP.....	312
3.8	Notas Fiscais Rubrica Outros pagas pela EDP-ES.....	345