

Projeto de P&D

Nacionalização de Sistema de Medição de Vazão Ultrassônico de Multi-Trajatórias para Monitoramento de Vazão Turbinada em Grandes Adutoras

Relatório Atividades

Descrição:

Relatório Final das Atividades Realizadas no Projeto

Relatório NESA

F01-00 / Revisão 00

Código ANEEL

PD-07427-0219/2019

Projeto de P&D

Nacionalização de Sistema de Medição de Vazão Ultrassônico de Multi-Trajelórias para Monitoramento de Vazão Turbinada em Grandes Adutoras

Relatório de Atividades

Atividades Realizadas no Projeto

Relatório NESA
F01-00 / Revisão 00

Relatório Elaborado por:

Erik Leandro Bonaldi
Coordenador do Projeto
Instituto Gnarus

Renato Guth de Paiva
Gerente do Projeto
Norte Energia

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E RESPECTIVAS EQUIPES EXECUTORAS	1
1.2. HISTÓRICO DA LINHA DE PESQUISA	2
2. APRESENTAÇÃO DO PROJETO	3
2.1. OBJETIVO DO PROJETO	3
2.2. PALAVRAS-CHAVES	3
2.3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO	3
2.4. JUSTIFICATIVA PARA EXECUÇÃO DO PROJETO.....	4
2.5. RESULTADOS PRETENDIDOS E ALCANÇADOS	6
2.6. METODOLOGIA DA PESQUISA	8
3. PROGRAMA DE TRABALHO E RELATÓRIO DE ATIVIDADES.....	9
3.1. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	9
3.2. DESCRIÇÃO MENSAL DAS ETAPAS	10
3.2.1. Etapa 1 - Contexto teórico sobre medidor de vazão ultrassônico	10
3.2.2. Etapa 2 - Definição da topologia de hardware	10
3.2.3. Etapa 3 - Desenvolvimento e fabricação de hardware	11
3.2.4. Etapa 4 - Desenvolvimento de firmware.....	13
3.2.5. Etapa 5 – Testes de hardware e firmware	14
3.2.6. Etapa 6 – Ajuste de hardware e firmware	15
3.2.7. Etapa 7 – Desenvolvimento de software	16
3.2.8. Etapa 8 – Teste do sistema em laboratório hardware/software.....	18
3.2.9. Etapa 9 – Contexto teórico sobre transdutores ultrassônicos.....	21
3.2.10. Etapa 10 – Desenvolvimento do transdutor ultrassônico.....	22
3.2.11. Etapa 11 – Desenvolvimento da peça de fixação.....	26
3.2.12. Etapa 12 – Testes em laboratório do transdutor ultrassônico.....	29
3.2.13. Etapa 13 – Testes em laboratório da peça de fixação	32
3.2.14. Etapa 14 – Ajustes do transdutor e peça de fixação	35
3.2.15. Etapa 15 – Validação do transdutor e peça de fixação.....	38
3.2.16. Etapa 16 – Instalação do sistema na usina	41
3.2.17. Etapa 17 – Teste na usina.....	47
3.2.18. Etapa 18 – Ajustes finais e customizações do sistema.....	50
3.2.19. Etapa 19 – Validação do sistema.....	55
3.2.20. Etapa 20 – Preparação da documentação/manual	60
3.2.21. Etapa 21 – Relatório final.....	61
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO PROJETO.....	62

