

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Nuclear

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Thalles Oliveira Campagnani

Sistema de aquisição de dados e automação da
calibração de barras de controle para o reator
nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1



Belo Horizonte

2024

Thalles Oliveira Campagnani

Sistema de aquisição de dados e automação da
calibração de barras de controle para o reator
nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Colegiado do Programa de Pós-graduação
em Ciências e Técnica Nucleares como
parte dos requisitos exigidos para a obten-
ção do título de Mestre em Ciências e Téc-
nicas Nucleares.

Eixo: Engenharia Nuclear e da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo
Velasquez Cabrera

Coorientador: Dr. Luiz Cláudio Andrade
Souza



Belo Horizonte

2024

Oliveira Campagnani, Thalles.

Sistema de aquisição de dados e automação da calibração de barras de controle para o reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 [recurso eletrônico] / Thalles Oliveira Campagnani. - 2024. 1 recurso online (153f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Eduardo Velasquez Cabrera.
Coorientador: Luiz Cláudio Andrade Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 121-153.

Bibliografia: f. 119-120.

1. Reator Nuclear - Teses. 2. Reator de Pesquisa - Teses. 3. TRIGA - Teses. 4- IPR-R1 - Teses. 5. Calibração de Barra de Controle - Teses. 6. Sistema de aquisição de dados - Teses. I. Velasquez Cabrera, Carlos Eduardo. II. Andrade Souza, Luiz Cláudio. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Sistema de aquisição de dados e automação da calibração de barras de controle para o reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1

THALLES OLIVEIRA CAMPAGNANI

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós- Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 20 de dezembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS EDUARDO VELASQUEZ CABRERA
Data: 20/12/2024 16:36:52-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera - Orientador
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Dr. Luiz Claudio Andrade Souza - Coorientador
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear -
CDTN/CNEN

Prof. Frederico Antonio Genezini
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN-USP/CNEN

Prof. Carlos Alberto Zeituni
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN-USP/CNEN

Prof. Daniel de Almeida Magalhães Campolina
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CDTN/CNEN

Prof. Francisco José de Oliveira Ferreira
Instituto de Engenharia Nuclear
IEN-CNEN

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2024.

Dedico aos proletários desempregados pela automação no capitalismo.

Agradecimentos

Agradeço as instituições,

CDTN e CNEN, pela oportunidade única de modernizar um reator nuclear;

FINEP, pelo financiamento do novo Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico e do CLP, equipamentos que tornaram este projeto possível;

CAPES, pelo financiamento da minha bolsa de mestrado; e

UFMG, pelo espaço físico cedido e auxílio restaurante dado aos discentes.

Agradeço também,

ao meu amigo, Camarada Lucas Rubio, pela divulgação científica que me ajudou a criar o interesse na área nuclear, ainda na minha época de graduação;

ao meu ex-orientador, Renato Dâmaso, por me estimular a ingressar no mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares na UFMG;

ao meu orientador, Carlos Velaquez, por todo suporte e ensinamento transmitido, até muito além de sua obrigação;

ao meu co-orientador, Luiz Cláudio, pelo suporte e ensinamentos relacionados ao TRIGA;

ao funcionário do CDTN, Renan Cunha, por todo suporte relacionado a intranet do CDTN; e por fim

ao meu amigo, Álan Crístopper, por todo auxílio relacionado a criação de programas de computadores e do LaTeX.

A automação dos meios de produção permitiria ao homem se dedicar ao desenvolvimento de suas capacidades intelectuais e criativas, em vez de ser reduzido a uma engrenagem no processo produtivo.

Karl Marx

Resumo

O reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1, localizado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), desempenha um papel fundamental no ensino, pesquisa e produção de isótopos. A calibração de suas barras de controle, atualmente realizada de forma manual, demanda tempo, esforço humano e apresenta maior suscetibilidade a erros. O presente trabalho propõe modernizar este processo por meio do desenvolvimento de um sistema computacional de aquisição de dados e automação. O sistema proposto utiliza instrumentação moderna para capturar sinais analógicos e digitais da Instrumentação e Controle (I&C) do reator, processando-os com maior precisão e velocidade. Um servidor de aquisição de dados foi desenvolvido para transmitir informações em tempo real a diversos usuários conectados, permitindo a automação de cálculos e geração de relatórios sobre a calibração das barras. Além disso, foi desenvolvida uma equação InHour específica para o reator, otimizando o cálculo de reatividade com base nos dados coletados automaticamente. O novo procedimento de calibração reduz significativamente o tempo necessário para o experimento, minimiza o número de operadores envolvidos e garante resultados consistentes com os métodos tradicionais. Os resultados experimentais demonstraram a eficácia do sistema na obtenção de dados confiáveis e na automação da calibração, apresentando curvas de reatividade e gráficos compatíveis com registros históricos. A metodologia computacional desenvolvida elimina intervenções manuais nos cálculos, aumentando a segurança e a eficiência das operações. Conclui-se que o trabalho atende aos objetivos de reduzir tempo, esforço humano e incertezas associadas ao processo de calibração. O sistema desenvolvido amplia as possibilidades de uso do reator para pesquisa e ensino, alinhando-se às demandas de modernização e segurança nuclear.

Palavras-chave: reator nuclear; reator de pesquisa; TRIGA; IPR-R1; calibração de barra de controle; sistema de aquisição de dados.

Abstract

The TRIGA IPR-R1 research reactor, located at the Nuclear Technology Development Center (CDTN), plays a key role in education, research, and isotope production. The calibration of its control rods, currently performed manually, requires significant time and effort while being prone to human errors. This study aims to modernize the process by developing a computational data acquisition and automation system. The proposed system utilizes modern instrumentation to capture analog and digital signals from the reactor's Instrumentation and Control (I&C) system, processing them with enhanced precision and speed. A data acquisition server was developed to transmit real-time information to multiple users, enabling automated calculations and report generation for rod calibration. Additionally, a reactor-specific InHour equation was developed to optimize reactivity calculations based on automatically collected data. The new calibration procedure significantly reduces the time required for experiments, minimizes the number of operators involved, and ensures consistent results with traditional methods. Experimental results demonstrated the system's effectiveness in acquiring reliable data and automating the calibration process, producing reactivity curves and graphs consistent with historical records. The computational methodology developed eliminates manual intervention in calculations, enhancing the safety and efficiency of operations. The study concludes that its objectives of reducing time, human effort, and uncertainties in the calibration process were achieved. The developed system expands the reactor's potential for research and teaching, aligning with modernization and nuclear safety demands.

Keywords: nuclear reactor; research reactor; TRIGA; IPR-R1; control rod calibration; data acquisition system.

Lista de acrônimos e notações

GNU/Linux	sistema operacional <i>GNU</i> com <i>kernel Linux</i>
GNU	<i>GNU</i> Não é Unix, do inglês, <i>GNU is Not Unix</i>
InHour	Hora Inversa, do inglês, Inverse Hour
AGPL	Licença Pública Geral Affero GNU, do inglês, GNU Affero General Public License
BMS	Bit menos significativo
BSD	Berkeley Software Distribution
C-AD	Conversor analógico para digital
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CLP	Computador Lógico Programável
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
detector G-M	Geiger-Müller
FPGA	Arranjo de Portas Programáveis em Campo, do inglês, Field-Programmable Gate Array
GA	General Atomic
GPL	Licença Pública Geral do GNU, do inglês, GNU General Public License
I&C	Instrumentação e Controle
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear

IPR	Instituto de Pesquisas Radioativas
IPR-R1	“Instituto de Pesquisa Radioativas - Reator 1”
LGPL	Licença Pública Geral Menor GNU, do inglês, GNU Lesser General Public License
nucleônica	eletrônica especializada para a área nuclear
OPC	Comunicação de Plataforma Aberta, do Inglês, Open Platform Communication
SCRAM	Safety Control Rod Axe Man
SCU	Unidade de Condicionamento de Sinais, do inglês, Signal Conditioning Unit
SMAR	Sistema de Monitoramento da Água de Refrigeração
SMFN	Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico
SMRA	Sistema de Monitoramento da Radiação Ambiente
SPU	Unidade de Processamento de Sinais, do inglês, Signal Process Unit
TRIGA	<i>Training, Research, Isotopes</i> , General Atomics
UC-Berkeley	Universidade da Califórnia em Berkeley
UCB	Unidade de Controle de Barras
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
URT	Unidade do Reator TRIGA

Lista de figuras

1	Poço do reator <i>Training, Research, Isotopes, General Atomics</i> (TRIGA) “Instituto de Pesquisa Radioativas - Reator 1” (IPR-R1).	26
2	Vista frontal da mesa de controle.	28
3	Indicadores do Sistema de Monitoramento da Água de Refrigeração (SMAR) e Sistema de Monitoramento da Radiação Ambiente (SMRA) na mesa de controle, e central de alarmes.	29
4	Indicadores do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) na mesa de controle (parte superior) e botoeiras da Unidade de Controle de Barras (UCB) (parte inferior).	29
5	Bastidor de Instrumentação.	30
6	Diagrama em blocos do módulo 9205 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Canal de Partida).	33
7	Diagrama elétrico da placa 9205-03 do módulo 9205 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Canal de Partida).	34
8	Diagrama em blocos do módulo 9212 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Canal Logarítmico).	36

9	Diagrama em blocos do módulo 9203 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Medidor de Reatividade do Canal Logarítmico).	38
10	Diagrama de conexões do módulo 9203 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Medidor de Reatividade do Canal Logarítmico).	38
11	Diagrama em blocos do módulo 9215 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Canal Linear). . .	39
12	Diagrama elétrico da placa 9215-03 do módulo 9215 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Canal Linear).	40
13	Diagrama em blocos do módulo 9214 do Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN) (Canal Potência Percentual).	41
14	Módulo 9219. Diagrama em blocos dos principais módulos do Sistema de Monitoramento da Radiação Ambiente (SMRA).	43
15	Módulo 9226 (Aerossóis). Diagrama em blocos dos principais módulos do Sistema de Monitoramento da Radiação Ambiente (SMRA).	44
16	Diagrama em blocos do módulo 9220 (indicador de posição das barras de controle)	45
17	Diagrama elétrico da placa 9220 (indicador de posição das barras de controle).	46
18	Diagrama de blocos das Unidade de Condicionamento de Sinais, do inglês, Signal Conditioning Unit (SCU)-01R (Sniip-Systematom, 2023).	48
19	Diagrama de blocos das Unidade de Condicionamento de Sinais, do inglês, Signal Conditioning Unit (SCU)-02R (Sniip-Systematom, 2023).	49

20	Diagramas de blocos da Unidade de Processamento de Sinais, do inglês, Signal Process Unit (SPU)-01R (Sniip-Systematom, 2023).	50
21	Diagrama de blocos do módulo <i>PPM-117R</i> (Sniip-Systematom, 2023).	51
22	Esquemático do mostrador digital BIC-71R (Sniip-Systematom, 2023).	51
23	Dispositivo <i>Elemex RMT 79</i> (Sniip-Systematom, 2023).	52
24	Configuração do núcleo em outubro de 2023 (Prado Souza, 2023).	57
25	Curva integral de reatividade da barra de Regulação, resultado da calibração realizada em outubro de 2023 (Prado Souza, 2023).	58
26	Gráfico <i>InHour</i> oficial do “Instituto de Pesquisa Radioativas - Reator 1” (IPR-R1) (Prado Souza, 2023).	60
27	Curva diferencial de reatividade da barra de Regulação, resultado da calibração realizada em outubro de 2023 (Prado Souza, 2023).	60
28	Visão geral das aplicações e instrumentações.	64
29	Diagrama de posicionamento do PLC e seus módulos.	65
30	Diagrama elétrico do Módulo A0.	66
31	Computador Lógico Programável (CLP) instalado na mesa de controle.	67
32	Cabos e conectores.	67
33	Conexão com sinal do potenciômetro da barra.	68
34	Interface gráfica do TrigaGet.	74
35	Comparação da curva <i>InHour</i> do IPR-R1 (reprodução do gráfico oficial) com a equação <i>InHour</i> da IAEA sem ajuste e com ajuste.	82
36	Linearidade entre as variáveis: Posição medida, Posição exibida e Tensão medida.	90

37	Linearidade entre as variáveis: Corrente do Indicador, Tensão de aquisição e Número gerado pelo Conversor analógico para digital (C-AD).	92
38	Leitura e conversão de dados dos Computador Lógico Programável (CLP) sem restrição de taxa de amostragem. . . .	93
39	Demonstração da eficácia da conversão para outras posições da barra de regulação.	94
40	Potência calculada em função do número gerado pelo Conversor analógico para digital (C-AD), e reta ligando os 2 pontos conhecidos de potência em função do número gerado pelo Conversor analógico para digital (C-AD).	95
41	Demonstração da eficácia da conversão do número gerado pelo Conversor analógico para digital (C-AD) a partir da leitura da saída de aquisição logaritmo do canal logaritmo.	96
42	Número gerado pelo Conversor analógico para digital (C-AD) em função do tempo, referente a leitura de tensão do potenciômetro da barra de regulação.	98
43	Número gerado pelo Conversor analógico para digital (C-AD) em função do tempo, referente a leitura de tensão da saída de aquisição logaritmo do canal logaritmo.	99
44	Resultados de leitura de valores da SPU.	100
45	Consumo de processamento do TrigaServer para 4 clientes conectados e uma taxa de envio de 1 ms cada.	103
46	Posição e potência em função do tempo para 1° aquisição.	107
47	Posição e potência em função do tempo para 2° aquisição.	107
48	Posição e potência em função do tempo para 3° aquisição.	108
49	Janelas de tempo e regressão exponencial referentes ao 5° passo de extração de barra.	110
50	Resultado final obtido neste trabalho: Curva integral de reatividade em função da posição da barra.	111
51	Comparação da curva de calibração gerada por este trabalho com a dos anos anteriores.	113

52	Página 1 do relatório de calibração de barra gerado.	139
53	Página 2 do relatório de calibração de barra gerado.	140
54	Página 3 do relatório de calibração de barra gerado.	141
55	Página 4 do relatório de calibração de barra gerado.	142
56	Página 5 do relatório de calibração de barra gerado.	143
57	Página 6 do relatório de calibração de barra gerado.	144
58	Página 7 do relatório de calibração de barra gerado.	145
59	Página 8 do relatório de calibração de barra gerado.	146
60	Página 9 do relatório de calibração de barra gerado.	147
61	Página 10 do relatório de calibração de barra gerado.	148
62	Página 11 do relatório de calibração de barra gerado.	149
63	Página 12 do relatório de calibração de barra gerado.	150
64	Página 13 do relatório de calibração de barra gerado.	151
65	Página 14 do relatório de calibração de barra gerado.	152
66	Página 15 do relatório de calibração de barra gerado.	153

Lista de tabelas

Tabela 1 - Lógica dos relés associados a escala do canal de partida.	35
Tabela 2 - Descrição das variáveis da SPU, e seus endereços.	52
Tabela 3 - Relação das conexões no PLC e nome das variáveis.	70
Tabela 4 - Relação entre variáveis da barra de regulação para várias posições diferentes.	89
Tabela 5 - Relação medida entre várias variáveis do canal do logaritmo.	91
Tabela 6 - Relação entre valor do Conversor analógico para digital (C-AD) e potência calculada.	95
Tabela 7 - Variação da potência convertida, dada a variação de um Bit menos significativo (BMS).	97
Tabela 8 - Dados extraídos das janelas 2 e 5 de cada passo de extração.	110
Tabela 9 - Estatística dos resultados anteriores e do produzido por este trabalho.	112
Tabela 10 - Membros da struct PLC_DATA.	127
Tabela 11 - Membros da struct SPU_DATA.	129
Tabela 12 - Estrutura de dados ALL_DATA.	129
Tabela 13 - Descrição das <i>threads</i> do TrigaServer	132
Tabela 14 - Fluxo de dados entre as variáveis do TrigaServer.	135

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Objetivos	22
1.1.1	Objetivos específicos	22
1.2	Organização do texto	23
2	Fundamentos	25
2.1	Reator IPR-R1	25
2.2	Instrumentação e Controle (I&C) do IPR-R1	31
2.2.1	Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN)	31
2.2.1.1	Canal de Partida	32
2.2.1.2	Canal Logarítmico	35
2.2.1.3	Canal Linear	39
2.2.1.4	Canal Potência Percentual	41
2.2.2	Sistema de Monitoramento da Radiação Ambiente (SMRA)	42
2.2.3	Sistema de Acionamento de Barras	44
2.2.3.1	Indicador de posição das barras de controle	45
2.2.4	Novo Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN)	46
2.3	Sistemas operacionais e licenças de código	53
2.4	Calibração de Barras de Controle	56
3	Metodologia	62
3.1	Sistema de aquisição de dados	62

3.1.1	Computador Lógico Programável	65
3.1.2	Servidor de Aquisição	71
3.1.3	Servidor Espelho	72
3.1.4	Servidor de Armazenamento de Dados	73
3.1.5	Aplicações Clientes	73
3.1.5.1	Descriptografia	75
3.2	Automação da calibração de barras	76
3.2.1	Procedimento proposto para execução do experimento	76
3.2.1.1	Diferenças em relação ao procedimento atual	79
3.2.2	Desenvolvimento de uma equação <i>InHour</i>	80
3.2.3	Processamento de dados	82
3.2.3.1	Separação de Janelas de Tempo	83
3.2.3.2	Cálculo da variação da posição da barra	84
3.2.3.3	Cálculo da variação de reatividade	85
3.2.3.4	Relatórios Parciais e Gráfico Integral	86
4	Resultados	88
4.1	Sistema de aquisição de dados	88
4.1.1	Leitura da instrumentação analógica através do CLP	89
4.1.1.1	Leitura de variáveis do CLP e conversão da posição da barra de regulação	92
4.1.1.2	Leitura de variáveis do CLP e conversão da potência dada pelo canal logaritmo	94
4.1.1.3	Incerteza real da aquisição das variáveis	97
4.1.2	Leitura da instrumentação digital	99
4.1.3	Desempenho do servidor	101
4.1.4	Discussões	104
4.2	Automação da calibração de barras	105
4.2.1	Procedimento realizado	105
4.2.2	Processamento dos dados	108
4.2.3	Comparação quantitativa	112
4.2.4	Comparação qualitativa	113
4.2.5	Discussões	114

5 Conclusão	115
5.1 Limitações e trabalhos futuros	116
Referências	119
A Parâmetros de linha de comando	121
A.1 TrigaServer	121
A.2 TrigaMirror	123
A.3 TrigaCalib	124
B Detalhes de implementação	125
B.1 TrigaServer	125
B.1.1 Registro do tempo da aquisição de dados	125
B.1.2 Biblioteca para comunicação com o PLC	126
B.1.3 Conversão dos valores lidos pelo PLC	127
B.1.4 Biblioteca para comunicação com a SPU	128
B.1.5 Formato dos dados de envio	129
B.1.6 Servidor TCP/IP	131
B.1.7 <i>Threads</i> e gerenciamento de memória	132
B.2 TrigaMirror	135
B.2.1 <i>Threads</i>	135
B.2.2 Criptografia	136
C Relatório de calibração	138

Introdução

Reatores nucleares de fissão têm a variação da potência controlada por uma medida conhecida como reatividade, que está relacionada ao comportamento da população de nêutrons no reator, resultante da reação em cadeia. Quando a reatividade é positiva, a população de nêutrons cresce com o tempo; quando é negativa, a população diminui; e quando é nula, a população de nêutrons permanece constante. Existem diversos métodos para o controle da reatividade em reatores nucleares, sendo o mais comum a inserção e retirada de barras absorvedoras de nêutrons no núcleo do reator. A reatividade é reduzida quando o material absorvedor de nêutrons das barras de controle são inseridas, e é aumentada conforme as barras são extraídas.

É possível calcular uma curva de reatividade com base no grau de inserção das barras de controle no núcleo, ilustrando como a reatividade muda à medida que essas barras são inseridas ou removidas. Essa curva geralmente não é linear e varia de acordo com o fluxo de nêutrons ao qual as barras estão expostas. A curva é calculada através de simulações ou experimentos, e é de suma importância para que os operadores do reator possam manuseá-lo com segurança, além de ter diversas outras aplicações na física de nêutrons do núcleo.

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), anteriormente conhecido Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), como “Instituto de Pesquisa Radioativas - Reator 1” (IPR-R1), conta com um reator chamado

IPR-R1, do tipo *Training, Research, Isotopes, General Atomic*s (TRIGA). O controle de reatividade nesse reator é feito por meio de barras de controle. O setor do CDTN responsável pelo reator conduz os “testes neutrônicos anuais do IPR-R1”, sendo um desses testes a calibração das barras de controle. Durante esses testes, os operadores do reator e os pesquisadores trabalham juntos na operação do reator, na coleta de dados e na execução dos cálculos. No entanto, a operação do reator, assim como a coleta de dados e os cálculos realizados, são feitos manualmente, o que eleva a incerteza associada ao processo de calibração. Isso ocorre porque o reator não tem um sistema de aquisição de dados e também não conta com uma equação *InHour* oficial, somente um gráfico *InHour* oficial, e o procedimento padrão da instalação é regido desta maneira. Além disso, o procedimento padrão exige que o operador retorne o reator para um estado crítico a cada nova etapa de movimentação da barra, o que estende o tempo do procedimento.

O desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados computacional e moderno permite diminuir número de pessoal necessário para realizar os testes neutrônicos e também as incertezas de medição por erro humano, além de expandir as possibilidades de uso do reator para pesquisa e ensino. Associado a isso, o desenvolvimento de uma metodologia e de um procedimento para a calibração das barras que utilize o sistema de aquisição de dados e que possa ser implementado computacionalmente sem intervenção humana poderia reduzir o número de pessoal necessário e diminuir as incertezas. Essa abordagem também abre caminho para a criação de novos métodos de cálculo da reatividade introduzida, que poderiam agilizar o tempo de execução do procedimento.

A proposta deste trabalho de mestrado é desenvolver um servidor de aquisição de dados para o reator IPR-R1, que permita transmitir os dados do reator em tempo real via internet para múltiplos clientes, de acordo com a taxa de amostragem solicitada por cada um, permitindo a automação dos testes neutrônicos e expandindo as possibilidades de uso do reator. É proposto ainda o desenvolvimento de um algoritmo que gere um relatório de calibração de barras automaticamente (sem intervenção humana) a partir

dos dados salvos no computador do cliente, oriundos do servidor de aquisição de dados.

Este trabalho parte da hipótese de que é possível reduzir o tempo necessário para a calibração das barras e o número de pessoas envolvidas no experimento por meio de um sistema computacional de aquisição de dados combinado com um algoritmo que realize automaticamente os cálculos de calibração, a partir dos dados coletados, sem intervenção humana e produzindo resultados equivalentes à metodologia atual.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma metodologia para automatizar os cálculos de calibração das barras de controle do IPR-R1 juntamente com um procedimento experimental mais rápido de ser executado e um sistema de aquisição de dados, a fim de reduzir a quantidade de pessoas necessárias e tempo gasto no processo de calibração como um todo.

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, é necessário:

- Ler os sinais da atual Instrumentação e Controle (I&C) analógica do IPR-R1 através de um dispositivo computacional capaz de realizar a conversão analógico-digital;
- Desenvolver um servidor de aquisição capaz de obter simultaneamente sinais do referido dispositivo e da I&C digital que está em fase implementação, bem como de futuras I&C que venham a ser implementadas. Além disso, este servidor deverá ser capaz de transmitir em tempo real todos os dados lidos para múltiplos clientes simultaneamente e em taxas de amostragem diferentes;
- Desenvolver um procedimento experimental para a calibração de barras que respeite as normas de segurança da instalação, ou seja, o reator não pode ser operado computacionalmente, mas que use o

sistema de aquisição de dados para permitir a automatização dos cálculos;

- Desenvolver uma metodologia de cálculos para a calibração de barras que possa ser implementada computacionalmente, sem intervenção humana, a partir de dados oriundos do sistema de aquisição de dados desenvolvido. Para calcular a reatividade de forma computacional, faz-se necessário desenvolver uma equação *InHour* para o IPR-R1; e
- Implementar a metodologia desenvolvida em um algoritmo computacional que além dos cálculos, gere o relatório de calibração automaticamente. Este relatório deve conter além da curva de calibração, gráficos e tabelas com resultados de cada etapa do procedimento de calibração, permitindo análise da consistência do resultado final.

1.2 Organização do texto

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica do IPR-R1 e do tema de pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia usada para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados computacional e moderno, capaz de realizar a aquisição simultânea de diversos dispositivos de instrumentação do reator e transmitir os dados em tempo real via internet para múltiplos clientes, com taxas de amostragem diferentes. E o capítulo apresenta também a metodologia desenvolvida para os realizar os cálculos da calibração de barras computacionalmente e sem intervenção humana, a partir de dados salvos durante a realização do experimento de calibração. Além de uma proposta de procedimento experimental atrelado a essa metodologia e o desenvolvimento de uma equação *InHour* que possa ser usada nessa metodologia.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos experimentos realizados no sistema de aquisição de dados, as incertezas de medição associadas a cada variável lida, e discussões a respeito. O capítulo apresenta também os resultados da calibração realizada neste trabalho para a “barra de regulação” do

IPR-R1, realiza a comparação estatística com resultados de calibração da referida barra em de anos anteriores, e discussões a respeito.

Ao concluir este trabalho, verifica-se no Capítulo 5 que o objetivo de minimizar as incertezas associadas ao erro humano nas medições essenciais para o processo de calibração, bem como reduzir o tempo necessário para a execução do procedimento, será alcançado por meio do emprego do sistema de aquisição de dados desenvolvido, da implementação do procedimento experimental proposto e do uso do algoritmo computacional criado para realizar os cálculos e gerar o relatório de forma automatizada.

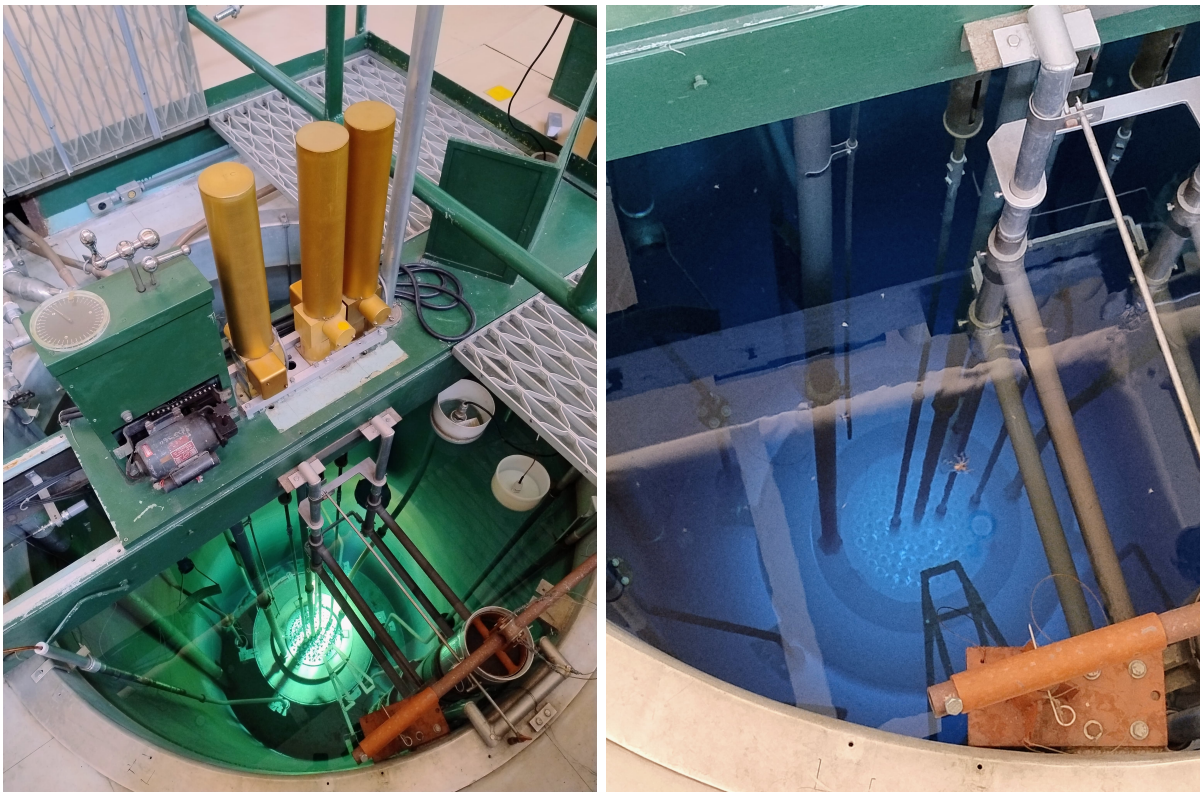
Capítulo 2

Fundamentos

2.1 Reator IPR-R1

Em meados de 1952, nascia junto à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), o IPR. Hoje CDTN, instituto da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), suas principais finalidades incluem estudos científicos e técnicos no campo da física nuclear. Em novembro de 1956, a Escola de Engenharia estabeleceu um convênio com o Governo do Estado de Minas Gerais, que permitiu ao IPR assegurar os recursos necessários para sua manutenção e ampliação. Foi assim que, com o apoio financeiro do Governo do Estado, a Escola de Engenharia adquiriu, em 1958, um reator de pesquisa, do tipo TRIGA MARK I, fabricado pela General Atomic (GA), divisão da General Dynamics Corporation, por um montante de 140 mil dólares, conforme contrato firmado em outubro de 1958. Esse reator recebeu o nome de IPR-R1 e pode ser visto na Figura 1. Concluída sua montagem no início de novembro de 1960, o reator atingiu sua primeira criticalidade no dia seis daquele mês. Como parte da família de reatores TRIGA (em português: Treinamento, Pesquisa, Isótopos, General Atomics), o IPR-R1 serve ao triplo propósito de treinar pessoal na área nuclear, realizar experimentos na área e produzir radioisótopos para pesquisa científica e tecnológica (CDTN/CNEN, 1990).