4.1.	FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA	62
4.1.1.	Tipos de ondas mecânicas	62
4.1.2.	Ondas periódicas	64
4.1.3.	Descrição Matemática das Ondas	65
4.1.4.	Sinal ultrassônico	66
4.2.	MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS.....	68
4.2.1.	Efeito Piezoelétrico	69
4.2.2.	Propriedades dos materiais piezoelétricos.....	70
4.2.3.	Modos de vibração	79
4.2.4.	Tipos de materiais	82
4.3.	TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS	86
4.3.1.	Componentes estruturais do transdutor	86
4.3.2.	Tipos de Transdutores Ultrassônicos	87
4.3.3.	Características de um transdutor ultrassônico.....	89
4.3.4.	Modelo elétrico e circuito equivalente	95
4.4.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DESTA SEÇÃO	98
5.	CONTEXTO TEÓRICO SOBRE MEDIDOR DE VAZÃO ULTRASSÔNICO	101
5.1.	CONCEITOS INICIAIS	101
5.1.1.	Vazão.....	102
5.1.2.	Tipos de conduto	102
5.1.3.	Classificação dos movimentos ou escoamentos	103
5.1.4.	Viscosidade de fluidos	103
5.1.5.	Perfis de velocidade	104
5.1.6.	Escoamentos dos fluidos	106
5.1.7.	Potencial hidráulico.....	106
5.2.	MEDIDORES DE VAZÃO	107
5.2.1.	Método Winter-Kennedy.....	108
5.2.2.	Método de Pitot	109
5.2.3.	Medidor Eletromagnético.....	109
5.2.4.	Método do Molinete	110
5.2.5.	Método de Gibson	111
5.2.6.	Medidor de Vazão Ultrassônico	112
5.3.	MEDIDORES DE VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO	113
5.3.1.	Tipos de medidores de vazão por tempo de trânsito	114
5.3.2.	Medidor de vazão de uma trajetória acústica	115
5.3.3.	Medidor de vazão de múltiplas trajetórias	116
5.3.4.	Medição de vazão por tempo de trânsito.....	117
5.3.5.	Cálculo da velocidade média axial em uma determinada trajetória.....	118
5.3.6.	Cálculo de vazão para uma trajetória acústica	119
5.3.7.	Cálculo de vazão para múltiplas trajetórias acústicas	120

5.4.	INSTALAÇÃO EM CONDUTOS FORÇADOS	125
5.4.1.	Não intrusivo ou externo	125
5.4.2.	Intrusivo com uma trajetória acústica	126
5.4.3.	Intrusivo de múltiplas trajetórias acústicas	126
5.4.4.	Instalação dos transdutores ultrassônicos nos condutos forçados	129
5.4.5.	Componentes estruturais do transfixador	130
5.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DESTA SEÇÃO	133
6.	DEFINIÇÃO E FABRICAÇÃO DO HARDWARE	136
6.1.	TEMPO DE TRÂNSITO E ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE VOO.....	136
6.2.	DEFINIÇÃO DA TOPOLOGIA DO HARDWARE	137
6.2.1.	Alimentação	137
6.2.2.	Pulsador	137
6.2.3.	Proteção de saídas digitais.....	138
6.2.4.	Circuito de seleção de Transmissão/Recepção.....	139
6.2.5.	Receptor	139
6.2.6.	Controle de Ganho Automático.....	140
6.2.7.	Filtragem	141
6.3.	ESPECIFICAÇÕES DA TOPOLOGIA DO HARDWARE.....	141
6.3.1.	Alimentação	141
6.3.2.	Pulsador	141
6.3.3.	Circuito de seleção de Transmissão/Recepção.....	142
6.3.4.	Receptor	143
6.3.5.	Conversor analógico-digital	143
6.3.6.	Controlador de periféricos.....	143
6.4.	FLUXO DOS SINAIS PELO HARDWARE.....	144
6.5.	DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE	146
6.5.1.	Desenvolvimento do pulsador	147
6.5.2.	Desenvolvimento do multiplexador	149
6.5.3.	Desenvolvimento do sistema de recepção de sinais.....	150
6.5.4.	Conversor Analógico-Digital (ADC).....	153
6.5.5.	Controle de periféricos	154
6.5.6.	Desenvolvimento de proteções digitais e analógicas	155
6.5.7.	Entradas e saídas de dados	155
6.6.	HARDWARE DESENVOLVIDO	155
6.6.1.	Configuração do hardware desenvolvido	155
6.6.2.	Placa de circuito impresso	156
6.6.3.	Placa de circuito impresso (PCI) com os componentes soldados	158
6.6.4.	Conexão hardware de controle e PCI desenvolvida.....	159
6.7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTA SEÇÃO	160