O reator TRIGA tem um diferencial que o torna intrinsecamente seguro: seu combustível é composto por uma mistura de hidreto de zircônio com



(a) Reator desligado e luzes do poço acesas.

(b) Reator funcionando a 100kW e luzes do poço apagadas.

Figura 1 - Poço do reator TRIGA IPR-R1.

urânio enriquecido, o que proporciona um alto coeficiente negativo de temperatura devido a um fenômeno conhecido como “upscaling”. O hidrogênio é um excelente moderador de nêutrons, e por estar misturado homogeneamente com o combustível, quando os núclídeos de urânio fissionam e elevam a temperatura do meio, a temperatura dos núclídeos de hidrogênio também é elevada. Os nêutrons são moderados até serem termalizados (possuírem uma energia próxima a energia térmica do meio), e como os núclídeos de hidrogênio estão a uma temperatura mais elevada, os nêutrons são termalizados com uma energia maior, que por sua vez diminui a probabilidade de interagir com o urânio e fissioná-lo. Mesmo que um nêutron esteja com uma energia abaixo da energia térmica do meio combustível (por exemplo, um nêutron que estava no meio água e foi para o meio combustível), ao interagir com o núclídeo de hidrogênio do combustível, a tendência é de ter sua energia elevada (“upscaling”).

A proporção de mistura de hidreto de zircônio com urânio no interior

dos elementos combustíveis é de XXX, sendo o urânio enriquecido a aproximadamente 20%. Todos os elementos combustíveis que foram instalados na época da construção do reator continuam no núcleo e são revestidos por alumínio. Posteriormente foram adquiridos e instalados alguns elementos combustíveis revestidos de INOX, mas mantendo no núcleo os elementos originais.

Originalmente, os sistemas auxiliares do reator eram compostos por equipamentos produzidos pela GA. Ao longo do tempo esses sistemas foram atualizados, conforme sumarizado a seguir (Maretti Júnior *et al.*, 1999):

- Configuração Inicial:
 - Sistema de refrigeração inicial: 30 kW;
 - Potência de regime: 30 kW;
 - Potência máxima: 100 kW (por aproximadamente 6 horas).
- Modificação em 1972/73:
 - Novo sistema de refrigeração instalado, capacidade de 300 kW;
 - Potência regime/máxima: 100 kW (limitação da I&C).
- Modificações em 1996/97:
 - Novas instalações prediais
 - Nova I&C para 250 kW;
 - Potência regime/máxima: 250 kW (limitação do revestimento do combustível).

Apesar do sistema de refrigeração ser capaz de dissipar 300 kW e da potência de operação máxima suportada em regime permanente pelos elementos combustíveis revestidos em alumínio ser de 250 kW, por razões administrativas decidiu-se licenciar o reator para 100 kW (CDTN/CNEN, 2022).

Quanto à mesa de controle e toda eletrônica especializada para a área nuclear (nucleônica), os sistemas originais fabricados pela GA que vieram junto com o reator como parte do contrato, foram substituídos por uma nova

mesa (Figura 2) e nucleônica de fabricação nacional pela própria CNEN, no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), nas décadas de 80 e 90. Os sistemas de monitoramento são divididos em um Sistema de Monitoramento de Fluxo Neutrônico (SMFN), Sistema de Monitoramento da Radiação Ambiente (SMRA), e um Sistema de Monitoramento da Água de Refrigeração (SMAR), este último composto por vários módulos adquiridos separadamente de empresas diversas. A mesa contém vários indicadores (Figuras 3a e 3) referentes aos sistemas de monitoramento, os quais serão detalhados nas seções seguintes. O sistema de controle é composto pela Unidade de Controle de Barras (UCB), a qual possui botoeiras na mesa de controle (Figura 4) para comando do operador. O sistema de segurança é composto pelo módulo de intertravamento, que recebe sinais de todos os sistemas e tem um indicador na mesa chamado “Central de Alarmes”(Figura 3b).



Figura 2 - Vista frontal da mesa de controle.

A mesa também possui um circuito indicador de posição das barras, bem como lampadas indicadoras de alguns parâmetros das barras, os quais podem ser vistos na Figura 4. Estes circuitos são separados e não pertencem a UCB.

Parte da nucleônica do SMFN e do SMRA ficam instaladas em um *rack* separado, denominado como bastidor, sendo que a mesa de controle con-

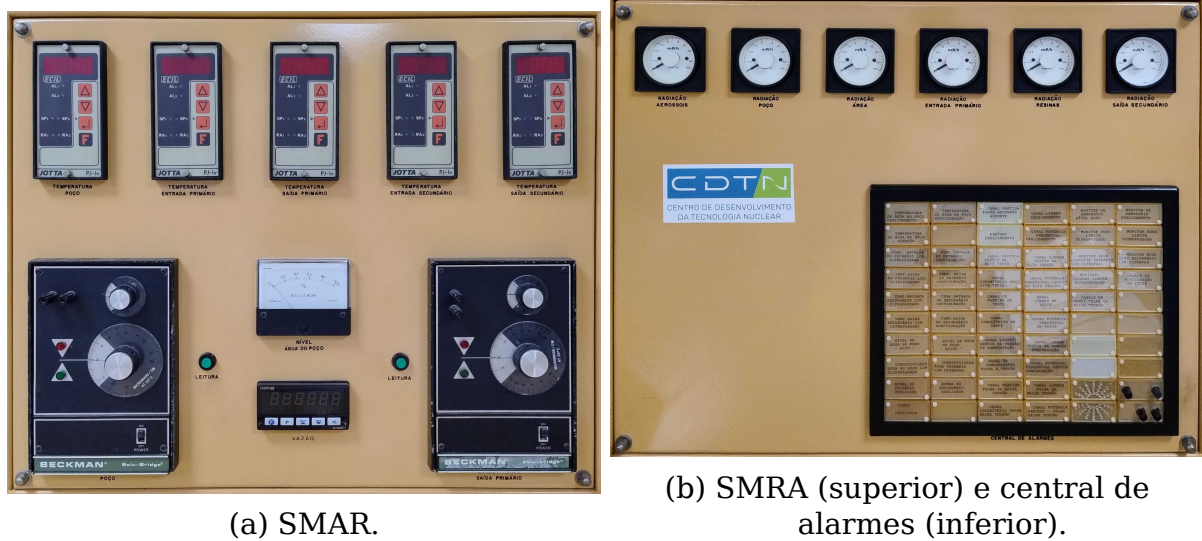


Figura 3 - Indicadores do SMAR e SMRA na mesa de controle, e central de alarmes.



tem apenas mostradores analógicos conectados às saídas do bastidor para replicar o sinal. A nucleônica do sistema de controle de posição das barras se encontra em um módulo separado dentro da mesa de controle. O circuito dos mostradores de posição das barras, localizados na porção central inferior da mesa de controle conforme pode ser visto na Figura 4, são separados do módulo de controle de posição e não fazem parte da cadeia de segurança do reator. Por fim, a nucleônica da central de alarmes e do

sistema de monitoramento da água se encontram embutidas na mesa.

Pensando em atender futuras demandas de expansão, o IEN fabricou o SMRA e o SMFN com saídas de aquisição de dados (analógicas, assim como o restante do sistema). No entanto, os módulos do sistema de monitoramento de água que foram adquiridos na época não vieram com tais funcionalidades. Entretanto, os mesmos estão previstos para serem substituídos por versões mais modernas como a parte do programa de gestão de envelhecimento do reator (CDTN/CNEN, 2023).

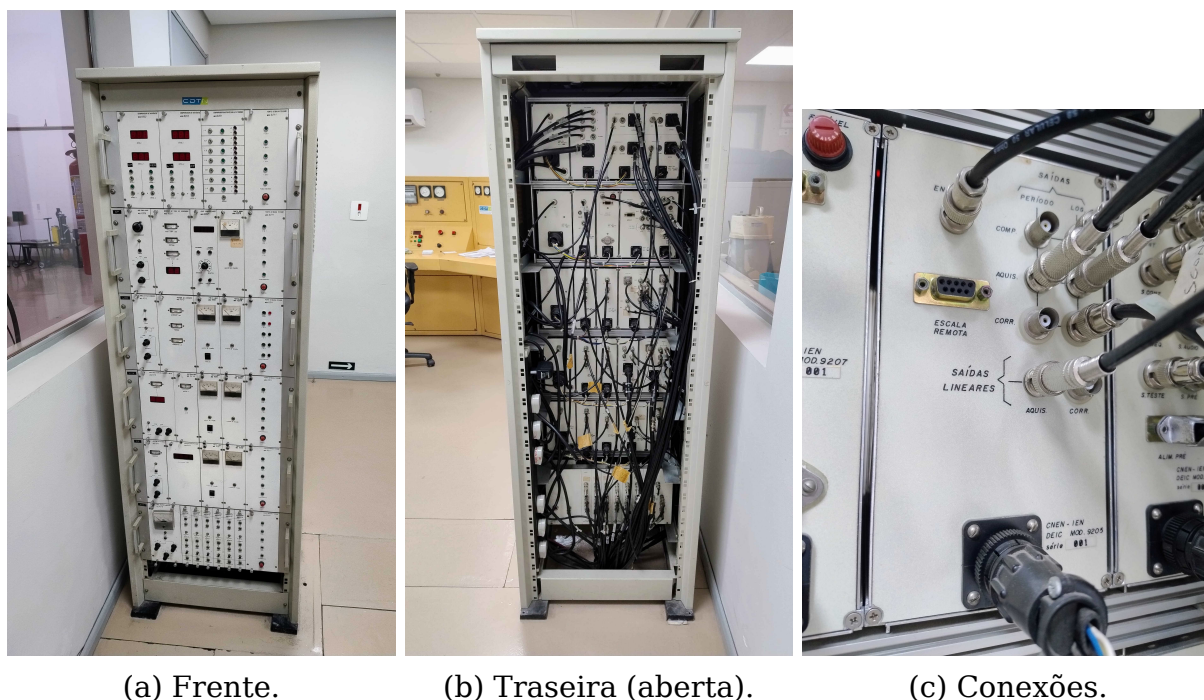


Figura 5 - Bastidor de Instrumentação.

Mais recentemente, em 2023, foi instalado um novo SMFN da corporação russa ROSATOM, fabricado pela empresa Sniip-Systematom, com o diferencial de sua nucleônica ser digital, assim como sua saída de aquisição de dados. Este sistema está instalado em paralelo, fora da mesa de controle e da cadeia de segurança do reator, até que seja autorizada a integração com os outros sistemas do reator.

2.2 I&C do IPR-R1

A atual I&C do reator IPR-R1 é composta pelos sistemas SMFN, SMRA, SMAR, além de um Sistema de Controle Automático (controlador proporcional-integral), que atua sobre uma das barras de controle (barra de regulação), para manter a potência constante mesmo havendo modificações menores de reatividade (ao longo da operação, por temperatura e envenenamento), ou por eventos pontuais como inserção ou retirada de amostras. Além de alimentar os indicadores da mesa, esses sistemas enviam sinais de alerta e de desligamento para a central de alarmes e para uma cadeia de segurança que interliga os sistemas de instrumentação com os sistemas de acionamento das barras (intertravamento), permitindo ou não o funcionamento do reator.

Recentemente foi instalado um SMFN digital, mas o mesmo não foi comissionado, portanto não integra a cadeia de segurança do reator e pode, até então, ser usado somente como instrumento de pesquisa.

As seções seguinte descrevem o funcionamento destes sistemas, os quais serão usados pelo sistema de aquisição de dados e pela calibração das barras de controle.

2.2.1 SMFN

O SMFN é composto por quatro canais neutrônicos:

- Canal de Partida
- Canal Logarítmico
- Canal Linear
- Canal Potência Percentual

Cada canal possui 1 detector de nêutrons independente, 1 ou mais indicadores na mesa de controle, e uma nucleônica própria dividida em módulos. Todos canais possuem saídas analógicas de aquisição de dados projetadas pelo fabricante, por meio de conectores BNC.

Estes aspectos e outros aspectos de cada canal serão explicados com mais detalhes a seguir.

2.2.1.1 Canal de Partida

O detector de nêutrons usado no canal de partida é do tipo câmara de fissão. A nucleônica é responsável por alimentar-lo com uma alta tensão e detectar os pulsos¹ gerados pela interações dos nêutrons com o detector, discriminando de pulsos gerados por outros tipos de radiação e de ruídos. A média em um intervalo de tempo dos pulsos discriminados representa a “taxa de contagens de nêutrons” detectada pelo canal, a qual é linearmente proporcional ao fluxo de nêutrons que o detector está submetido. O canal possui 1 indicador analógico na mesa de controle, o qual exhibe a taxa de contagens em escala logarítmica de base 10, variando de 1 s^{-1} a 10^5 s^{-1} . E ele produz um sinal chamado “Fonte de nêutrons ausente” caso a taxa de contagens esteja abaixo de 2 s^{-1} , o qual impede de as barras de controle seja erguidas, portanto impedindo a partida do reator.

O funcionamento da nucleônica deste canal pode ser melhor entendido através do diagrama de blocos do módulo 9205 do SMFN, que é o módulo principal do canal de partida e pode ser visto na Figura 6. Como pode ser visto, o módulo tem saída para 4 indicadores na mesa de controle, dados pelas 3 saídas nomeadas “Corrente”, referente a taxa de contagem logarítmica, período da taxa de contagem e taxa de contagem linear, e também pela saída nomeada “Saída para indicação escala remota”, referente a um indicador de escala do indicador linear. Apesar das saídas para uma diversidade de indicadores, a mesa de controle do IPR-R1 só tem implementado o indicador logarítmico.

Também pode ser visto na Figura 6 que cada uma das 3 saídas de corrente para os indicadores são acompanhadas de 3 saídas para aquisição de dados, dadas pelas saídas nomeadas “Aquisição”. De acordo com o fabricante, as 3 emitem sinais analógicos de 0 a 10 V, correspondentes a:

¹ A nucleônica do Canal de Partida não tem a capacidade de trabalhar com a câmara de fissão em modo contínuo, apenas em modo pulsado.

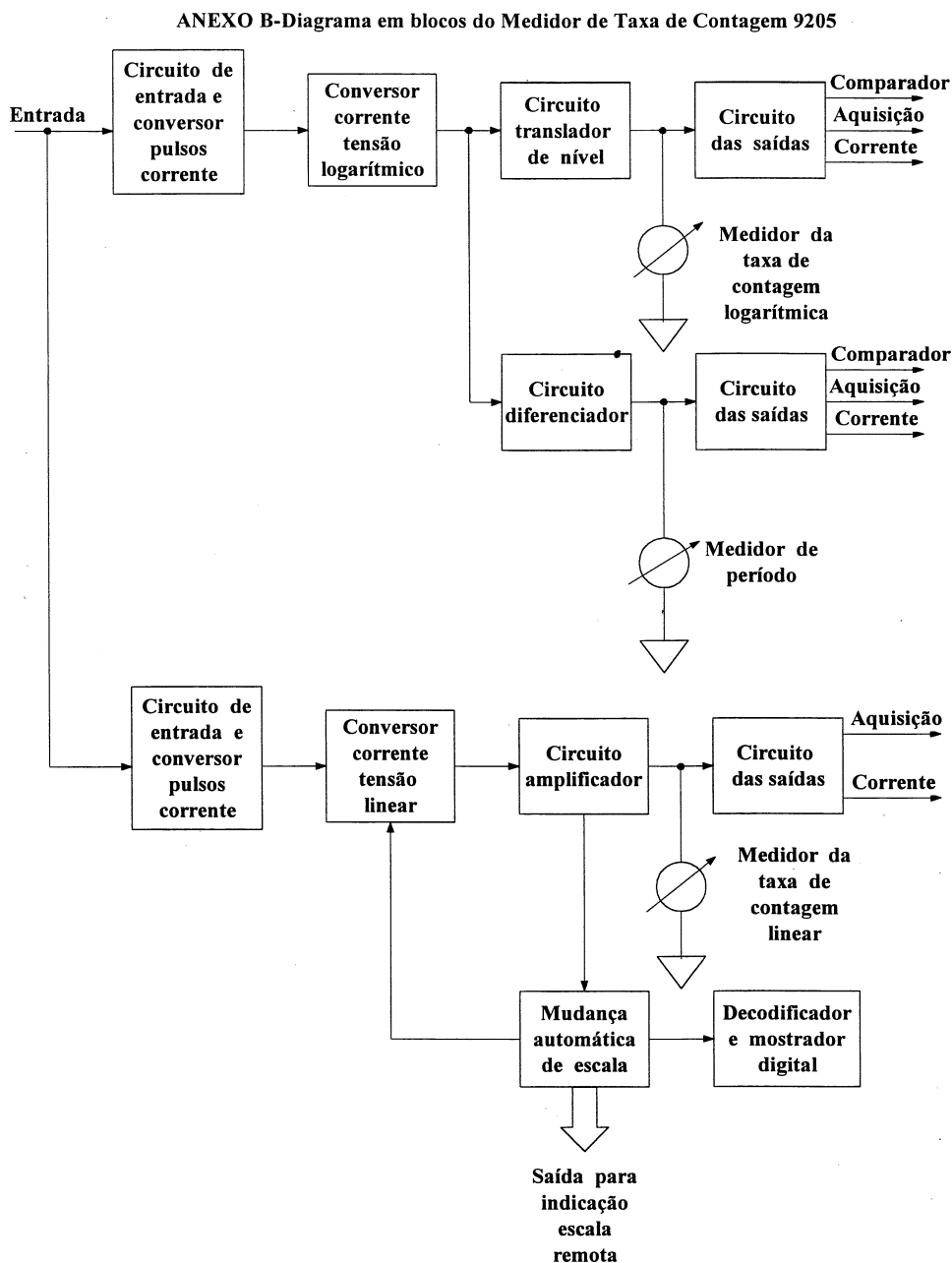


Figura 6 - Diagrama em blocos do módulo 9205 do SMFN (Canal de Partida).

- logaritmicamente de 1 a 10^5 s^{-1} para a saída de aquisição logarítmica;
- escala hiperbólica de zero central de -10 a 10 s , sendo 5 V correspondendo ao período infinito, para a saída de aquisição de período; e
- linearmente de 0 a 100% da escala para a saída de aquisição linear.

A respeito do indicador linear, mostrado na Figura 6, o fabricante não projetou uma saída de aquisição de dados específica para a escala. Entretanto, como o indicador linear não foi implementado na mesa, a saída para

Escala	Relé 4	Relé 3	Relé 2	Relé 1
E1	E	F	A	A
E2	E	A	F	A
E3	E	A	A	A
E4	NE	F	A	A
E5	NE	A	A	F

Tabela 1 - Lógica dos relés associados a escala do canal de partida.

Legenda: E = Energizado; NE = não energizado; F = Fechado;
A = Aberto; E1=10¹ ... E5=10⁵.

2.2.1.2 Canal Logarítmico

O detector de nêutrons do canal logarítmico é do tipo câmara de ionização compensada. Sua nucleônica é responsável por alimentar o detector com uma alta tensão, uma tensão de compensação, e receber o sinal de corrente que é produzido pelo detector, proporcionalmente a interação da radiação com o mesmo. Esse detector é dividido em duas partes, uma parte contendo gás ionizável, e outra parte contendo além do gás, núclídeos de boro-10. Quando o boro-10 absorve um nêutron, gera uma reação nuclear produtora de partícula alfa, assim fazendo uma parte do detector ser ionizável devido a interação com nêutrons. Ajustando a tensão de compensação para um valor negativo adequado, o sinal de corrente oriundo da interação com raios gama nas duas partes do detector se anulam, restando somente no sinal de corrente produzido pela interação com nêutrons, o qual é recebido pela nucleônica do canal. Esse valor de corrente é linearmente proporcional ao fluxo de nêutrons, que por sua vez é proporcional (se em uma posição adequada) à potência térmica do reator.

Esse canal possui 3 indicadores na mesa, todos derivados do sinal de corrente do detector citado: um analógico com o valor de potência do reator de $10 \cdot 10^{-3}$ a $10 \cdot 10^6$ W, seguindo uma escala logarítmica de base 10; outro analógico com o valor do período do reator de -10 a 10 s, seguindo uma escala hiperbólica de zero central com infinito no centro; e um digital de 4 dígitos, que exhibe o valor da reatividade do reator em escala linear variando de -1999 a 1999 PCM (em números inteiros), ou variando de $-199,9$ a $199,9$ PCM (com precisão de uma casa decimal). Em termos de intertravamento,

o canal gera um sinal para desligar o reator caso o período positivo seja inferior a um valor predeterminado (configurado para 10 s).

O funcionamento da nucleônica deste canal pode ser melhor entendido através do diagrama de blocos do módulo 9212 do SMFN, que é o módulo principal do canal logarítmico e pode ser visto na Figura 8. Como pode ser visto, o módulo tem saída para 3 indicadores na mesa de controle, dados pelas 3 saídas nomeadas “S. CORRENTE”, referente a potência logarítmica, período da potência e potência linear. Destes 3 indicadores citados, a mesa de controle do IPR-R1 não tem implementado apenas o indicador linear.

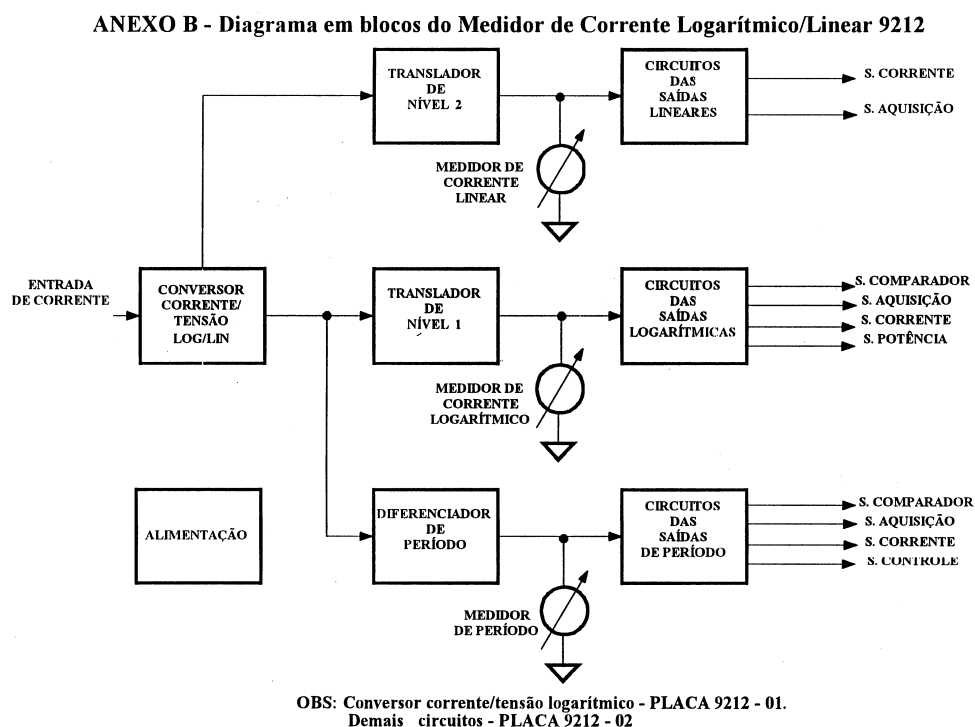


Figura 8 - Diagrama em blocos do módulo 9212 do SMFN (Canal Logarítmico).

Também pode ser visto na Figura 8 que cada uma das 3 saídas de corrente para os indicadores são acompanhadas de 3 saídas para aquisição de dados, dado pelas saídas nomeadas “S. AQUISIÇÃO”. De acordo com o fabricante, elas 3 emitem sinais analógicos de 0 a 10 V, correspondentes a:

- logaritmicamente de 10^{-11} a 10^{-3} A da corrente de entrada para a saída de aquisição logarítmica;
- escala hiperbólica de zero central de -10 a 10 s, sendo 5V correspondendo ao período infinito, para a saída de aquisição de período; e

- linearmente de 0 a 10^{-3} A da corrente de entrada para a saída de aquisição linear.

A correspondência entre corrente do detector e potência do reator depende das características do detector, do fluxo que está submetido na potência de calibração, entre outros.

Este canal conta ainda com outro importante módulo, o “Medidor de Reatividade 9203”, cujo seu diagrama em blocos pode ser visto na Figura 9. Como pode ser visto, a entrada deste módulo é oriunda do canal logarítmico e possui uma saída para indicador remoto, o qual está instalado na mesa de controle. Apesar de no diagrama de blocos não mostrar a saída de aquisição de dados, no diagrama de conexões visto na Figura 10, é possível ver a saída e seu intervalo de tensão. Diferentemente das saídas de aquisição de quase todos os módulos, que trabalham no intervalo de 0 a 10 V, esta trabalha no intervalo de -10 a 10 V. De acordo com o fabricante, esse intervalo corresponde linearmente ao intervalo de reatividade de -1999 a 1999 PCM.

ANEXO B1 - Diagrama em blocos do Medidor de Reatividade 9203

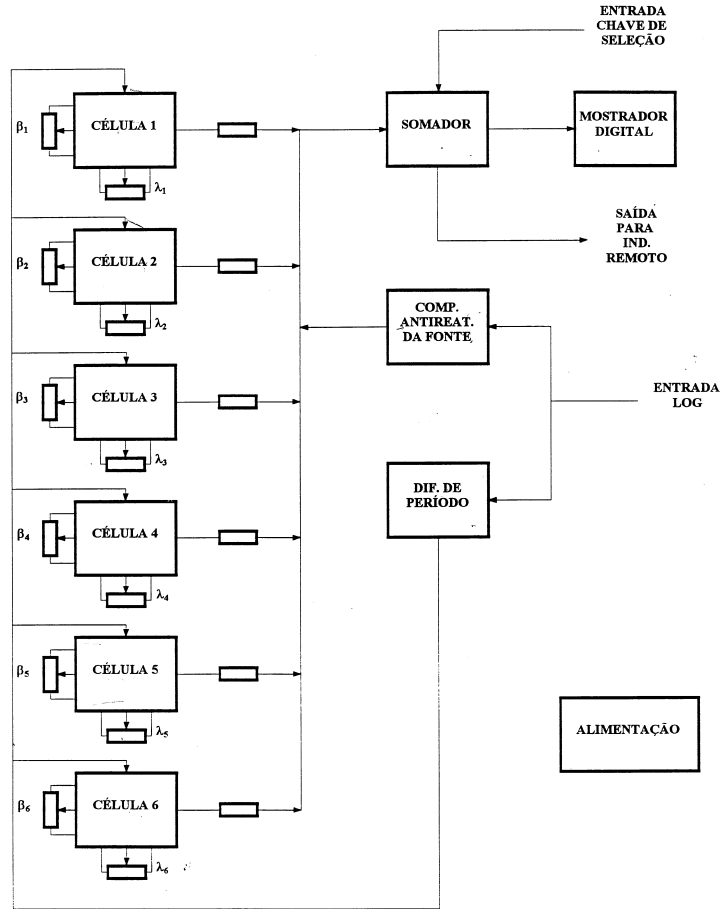


Figura 9 - Diagrama em blocos do módulo 9203 do SMFN (Medidor de Reatividade do Canal Logarítmico).

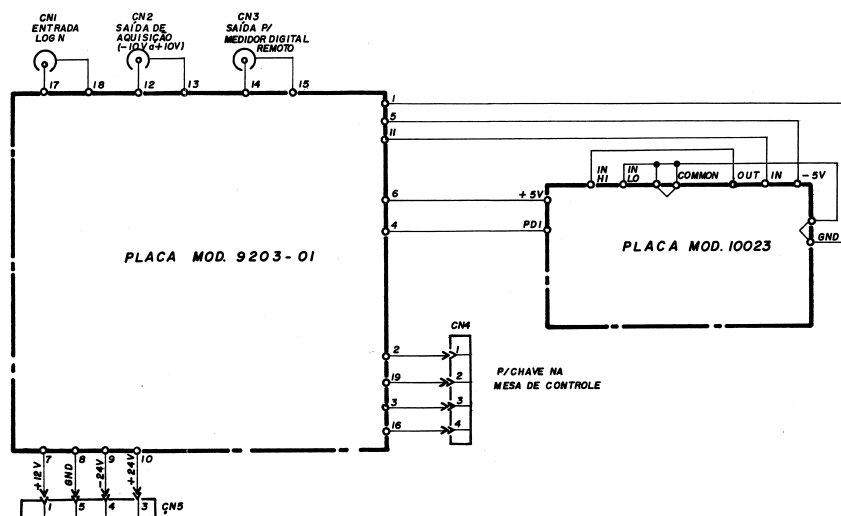


Figura 10 - Diagrama de conexões do módulo 9203 do SMFN (Medidor de Reatividade do Canal Logarítmico).

2.2.1.3 Canal Linear

O detector de nêutrons do canal linear é do tipo câmara de ionização compensada, idêntico ao canal logaritmo. Seu indicador na mesa de controle mostra a potência do reator de 0 a $2,5 \cdot 10^n W$, em escala linear, sendo n um valor selecionado através do seletor de escala. O seletor de escala é uma chave rotativa com 8 posições, cada posição correspondendo a uma década de -3 a 5 . Em termos de intertravamento, ele gera um sinal de desligamento do reator caso o valor ultrapasse 10% acima do fundo da escala selecionada.