7.	DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE	161
7.1.	HARDWARE DE CONTROLE DA PLACA.....	161
7.1.1.	Sistema SoC (System on-a-Chip).....	162
7.1.2.	ZYNQ.....	162
7.1.3.	Z-Turn Board.....	163
7.2.	SISTEMA DO FIRMWARE DESENVOLVIDO	164
7.2.1.	Descrição do bloco de controle do Multiplexador	166
7.2.2.	Descrição do bloco de controle do Pulsador	167
7.2.3.	Descrição do bloco Clock Divider	170
7.2.4.	Descrição do bloco de controle <i>Pulser-Mux</i>	170
7.2.5.	PLL (Phase-locked loop).....	173
7.2.6.	Sistema de controle ARM/FPGA.....	173
7.2.7.	Comunicação PS/PL.....	174
7.3.	SIMULAÇÕES DOS BLOCOS DE CONTROLE	175
7.3.1.	Simulação bloco de controle do Mux.....	175
7.3.2.	Simulação do bloco controle do Pulser	176
7.3.3.	Simulação do bloco controle do Pulser/MUX.....	177
7.4.	TESTES EM LABORATÓRIO.....	178
7.4.1.	Teste de controle bloco Mux	179
7.4.2.	Teste de controle bloco Pulser	180
7.4.3.	Teste de controle Pulser/MUX.....	182
7.5.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTA SEÇÃO	183
8.	TESTES E AJUSTES DE HARDWARE E FIRMWARE	184
8.1.	SETUP DE TESTE	184
8.2.	RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS	185
8.2.1.	Teste primário da PCI desenvolvida	185
8.2.2.	Teste de alimentação com fontes de tensão ligadas a PCI desenvolvida	186
8.2.3.	Teste de hardware e firmware para geração de sinais de excitação de transdutores em baixa tensão	187
8.2.4.	Teste de hardware e firmware para geração de sinais de excitação de transdutores de alta tensão	188
8.2.5.	Teste de multiplexação de canais	189
8.3.	AJUSTE DE FIRMWARE.....	191
8.3.1.	Descrição dos blocos	192
8.3.2.	Ambiente de carregamento do <i>firmware</i>	203
8.3.3.	Programa de Controle desenvolvido em C.....	203
8.4.	AJUSTE DE <i>HARDWARE</i>	204
8.4.1.	Descrição de ajuste de <i>hardware</i>	204
8.4.2.	Placas de Circuito Impresso desenvolvidas nesta etapa.....	208
8.4.3.	PCIs do sistema desenvolvido.....	210

8.5.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTA SEÇÃO	211
9.	DESENVOLVIMENTO DO TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO	212
9.1.	CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS.....	213
9.1.1.	Dimensões do piezoelétrico	215
9.1.2.	Considerações dimensionais das cerâmicas para o projeto	215
9.1.3.	Fabricantes de cerâmicas piezoelétricas.....	216
9.2.	CONECTORES ELÉTRICOS PARA OS TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS.....	220
9.3.	DESENVOLVIMENTO DA FACE (CAMADA DE AJUSTE) DO TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO ..	221
9.3.1.	Resumo dos polímeros	221
9.3.2.	Dimensão da camada de ajuste.....	222
9.4.	DESENVOLVIMENTO DAS CABEÇAS E CORPO DOS TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS.....	223
9.4.1.	Material do transdutor: Aço Inoxidável (SS)	223
9.4.2.	Projeto do corpo dos transdutores	224
9.4.3.	Projeto das cabeças dos transdutores	225
9.4.4.	Projeto para acomodação da cerâmica piezoelétrica na cabeça do transdutor	225
9.5.	PROJETO DOS TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS	226
9.6.	SIMULAÇÕES DE PRESSÕES EXERCIDAS NO TRANSDUTOR	228
9.6.1.	Simulações do transdutor OUTER.....	229
9.6.2.	Simulações do transdutor INNER	232
9.6.3.	Análise dos resultados	235
9.7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTA SEÇÃO	236
10.	DESENVOLVIMENTO DA PEÇA DE FIXAÇÃO.....	237
10.1.	DESENVOLVIMENTO DO TRANSFIXADOR.....	238
10.1.1.	Projeto do Corpo do Transfixador.....	239
10.1.2.	Desenvolvimento das demais peças do transfixador.....	239
10.1.3.	Materiais Utilizados	242
10.2.	SIMULAÇÃO CFD DO CONJUNTO TRANSDUTOR E TRANSFIXADOR	243
10.2.1.	Simulação isolada.....	244
10.2.2.	Simulação de modelo reduzido	254
10.2.3.	Modelos utilizados	256
10.2.4.	Mesh	257
10.2.5.	Parâmetros da simulação	259
10.2.6.	Resultados	259
10.3.	SIMULAÇÕES ESTÁTICAS DO TRANSFIXADOR E DO PINO DE SEGURANÇA	260
10.3.1.	Simulação do pino de segurança	260
10.3.2.	Simulação do corpo do transfixador.....	261
10.4.	ESTUDO DE DILATAÇÃO TÉRMICA	263
10.5.	PEÇAS USINADAS	264
10.5.1.	Corpo do transfixador.....	264