O funcionamento da nucleônica deste canal pode ser melhor entendido através do diagrama de blocos do módulo 9215 do SMFN, que é o módulo principal do canal linear e pode ser visto na Figura 8. Como pode ser visto, o módulo possui além da entrada do detector, dado pela “ENTRADA DE CORRENTE”, possui também uma entrada para o seletor de escalas, dado pela “CHAVE DE TROCA DE ESCALAS”.

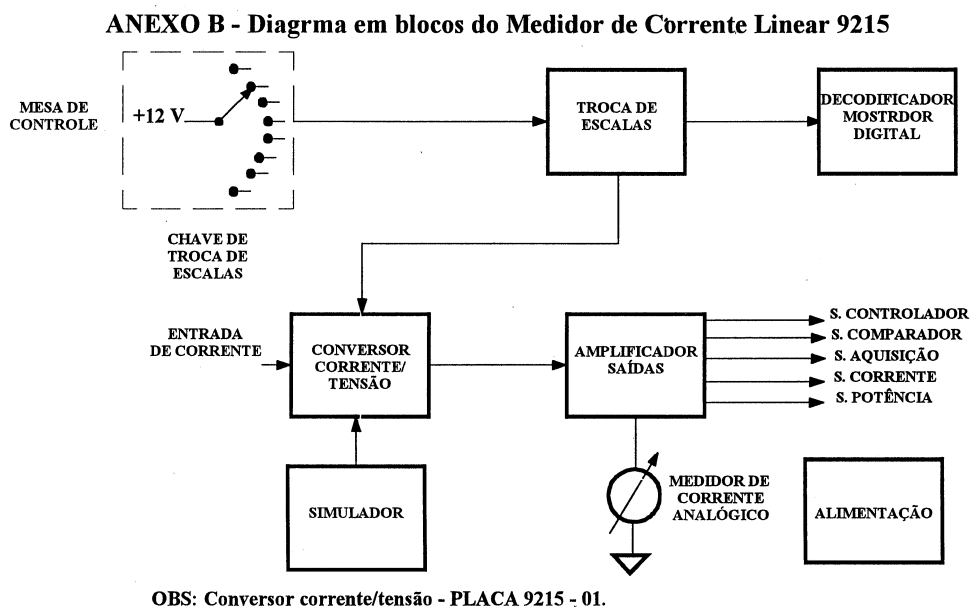


Figura 11 - Diagrama em blocos do módulo 9215 do SMFN (Canal Linear).

Conforme pode ser visto na mesma figura citada, o módulo tem saída para 1 indicador na mesa de controle, dado pela saída nomeada “S. CORRENTE”, referente a potência linear. E acompanhada dessa saída, é possível ser vista também a saída de aquisição de dados, dado pela saída nome-

ada “S. AQUISIÇÃO”. De acordo com o fabricante, o sinal de tensão dessa saída varia de 0 a 10 V, correspondente linearmente de 0 a 100 % do valor da corrente medida em cada escala. Cada uma das 8 posições da chave rotativa na mesa de controle corresponde a um valor de escala de corrente do detector, variando de década em década, de 10^{-10} a 10^{-3} A. Sendo a escala 10^{-3} W correspondendo a escala de 10^{-10} A, e a escala 10^5 W correspondente a 10^{-3} A.

Entretanto, o fabricante não projetou uma saída de aquisição de dados para a escala selecionada, nem projetou também uma saída de indicação remota da escala para a mesa de controle como no canal de partida. O canal linear possui um circuito interno indicador de escala (placa 9215-03), apresentado na Figura 12, assim como o canal de partida também possui um circuito interno indicador de escala (placa 9205-03), apresentado na Figura 7. Mas diferente do canal de partida que foi projetado para alternar automaticamente a escala, criando a necessidade de uma indicação da mesma na mesa de controle, o canal linear dispõe dessa informação na mesa de controle, dado que a mesa possui a chave seletora de escalas.

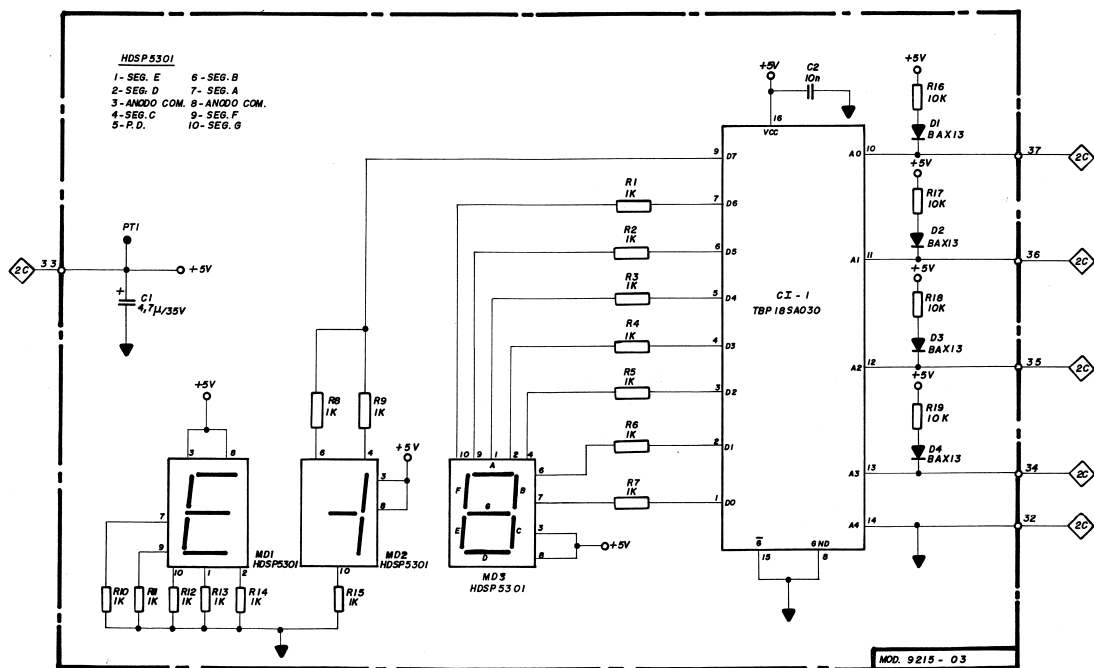


Figura 12 - Diagrama elétrico da placa 9215-03 do módulo 9215 do SMFN (Canal Linear).

2.2.1.4 Canal Potência Percentual

Diferentemente dos canais Logarítmico e Linear, o canal de Potência Percentual atualmente usa um detector de nêutrons do tipo câmara de ionização não compensada. A nucleônica deste canal suporta um detector com compensação, mas esta é efetiva apenas em baixas potências, e o canal potência percentual não possui resolução de leitura nessa faixa, portanto não faz diferença usar um detector com ou sem compensação. Esse canal possui 1 indicador na mesa de controle, que exibe a potência do reator percentualmente a potência máxima (250 kW, visto que a nova I&C foi projetada para ler este valor). Em termos de intertravamento, ele está configurado para causar um sinal de desligamento do reator caso o valor ultrapasse 10% acima da potência máxima licenciada (100 kW), ou seja, 44%.

O diagrama de blocos da nucleônica do módulo principal desse canal (9214) é muito simples e pode ser visto na Figura 13. Ele dispõe de uma saída para 1 indicador na mesa de controle, saída nomeada “Saída de Corrente”, e o seu indicador exibe valores de 0 a 120%. Possui também uma saída para aquisição de dados, nomeada “Saída p/ Aquisição”, que de acordo com o fabricante emite um sinal de 0 a 10 V linearmente proporcional de 0 a 100% da potência medida.

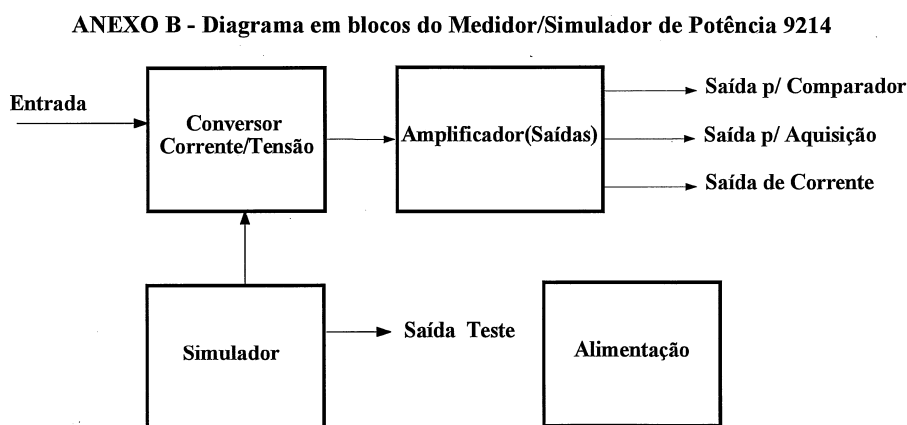


Figura 13 - Diagrama em blocos do módulo 9214 do SMFN (Canal Potência Percentual).

2.2.2 SMRA

De acordo com o fabricante, esse sistema tem como objetivo monitor a radiação nas vizinhanças de reator IPR-R1, sendo composto por 6 canais, cada um contendo com 1 Geiger-Müller (detector G-M), sua nucleônica associada, e o indicador na mesa de controle. Todos os 6 indicadores exibem valores em escala logarítmica de 0,1 a 100 mrem h⁻¹.

São 2 modelos de detectores usados no SMRA: o detector G-M-LND713 é projetado para detectar somente radiação gama, enquanto o detector G-M-LND730 (tipo panqueca) é projetado para detectar radiação alfa, beta e gama. Se alimentados com uma tensão adequada, eles geram um pulso elétrico quando a radiação do tipo compatível interagem com o gás em seu interior, provocando a ionização do mesmo. Cada um é instalado em um ponto específico da Unidade do Reator TRIGA (URT), sendo eles:

1. detector G-M-LND730: Monitor de aerossóis;
2. detector G-M-LND713: Poço do reator;
3. detector G-M-LND713: Salão do reator;
4. detector G-M-LND713: Entrada do sistema de refrigeração primário;
5. detector G-M-LND713: Sistema de filtro por resinas; e
6. detector G-M-LND713: Saída do sistema de refrigeração secundário.

A nucleônica do SMRA é composta por 2 módulos principais: o 9219 (Figura 14), referente os detectores o do modelo LND713; e o 9226 (Figura 15), referente aos detectores do modelo LND730. O princípio básico de funcionamento de ambos é alimentar o detector com uma alta tensão adequada, e contar os pulsos gerados em um intervalo de tempo, o discriminando de ruídos. A taxa de contagem é convertida para dose por uma multiplicação de uma constante, a qual pode ser ajustada alterando um potenciômetro no circuito.

Estes módulos não foram projetados com saídas de aquisição de dados, diferentemente dos módulos principais do SMFN. Entretanto, conforme

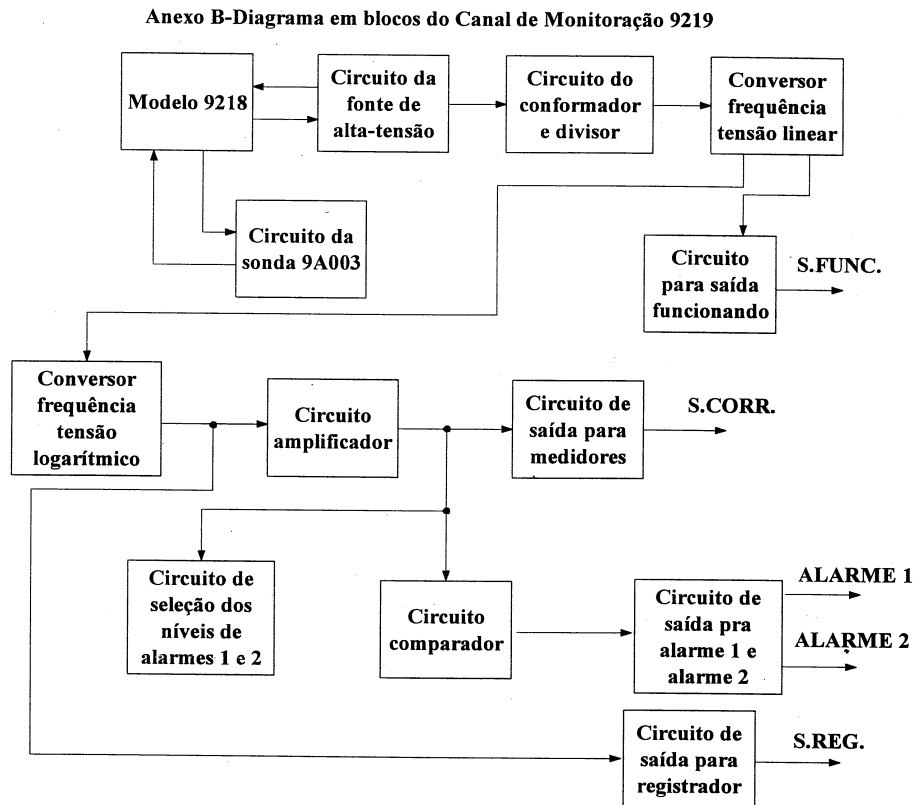


Figura 14 - Módulo 9219. Diagrama em blocos dos principais módulos do SMRA.

pode ser visto nas Figuras 14 e 15, existe em cada módulo uma saída para registrador gráfico, nomeada como "S.REG.". De acordo com o fabricante essa saída usa conector BNC e seu sinal compreende o intervalo de 0 a 10 V, mesmo conector e intervalo de tensão das saídas de aquisição de dados do SMFN, portanto são compatíveis, e como não existem registradores conectados a essas portas no IPR-R1, todas estão disponíveis. Seu valor de tensão corresponde logicamente a variação de 1 a 10^3 s^{-1} .

Anexo B-Diagrama em blocos do Canal de Monitoração de Aerossóis 9226

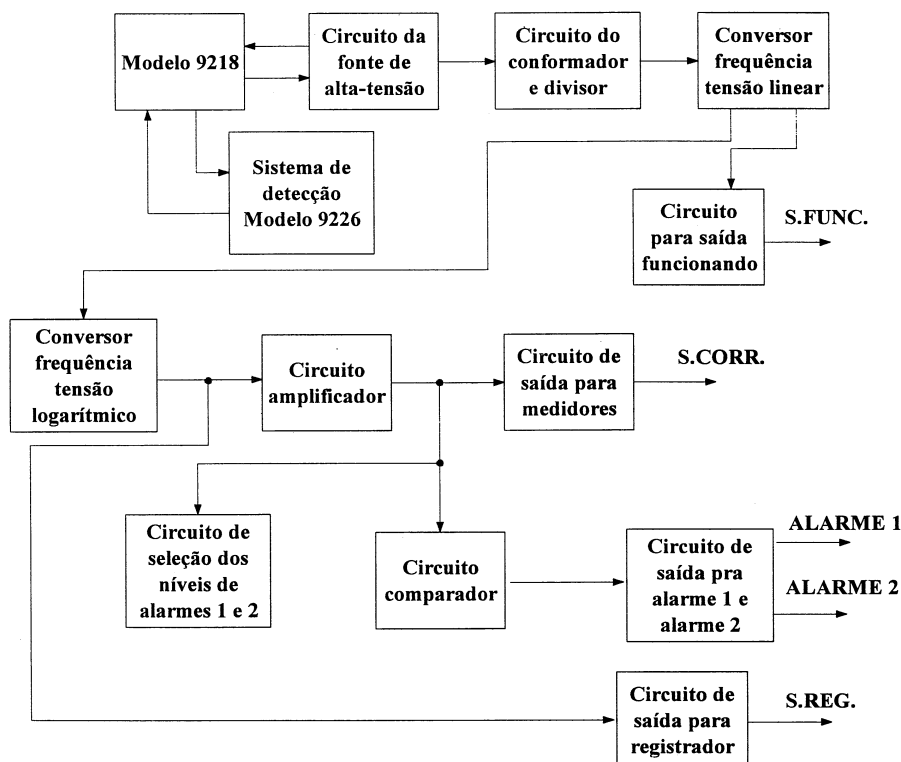


Figura 15 - Módulo 9226 (Aerossóis). Diagrama em blocos dos principais módulos do SMRA.

2.2.3 Sistema de Acionamento de Barras

As barras de controle do IPR-R1 são compostas de carbeto de boro B_4C , um material fortemente absorvedor de nêutrons. As 3 barras são idênticas em material e geometria, diferindo uma da outra apenas sua posição no núcleo. Elas são conectadas a um mecanismo de posicionamento que se encontra na coluna central do poço do reator por intermédio de um eletroímã.

O eletroímã é o principal item da cadeia de segurança do reator. Durante a operação do reator, se os eletroímãs são desenergizados, as barras caem por gravidade automaticamente, desligando o reator. A cadeia de segurança do reator é composto de 2 sinais: “aviso” e “desligamento”, sendo este último conhecido como Safety Control Rod Axe Man (SCRAM).

O mecanismo é atuado por um motor elétrico e se movimenta por meio de pinhão e cremalheira. Ele possui ainda sensores, como um potenciômetro para indicar a posição da barra na mesa de controle (também por meio de pinhão e cremalheira), fins de curso, entre outros. O circuito indicador de

posição de das barras é separado do sistema de acionamento, não fazendo parte da cadeia de segurança.

2.2.3.1 Indicador de posição das barras de controle

Cada barra de controle possui indicador de posição independente. Para medir a posição da barra, este circuito alimenta um potenciômetro com uma tensão de 0 e de 2,5 V, recebendo o sinal gerado pelo mesmo. Ele possui um indicador digital de 3 dígitos capaz de exibir valores de posição de barra de 0 a 999, linearmente proporcionais a posição da respectiva barra.

A nucleônica do indicador de posição das barras de controle é composta por um único módulo, o 9220, que pode ser visto na Figura 16. Este módulo é composto por um único circuito, que pode ser visto na Figura 17. O fabricante não projetou esse módulo/circuito com saída de aquisição de dados.

ANEXO B - Diagrama em blocos do Indicador de Posição 9220

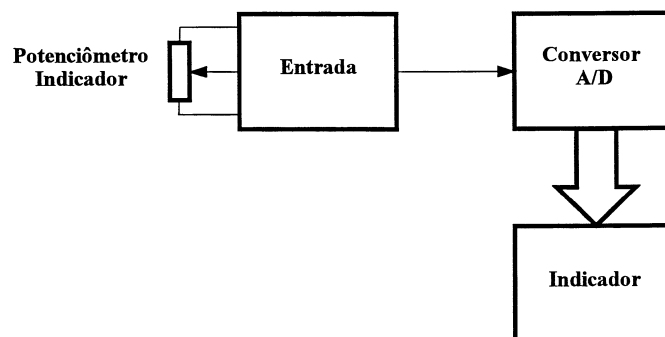


Figura 16 - Diagrama em blocos do módulo 9220 (indicador de posição das barras de controle)

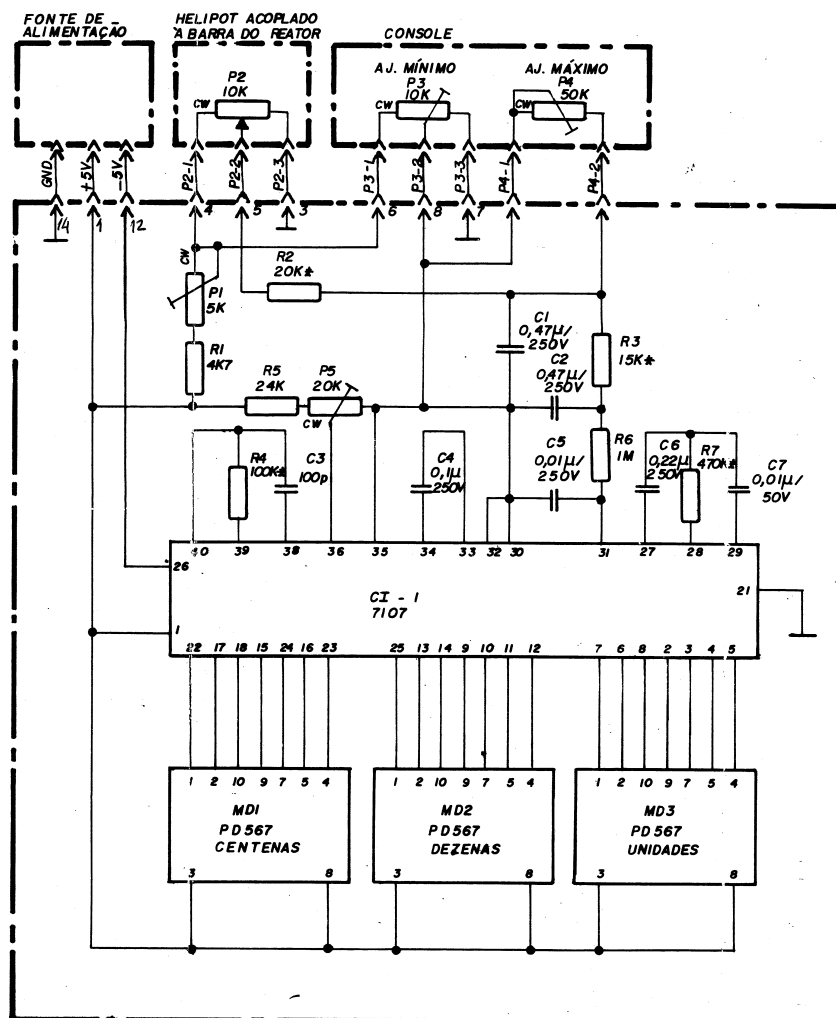


Figura 17 - Diagrama elétrico da placa 9220 (indicador de posição das barras de controle).

2.2.4 Novo SMFN

Foi instalado na sala de controle do IPR-R1 um novo SMFN, fornecido pela corporação russa *Rosatom* (Росатом) e fabricado pela empresa também russa *Systematom* (Систематом). Ele ainda passará por um processo de comissionamento para ser incorporado à cadeia de segurança do reator, após aprovação formal pelo órgão regulador, podendo eventualmente substituir o atual SMFN (CDTN/CNEN, 2024). Portanto, por enquanto ele só pode ser usado como instrumento de pesquisa.

Ele possui 2 canais neutrônicos, cada um deles podendo ser conectados até 3 detectores de nêutrons. De acordo com a fabricante, somente 2 detectores por canal são o suficiente para monitorar o fluxo em toda a faixa de potência do IPR-R1 (0 a 250 kW_t). Sendo eles, 1 tipo câmara de fissão,

para monitorar o fluxo em baixa potência, e 1 do tipo câmara de ionização, para monitorar o fluxo em alta potência.

O SMFN é dividido em 1 Unidade de Processamento de Sinais, do inglês, Signal Process Unit (SPU) e várias Unidade de Condicionamento de Sinais, do inglês, Signal Conditioning Unit (SCU), sendo 1 SCU por detector de nêutrons (totalizando 4 delas atualmente). O modelo SCU-01R foi projetado para ser conectado no detector do tipo câmara de fissão, ficando responsável alimenta-la com a alta tensão adequada e discriminar o sinal gerado por ela, separando através do nível de tensão os pulsos produzidos por nêutrons dos pulsos produzidos por outros tipos de radiação e do ruído. Seu diagrama pode ser visto na Figura 18. Para cada pulso detectado como sendo produzido por nêutron, é emitido 1 pulso retangular de amplitude e duração constante. O modelo SCU-02R foi projetado para ser conectado no detector do tipo câmara de ionização compensada, ficando responsável por alimenta-la com a alta tensão e tensão de compensação adequadas, convertendo a corrente gerada pelo detector em um sinal de pulsos retangulares. A frequência dos pulsos é linearmente proporcional a corrente, e assim como a SCU-01R, a amplitude e duração dos pulsos também são constantes. Seu diagrama pode ser visto na Figura 19.

A nucleônica da SPU é dividida em 2 canais, nomeados como canal A e canal B, onde cada qual possui entrada para sinais de até 3 SCU, sendo denominados com intervalos de entrada. Seu diagrama pode ser visto na Figura 20. O intervalo 1 e 2 são adequados para conectar o tipo SCU-01R, e o intervalo 3 adequado para conectar o tipo SCU-02R. Em ambos canais a SCU-01R foi conectada no intervalo 2, ficando o intervalo 1 desconectado.

Cada canal possui seu próprio Arranjo de Portas Programáveis em Campo, do inglês, Field-Programmable Gate Array (FPGA) (que pode ser visto na Figura 21, os quais são responsáveis por contar a taxa média de pulsos (*Count Rate*), entre outras funções. A SPU calcula a potência e o período a partir do *Count Rate*, além disso, tem a capacidade de comutar automaticamente entre o *Count Rate* referente a qual intervalo usar para os cálculos. A potência é calculada com unidade percentual, através da multiplicação do valor

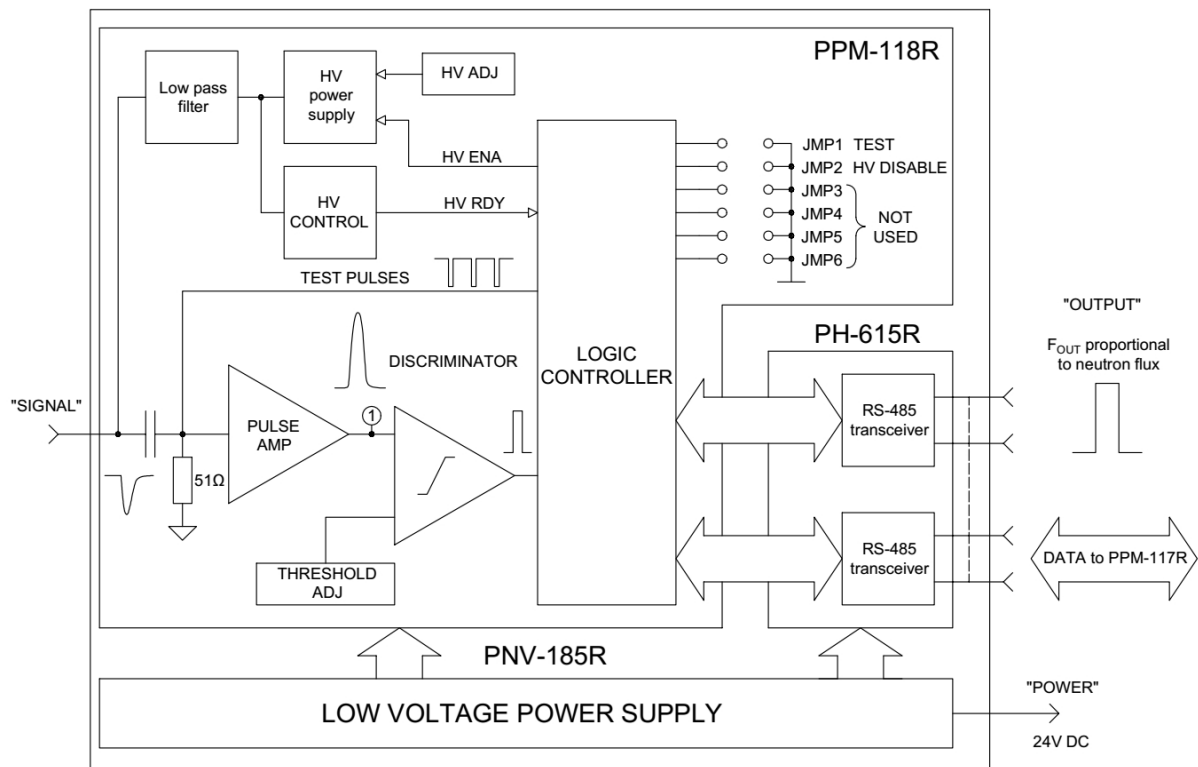


Figura 18 - Diagrama de blocos das SCU-01R (Sniip-Systematom, 2023).

instantâneo do *Count Rate* por uma constante. E o período é calculado com unidade de segundos, através de um algoritmo específico que mede a taxa de crescimento temporal do *Count Rate*.

Diferente do atual SMFN, os canais do novo SMFN são projetados para serem redundantes, ou seja, realizam os mesmos tipo de cálculos, exibem o mesmo tipo de valor e no mesmo intervalo. Logo, desde que devidamente calibrados, devem gerar os mesmos resultados. Para exibir os resultados aos operadores, a SPU dispõe de 2 *display's* (mostradores) externos para serem instalados na mesa de controle, 1 por canal. Eles são alimentados e comandados por seus respectivos canais, e não dispõe de qualquer configuração. A potência percentual é exibida em forma de potência de 10, de forma que consegue exibir potências no intervalo de $1,0 \cdot 10^{-6} \%$ a $1,0 \cdot 10^3 \%$. O período, por sua vez, é exibido em números inteiros, no intervalo de -999 s a 999 s.