10.5.2.	Porca.....	266
10.5.3.	Dispositivo de segurança.....	267
10.5.4.	Pino de segurança.....	268
10.5.5.	Tampa.....	270
10.5.6.	Montagem e vista explodida	271
10.6.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTA SEÇÃO	273
11.	DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES DO SISTEMA	274
11.1.	DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE DE CONTROLE	274
11.1.1.	Sistema de Aquisição de Dados	274
11.1.2.	Subsistema de Aquisição de Amostras.....	288
11.1.3.	Subsistema de Contagem	290
11.1.4.	Subsistema de Processador.....	293
11.1.5.	Subsistema de Status	293
11.1.6.	Ambiente de carregamento do firmware	294
11.1.7.	Programa de Controle desenvolvido em C.....	294
11.1.8.	Software de Controle do Sistema de Aquisição de Dados	295
11.1.9.	Projeto FrontEnd do Software.....	298
11.1.10.	Processamentos de Sinais e Dados.....	300
11.1.11.	Descrição do algoritmo de cálculo de velocidade média axial	303
11.1.12.	Descrição do algoritmo de cálculo de vazão	304
11.1.13.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DESTA SEÇÃO	305
11.2.	DESCRIÇÃO DO SOFTWARE PARA DESKTOP.....	306
11.2.1.	Descrição da tela geral do sistema	306
11.2.2.	Descrição da tela de Configurações	309
11.2.3.	Descrição da tela Diagnósticos de Sinais.....	309
11.2.4.	Descrição da tela Diagnósticos de Cálculos.....	310
11.2.5.	Descrição da tela Tendências	311
12.	CONTRIBUIÇÕES E ORIGINALIDADE DO PROJETO	315
12.1.	PESQUISA DE ANTERIORIDADE	315
12.2.	PRODUTOS IMPORTADOS SUBSTITUÍDOS	317
12.2.1.	Accusonic	318
12.2.2.	Cameron	319
12.2.3.	Rittmeyer.....	321
12.2.4.	HydroVision	322
12.2.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DESTA SEÇÃO	323
12.3.	DETALHAMENTO DOS APRIMORAMENTOS E NOVAS FUNCIONALIDADES.....	324
12.3.1.	Aprimoramento dos Sensores e Transfixadores.....	325
12.3.2.	Aprimoramento e novas funcionalidades do hardware de controle e aquisição	326
12.3.3.	Novas Funcionalidades de Software	327

13. APLICABILIDADE DO PROJETO	329
13.1. ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO	329
13.2. TESTES DE FUNCIONALIDADE.....	330
13.2.1. Simulações	330
13.2.2. Testes e Ensaios em Laboratório.....	332
13.2.3. Testes de Segurança do Equipamento.....	352
13.2.4. Ajustes no Protótipo Após a Primeira Fase de Testes.....	366
13.2.5. Teste em Laboratório do Modelo Reduzido.....	396
13.2.6. Testes de Campo	407
13.2.7. Ajustes finais de hardware	440
13.2.8. Ajustes e customização de software.....	460
13.2.9. Sistema de Medição de Vazão Nacionalizado – Versão Final.....	485
13.2.10. Validação Final do Sistema Nacionalizado.....	491
13.3. EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS PARA GRANDES CONDUTOS.....	541
13.3.1. Transdutores Ultrassônicos	541
13.3.2. Sistema Pulsador da Eletrônica Desenvolvida.....	543
13.3.3. Sistema de Condicionamento de Sinais	545
13.3.4. Sistema de Aquisição de Sinais.....	545
13.3.5. Comportamento dos Transdutores Ultrassônicos Desenvolvidos com o Aumento da Distância.....	546
13.3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DESTA SEÇÃO.....	549
14. CONTRIBUIÇÕES E RELEVÂNCIA DO PROJETO.....	550
14.1. CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS	550
14.1.1. Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Produtividade	550
14.1.2. Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Qualidade do Fornecimento	551
14.1.3. Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Gestão de Ativos	551
14.1.4. Contribuições e Impactos Econômicos ligados ao Mercado de Energia	552
14.1.5. Contribuições e Impactos Econômicos ligados à Eficiência Energética.....	553
14.2. CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS.....	554
14.2.1. Contribuições e Impactos Econômicos relacionados à Infraestrutura Laboratorial	554
14.2.2. Contribuições e Impactos Econômicos relacionados à Transferência de Conhecimento e à Capacitação Técnica e Tecnológica	555
14.3. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	555
14.3.1. Contribuições Científicas relacionadas à Titulação em Programas de Pós-Graduação.....	556
14.4. CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS.....	557
14.4.1. Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Riscos e Impactos Ambientais.....	557
14.4.2. Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Riscos e Impactos Sociais	557