Além disso, os canais possuem 2 saídas de aquisição de dados cada. Possuindo uma interface *RS-485* e comunicam pelo protocolo *Modbus-RTU*. Por meio dessas interfaces, outros dispositivos podem solicitar ao canal corres-

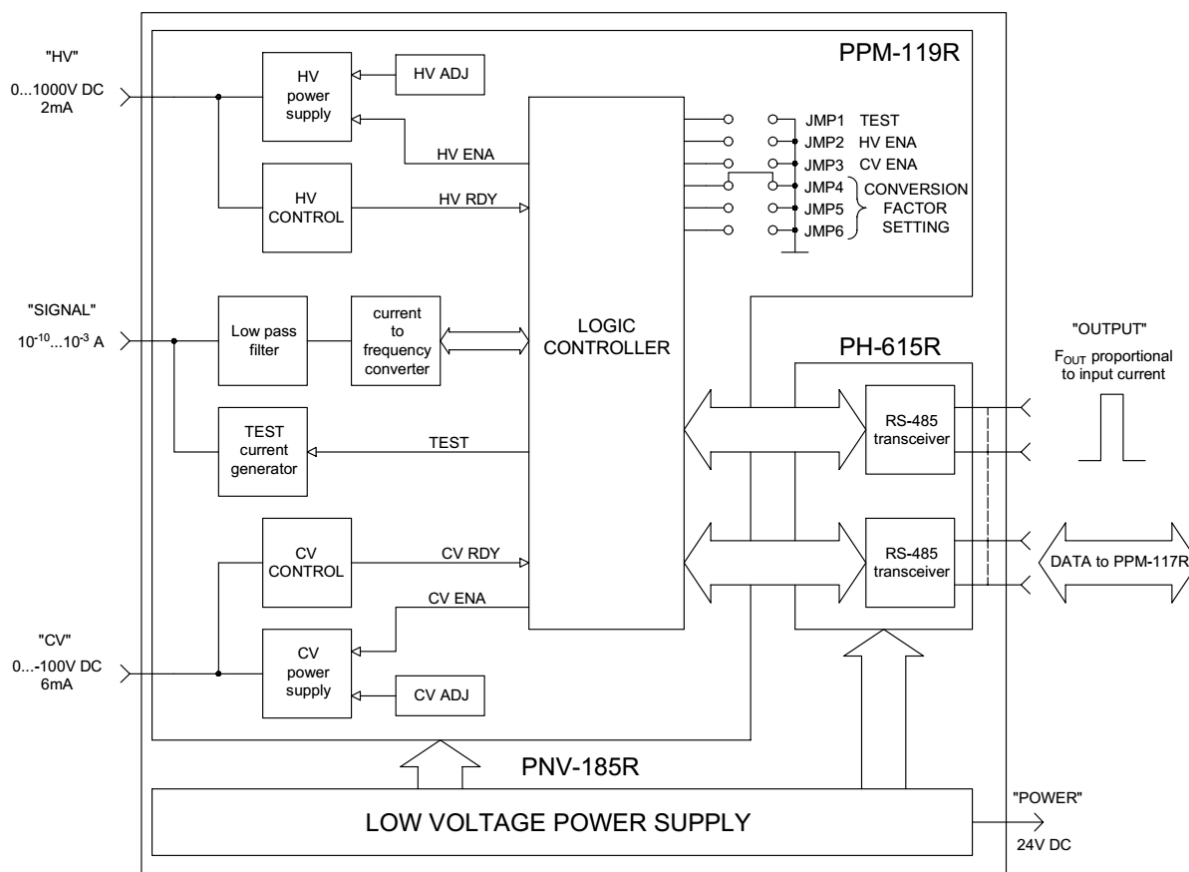


Figura 19 – Diagrama de blocos das SCU-02R (Sniip-Systematom, 2023).

pondente o envio de valores armazenados no FPGA, especificando o endereço da(s) variável(is) desejada(s). A lista de variáveis, incluindo seus endereços e descrições, está disponível para consulta na Tabela 2.

Foi fornecido também pela corporação *Rosatom* um computador industrial para monitoramento e armazenamento das variáveis. Seu modelo é *RMT 79 (PMT 79)* e é fabricado pela empresa russa *Elemer (Элемер)*. Ele possui 2 conexões com interface *RS-485*, assim, tendo capacidade de se comunicar com ambos canais da SPU ao mesmo tempo. Seu sistema operacional usa o *kernel Linux*, e possui um programa que se comunica com os canais neutrônicos, solicitando a aquisição de dados e armazenando os valores recebidos em um banco de dados no próprio computador. Além disso, ele permite visualizar os dados em tempo real, bem como o histórico armazenado.

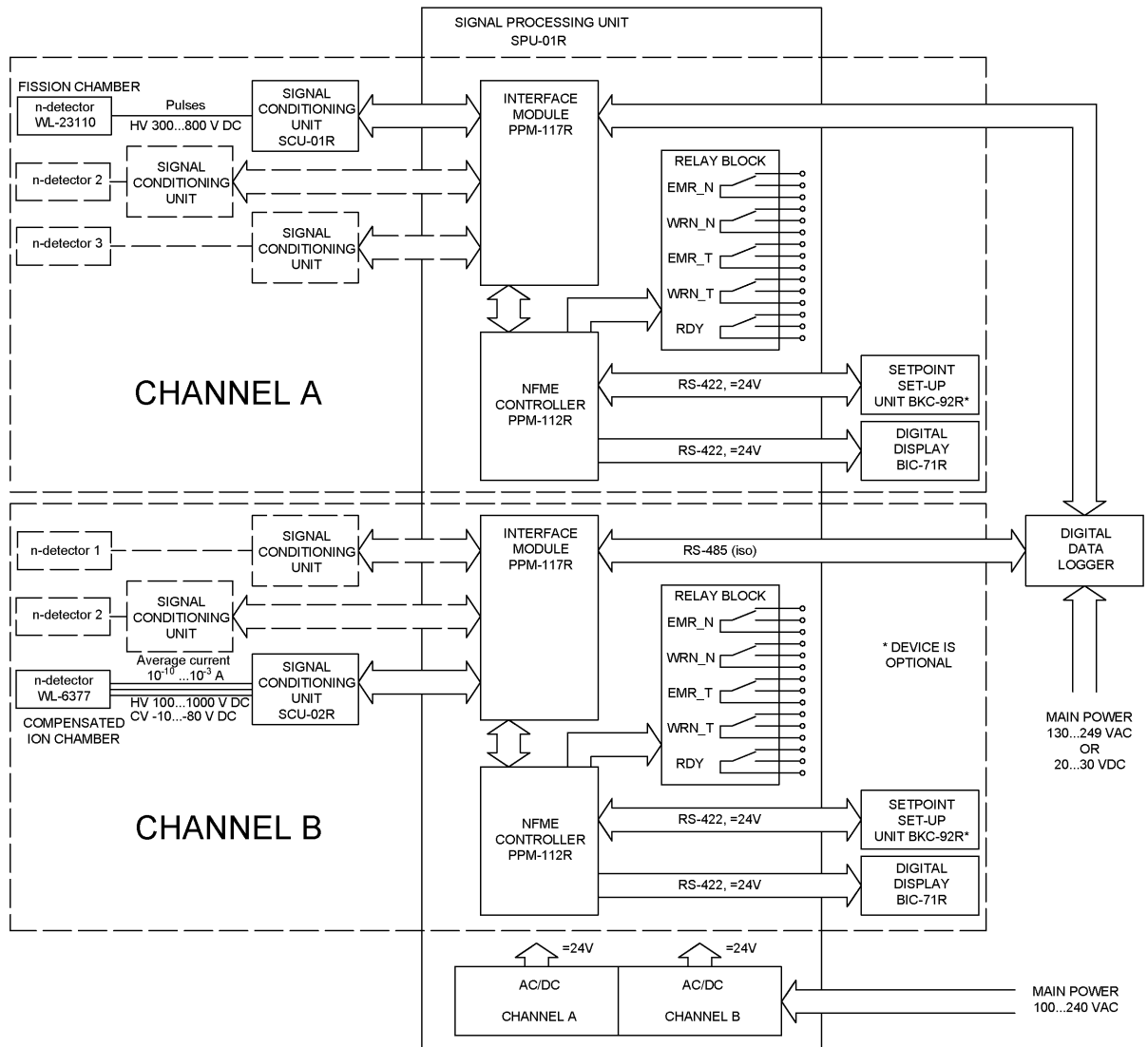


Figura 20 - Diagramas de blocos da SPU-01R (Sniip-Systematom, 2023).

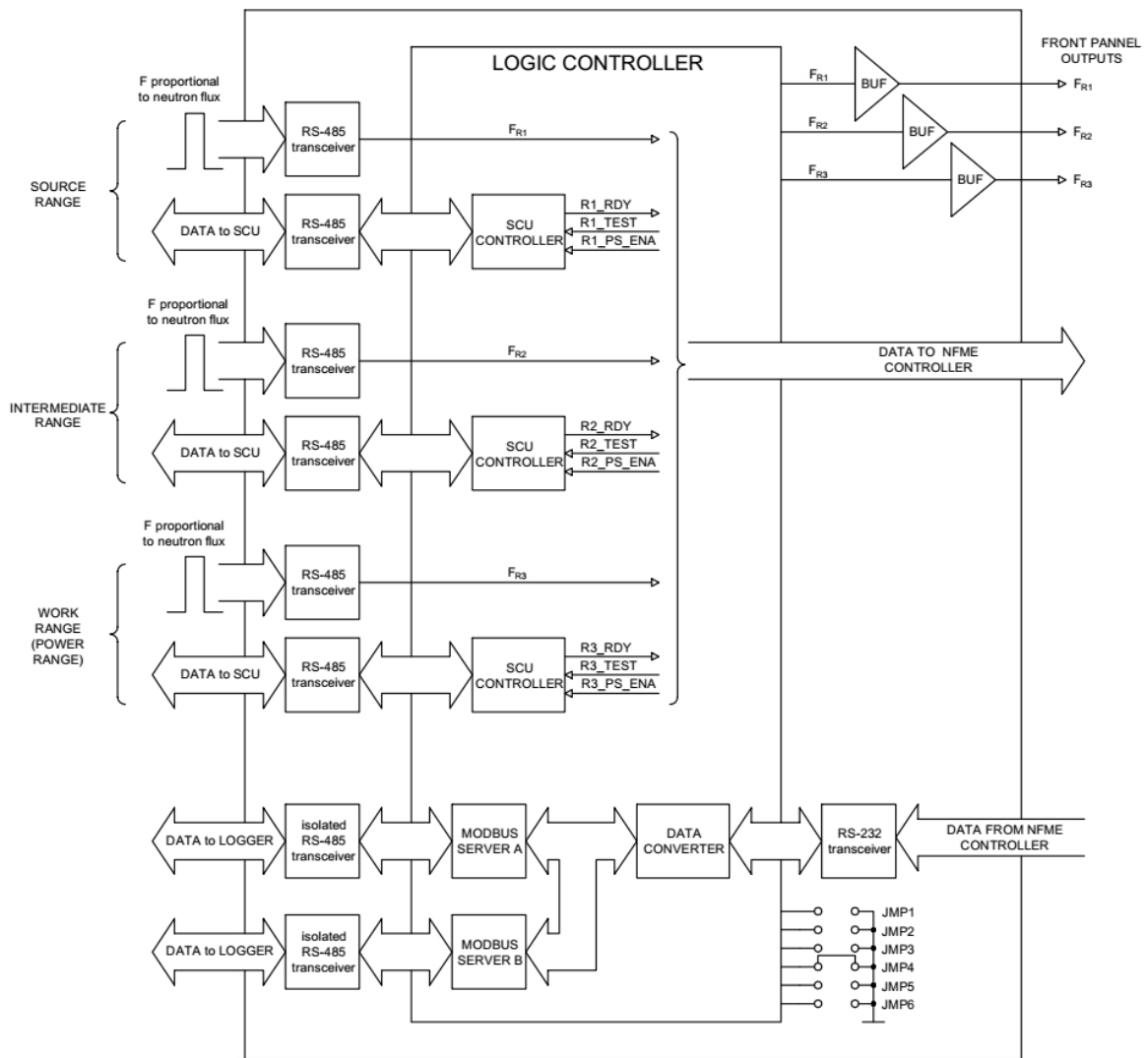


Figura 21 - Diagrama de blocos do módulo PPM-117R (Sniip-Systematom, 2023).

N = 3 . 5 E - 3 % T = 9 9 9 s

Figura 22 - Esquemático do mostrador digital BIC-71R (Sniip-Systematom, 2023).



Figura 23 - Dispositivo *Elemer RMT 79* (Sniip-Systematom, 2023).

Variável	Endereço [bit]	Descrição
N_DATA_FP	0x0001 [31:16] 0x0002 [15:0]	Potência Neutrônica (%)
T_DATA_FP	0x0003 [31:16] 0x0004 [15:0]	Período (s)
F1_DATA_FP	0x0005 [31:16] 0x0006 [15:0]	Taxa de contagem do intervalo 1 (s ⁻¹)
F2_DATA_FP	0x0007 [31:16] 0x0008 [15:0]	Taxa de contagem do intervalo 2 (s ⁻¹)
F3_DATA_FP	0x0009 [31:16] 0x000A [15:0]	Taxa de contagem do intervalo 3 (s ⁻¹)
EMR_N_THRESHOLD	0x000B [31:16] 0x000C [15:0]	Limiar de potência para sinal de emergência (%)
WRN_N_THRESHOLD	0x000D [31:16] 0x000E [15:0]	Limiar de potência para sinal de aviso (%)
EMR_T_THRESHOLD	0x000F [31:16] 0x0010 [15:0]	Limiar de período para sinal de emergência (s)
WRN_T_THRESHOLD	0x0011 [31:16] 0x0012 [15:0]	Limiar de período para sinal de aviso (s)
EMR_N	0x0064 (*)	Sinal de emergência de potência
WRN_N	0x0065 (*)	Sinal de aviso de potência
EMR_T	0x0066 (*)	Sinal de emergência de período
WRN_T	0x0067 (*)	Sinal de aviso de período
R1	0x0068 (*)	Intervalo 1
R2	0x0069 (*)	Intervalo 2
R3	0x006A (*)	Intervalo 3
RDY	0x006B (*)	“Pronto”
TEST	0x006C (*)	Modo de teste
PPM117R	0x006D (*)	Estado do módulo PPM-117R

Tabela 2 - Descrição das variáveis da SPU, e seus endereços.
* = Valor 0x00 representa inativo e valor 0xFF representa ativo.

2.3 Sistemas operacionais e licenças de código

Os códigos que são desenvolvidos neste trabalho irão rodar em cima de um sistema operacional e, como serão públicos, devem ser publicado juntamente com uma licença que regule o uso e distribuição dos mesmos. Um sistema operacional é uma aplicação fundamental que gerencia os recursos de *hardware* e outras aplicações em um computador, proporcionando uma interface entre o usuário e a máquina. O sistema operacional *Unix*, originado nos laboratórios *Bell* da *AT&T*, foi motivado pela necessidade de criar um sistema simples, eficiente e portátil, em contraste com os sistemas complexos e pouco flexíveis da época. Ele introduziu inovações como a filosofia de design modular, multitarefa, suporte a múltiplos usuários, e o conceito de fluxo de texto para conectar programas. Essas novidades, aliadas à sua portabilidade e linguagem de programação em C, tornaram o *Unix* um marco na computação, influenciando diretamente muitos sistemas operacionais modernos.

De acordo com Doug McIlroy “Esta é a filosofia *Unix*:

Escreva programas que façam apenas uma coisa, mas que a façam bem feita;

Escreva programas que trabalhem juntos;

Escreva programas que manipulem fluxo de texto, pois esta é uma interface universal.”