14.4.3.	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados ao Desenvolvimento de Novas Atividades Socioeconômicas	558
14.4.4.	Contribuições e Impactos Socioambientais relacionados aos Benefícios para a Sociedade.....	559
15.	RECURSOS EMPREGADOS E JUSTIFICATIVAS.....	560
15.1.	RELAÇÃO DOS VALORES DAS RUBRICAS DA EXECUTORA	560
15.2.	CARGA HORÁRIA DOS PESQUISADORES DA EXECUTORA NO PROJETO	560
15.3.	DESPESAS DA RUBRICA DE MATERIAL DE CONSUMO	562
15.4.	DESPESAS DA RUBRICA DE MATERIAL PERMANENTE E EQUIPAMENTOS	564
15.5.	DESPESAS DA RUBRICA DE SERVIÇO DE TERCEIROS.....	564
15.6.	DESPESAS DA RUBRICA DE VIAGENS E DIÁRIAS.....	565
15.7.	DESPESAS DA RUBRICA OUTROS	565
15.8.	RELAÇÃO DAS NOTAS FISCAIS EMITIDAS PELO INSTITUTO GNARUS.....	566
16.	RAZOABILIDADE DOS CUSTOS E ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	568
16.1.	OUTROS POTENCIAIS DE GANHOS ECONÔMICOS COM A APLICAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO.....	569
16.1.1.	Otimização Operacional	569
16.1.2.	Revisão de Garantia Física	571
16.1.3.	Gestão de Ativos	573
17.	CONCLUSÕES	574
18.	ANEXOS	581
18.1.	ANEXO 1 - POLÍMEROS DE ALTO DESEMPENHO.....	581
18.1.1.	PEEK.....	582
18.1.2.	PPS	586
18.1.3.	PI	588
18.1.4.	PEI.....	590
18.1.5.	PVDF.....	591
18.1.6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DESTE ANEXO	593
18.2.	ANEXO 2 – AJUSTE MECÂNICO	595
18.2.1.	Ajuste com folga	595
18.2.2.	Ajuste com interferência	595
18.2.3.	Ajuste incerto	596
18.2.4.	Sistema de tolerância e ajustes ABNT/ISO.....	596
18.2.5.	Sistema furo-base	597
18.2.6.	Sistema eixo-base.....	597
18.2.7.	Principais tipos de ajustes	597
18.2.8.	Cálculo dos ajustes	599
18.2.9.	Ajuste da Camada de PEEK com a cabeça do transdutor	600

18.3.	ANEXO 3: PROJETO DAS CABEÇAS E CORPO DOS TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS	603
18.4.	ANEXO 4: RELATÓRIO DAS SIMULAÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE.....	606
18.4.1.	Simulação da Cabeça OUTER	606
18.4.2.	Simulação da Cabeça OUTER	615
18.4.3.	Simulação Transdutor OUTER	625
18.4.4.	Simulação da Cabeça INNER	635
18.4.5.	Simulação da Cabeça INNER	644
18.4.6.	Simulação de Transdutor INNER	654
18.5.	ANEXO 5: SIMULAÇÕES	664
18.5.1.	Simulação do corpo do transfixador (posição 2).....	664
18.5.2.	Simulação do corpo do transfixador (posição 1).....	671
18.5.3.	Simulação do Pino de segurança	680
18.6.	ANEXO 6: SLIDES PARA TRANSFERÊNCIA TECNOLÓGICA FINAL.....	691
18.7.	ANEXO 7: EXAME DE QUALIFICAÇÃO (PÁGINAS INICIAIS)	804
18.8.	ANEXO 8: RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NO EQUIPAMENTO	817
18.9.	ANEXO 9: MANUAL DO CONJUNTO TRANSFIXADOR E TRANSDUTOR	827
18.10.	ANEXO 10: MANUAL DO HARDWARE DO PRODUTO NACIONALIZADO	861
18.11.	ANEXO 11: MANUAL DO SOFTWARE DO PRODUTO NACIONALIZADO	895
18.12.	ANEXO 12: NOTAS FISCAIS DA RUBRICA MATERIAL DE CONSUMO	915
18.13.	ANEXO 13: NOTAS FISCAIS DA RUBRICA SERVIÇO DE TERCEIROS	987
18.14.	ANEXO 14: NOTAS FISCAIS DA RUBRICA VIAGENS E DIÁRIAS	1019
18.15.	ANEXO 15: NOTAS FISCAIS DA RUBRICA OUTROS	1043
18.16.	ANEXO 16: NOTAS FISCAIS DO INSTITUTO GNARUS	1068