Apesar de inovador, o *Unix* era um sistema proprietário, onde empresa detentora dos direitos autorais (*AT&T*) iniciou uma série de processos judiciais de propriedade intelectual. O caso mais emblemático foi o processo movido contra a Universidade da Califórnia em Berkeley (UC-Berkeley), que culminou na impossibilidade por alguns anos da mesma distribuir o sistema operacional Berkeley Software Distribution (BSD), dado que o BSD originou-se do código do *Unix*, com melhorias implementadas pela UC-Berkeley. Como resultado dessas disputas legais, surgiram sistemas operacionais baseados no BSD que não continham código derivado da *AT&T*.

Os sistemas operacionais com licença livre e amplamente suportados hoje em dia são os derivados do BSD e o *GNU* Não é Unix, do inglês, *GNU is Not Unix (GNU)*. Ambos são sistemas *Unix-Like*, ou seja, sua base é programada usando a filosofia *Unix* e inspirada no antigo sistema operacional *Unix*. Mas diferente do BSD, o *GNU* é um clone do *Unix* que desde o início os hackers do projeto *GNU* escreveram do zero os seus próprios códigos dos programas que compõe o sistema operacional, apenas copiando as funcionalidades dos programas do *Unix*.

O projeto *GNU* adota uma filosofia protetiva em relação às licenças de código (conhecida como copyleft). Códigos publicados sob uma licença *GNU*, como a Licença Pública Geral do GNU, do inglês, GNU General Public License (GPL), devem permanecer licenciados sob a mesma licença e só podem ser incorporados em outros projetos que também estejam licenciados sob a GPL ou mais protetiva. Por outro lado, o projeto BSD segue uma filosofia mais permissiva em relação as licenças. Códigos publicados sob a licença BSD podem ter sua licença alterada para uma licença proprietária ou serem incorporados em projetos com código proprietário.

Os sistemas operacionais são compostos por várias aplicações, que se dividem em 2 grandes grupos: aplicações no espaço de usuário e aplicações no espaço do *kernel*. Aplicações de *kernel*, cuja melhor tradução seria núcleo, são as responsáveis por manipular diretamente o hardware, abstraindo as funcionalidades do mesmo para as aplicações na camada de usuário. Diferente do *Unix* que possuía um *kernel* de tipo *monolítico*, que significa que o espaço do *kernel* é composto por apenas uma aplicação, projeto *GNU* estava desenvolvendo uma abordagem em que consideravam mais avançada, que o espaço do *kernel* dividido em 2 grupos de aplicações: o primeiro sendo uma coleção de servidores que se comunicam entre si, cada um com uma função específica (administrar o armazenamento, administrar a rede, etc), nomeado como *GNU Hurd*; e um segundo um grupo composto por uma aplicação que atuaria como um *microkernel*, o *GNU Mach*, que tem as funções de gerenciar a comunicação entre os diferentes servidores e fornecer serviços básicos de sistema, como escalonamento de processos

e manipulação de interrupções. Apesar das vantagens teóricas da abordagem de um *microkernel*, foram encontradas muitas dificuldades no desenvolvimento do *GNU Hurd* (Walfield; Brinkmann, 2007), abrindo portas para o desenvolvimento de outro *kernel* para o *GNU*.

Aproximadamente após um ano do início do desenvolvimento do *GNU Hurd*, um desenvolvedor chamado Linus Torvals iniciou o desenvolvimento de um *kernel* proprietário usando o sistema operacional *GNU* e sua variedade de ferramentas (*gLibC*, *GCC*, etc), o nomeado como *Linux*. Este *kernel* é do tipo monolítico (mesmo tipo do *Unix* e *BSD*), e estava na época produzindo resultados melhores do que o *GNU Hurd* com menos dificuldade de desenvolvimento. Então, em 1992 Linus foi convencido a licenciar o *Linux* com a licença do projeto *GNU* (*GPLv1* e posteriormente *GPLv2*), possibilitando que pessoas distribuíssem o que ficou conhecido como sistema operacional *GNU* com *kernel Linux* (*GNU/Linux*). Vários projetos na internet realizam o trabalho de compilação, empacotamento e distribuição do *GNU/Linux*, o quais são conhecidos como “distribuições *GNU/Linux*”.

Além do *GNU/Linux* esses projetos distribuem uma série de pacotes contendo aplicações com licenças livres, diferenciando entre si por quais aplicações vem instaladas por padrão, a versão da aplicação, eventuais alterações no código fonte da aplicação, configurações padrão das aplicações, ou ainda, qual aplicação é responsável por fazer o gerenciamento de pacotes. Enquanto os sistemas livres derivados do *BSD*, por exemplo o *OpenBSD*, *FreeBSD* e *NetBSD*, são sistemas operacionais distintos, cada um com seu próprio *kernel*, aplicações base do sistema, gerenciador de pacotes e alguns programas específicos. Eles também compartilham aplicações comuns entre si e com distribuições *GNU/Linux*, dado que todos são projetos livres.

Em relação a quantidade de dispositivos instalados, o *GNU/Linux* é mais amplamente utilizado que os sistemas derivados do *BSD*, dispõe de mais documentação, e mais suporte disponível na internet. Além disso, o *kernel Linux* é usado em outro sistema operacional amplamente utilizado em dispositivos móveis, o *Android*. Este é licenciado sob a licença *Apache 2.0*, a qual é livre e permissiva (similar a licença *BSD*), apesar do *kernel Linux*

possuir uma licença livre e protetiva do projeto *GNU*, a GPLv2.

O projeto GNU possui 3 principais licenças, listadas abaixo.

- GPL: é a licença mais conhecida e amplamente utilizada. Ela garante que o código licenciado seja livre para ser usado, modificado e redistribuído, desde que as versões modificadas também sejam distribuídas sob a mesma licença (ou uma mais protetiva, como a AGPL).
- Licença Pública Geral Menor GNU, do inglês, GNU Lesser General Public License (LGPL): é uma versão da GPL que permite a integração de códigos licenciados por ela, com códigos proprietários no formato de bibliotecas (ou outros componentes), desde que qualquer modificação no código seja mantida livre.
- Licença Pública Geral Affero GNU, do inglês, GNU Affero General Public License (AGPL): é uma versão da GPL para servidores. Exige que mesmo que o programa não seja distribuído, caso seja executado em um servidor, o código-fonte deve ser disponibilizado para os usuários.

2.4 Calibração de Barras de Controle

Nos reatores TRIGA, a principal forma de controlar a reatividade é alterando a posição das barras de controle. No caso do reator TRIGA IPR-R1, existem três barras absorvedoras idênticas em sua composição material e geometria. Seus nomes e posição no núcleo são:

- Barra de Segurança: Posição C7
- Barra de Controle: Posição C1
- Barra de Regulação: Posição F16

As posições de cada barra podem ser melhor compreendidas através da Figura 24, que mostra um esquema do núcleo do reator contendo as posições de cada elemento combustível, de cada elemento de grafita, de cada barra, entre outros.

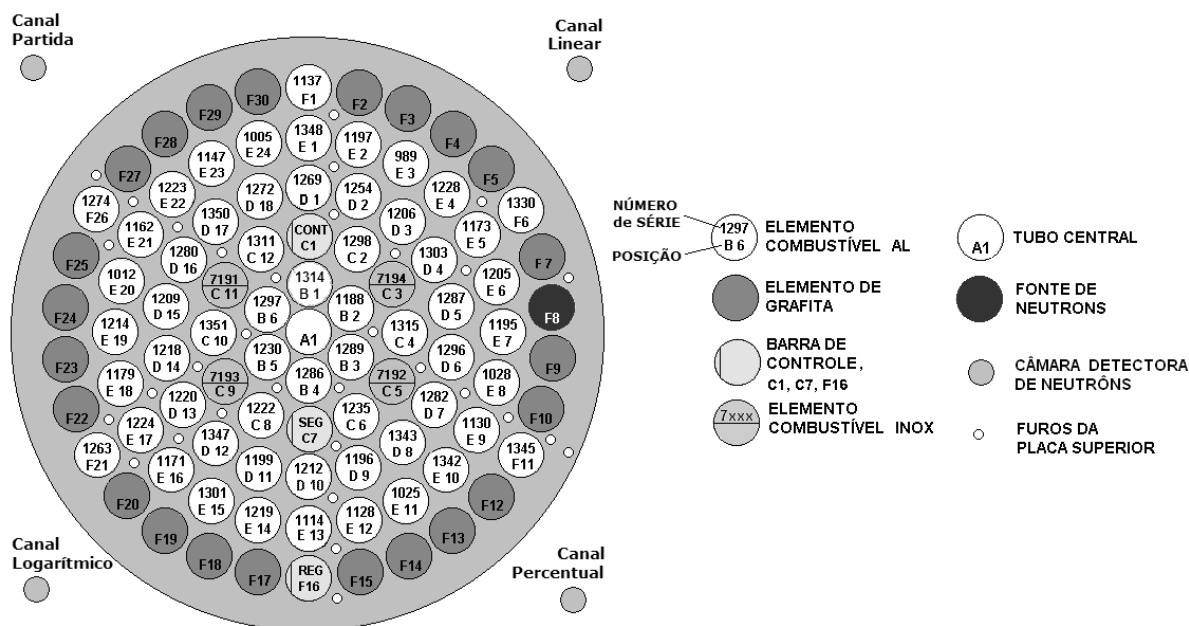


Figura 24 - Configuração do núcleo em outubro de 2023 (Prado Souza, 2023).

As barras de Segurança e Controle estão em posições radialmente simétricas em relação ao centro do núcleo, de modo que devem ter influências de reatividade semelhantes, menos as assimetrias locais de fluxo. Por outro lado, a posição radial da barra de Regulação dentro do núcleo é diferente, mais afastada do centro, o que a expõe a um fluxo de nêutrons menor e, conseqüentemente, tem uma influência menor na reatividade geral do reator.

A influência de cada barra na reatividade varia conforme sua posição axial de inserção. A não linearidade do fluxo de nêutrons no núcleo do reator significa que alterações equivalentes na posição axial de uma mesma barra podem resultar em variações distintas na reatividade, dependendo de sua posição inicial. Tipicamente, quando a barra está próxima às extremidades superior ou inferior, mudanças significativas em sua posição não afetam substancialmente a reatividade, pois estas são áreas de baixo fluxo de nêutrons. Por outro lado, pequenas alterações na posição axial podem ter um impacto considerável na reatividade quando a barra está localizada mais ao centro do núcleo, uma zona de fluxo máximo de nêutrons.

Um procedimento de calibração da barra de controle é adotado para quantificar a influência da reatividade em cada posição da barra. Os resul-

tados desse procedimento possibilitam ao operador ajustar a inserção ou remoção da barra para alcançar uma mudança específica na reatividade. A título de exemplificação, pode ser vista na Figura 25 curva integral de calibração da barra de regulação obtida para o IPR-R1 durante os testes neutrônicos de 2023.

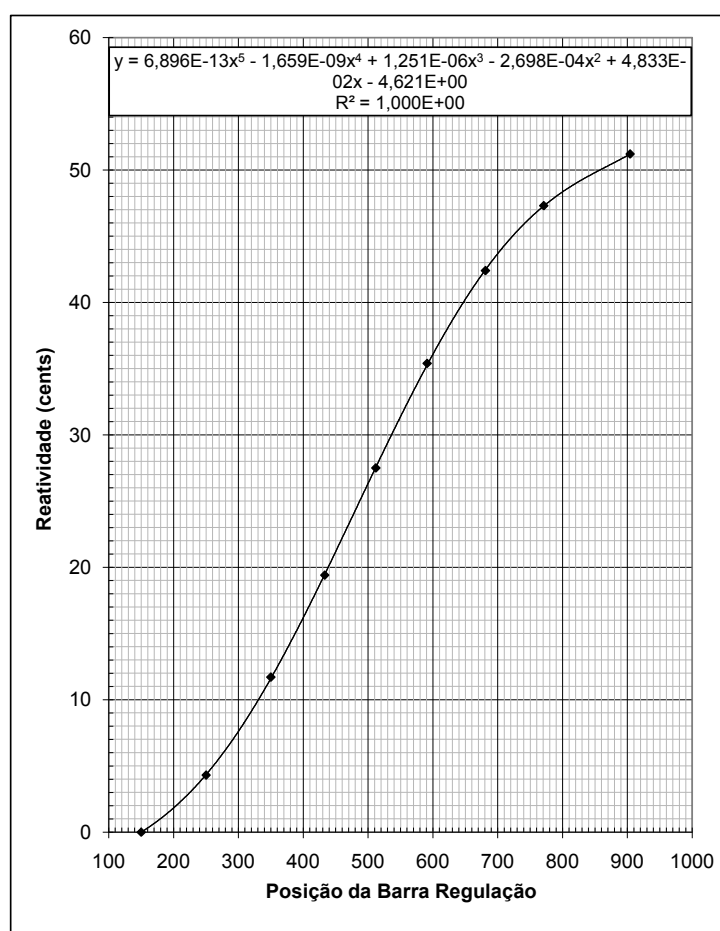


Figura 25 - Curva integral de reatividade da barra de Regulação, resultado da calibração realizada em outubro de 2023 (Prado Souza, 2023).

Certos procedimentos do reator IPR-R1 são regidos por Procedimentos Internos de Operação (PIO). No caso do procedimento para calibração das barras de controle, ele é regido pelo *PIO - URT 12*, que descreve o método da queda das barras e o método do período positivo. Entretanto o PIO estabelece que os valores totais das barras de controle considerados são os obtidos pelo método do período Positivo, pois os valores obtidos pela metodologia da queda das barras têm maior incerteza.

De acordo com o *PIO - URT 12*, o procedimento de calibração da barra

de regulação pelo método do período positivo:

1. Preenchimento da Lista de Verificações Diária (Início de Operação);
2. Colocar o reator crítico a potência de 2,5 W;
3. Inserir ao máximo a Barra de Regulação reajustando a Barra de Controle de modo a manter a potência estável em 2,5 W;
4. Extrair a Barra de Regulação de 100 unidades e medir o período correspondente à reatividade introduzida, a partir do tempo de dobramento, t_d ($T = 1,44 \cdot t_d$), usando um cronômetro, após 90 s para decaírem os transitórios;
5. Mantendo a Barra de Regulação fixa, inserir a Barra de Controle até reobter a potência de 2,5 W (potência estacionária);
6. Repetir os dois itens acima até a extração total da Barra de Regulação (fundo de escala do indicador de posição);
7. Após a realização de cada item, preencher a Folha de Dados com os dados correspondentes;
8. Desligar o reator.

A posição das barras são coletadas lendo o número no indicador de posição das barras. O tempo de dobramento é coletado através do uso de cronômetros manuais, várias medições do tempo de duplicação são realizadas por pessoas diferentes para obter um valor médio, de forma a reduzir as incertezas. O período é obtido através do tempo de dobramento, geralmente com o auxílio de uma calculadora. E a reatividade é obtida através da correspondência do período no gráfico *InHour* oficial do IPR-R1, visto na Figura 26.

Depois de gerado os pontos de forma manual, o gráfico final da curva integral de calibração é gerado com o auxílio de computador, como pode ser visto na Figura 25. É possível gerar também outro tipo curva, chamada diferencial de reatividade, que pode ser visto a título de exemplificação na Figura 27.

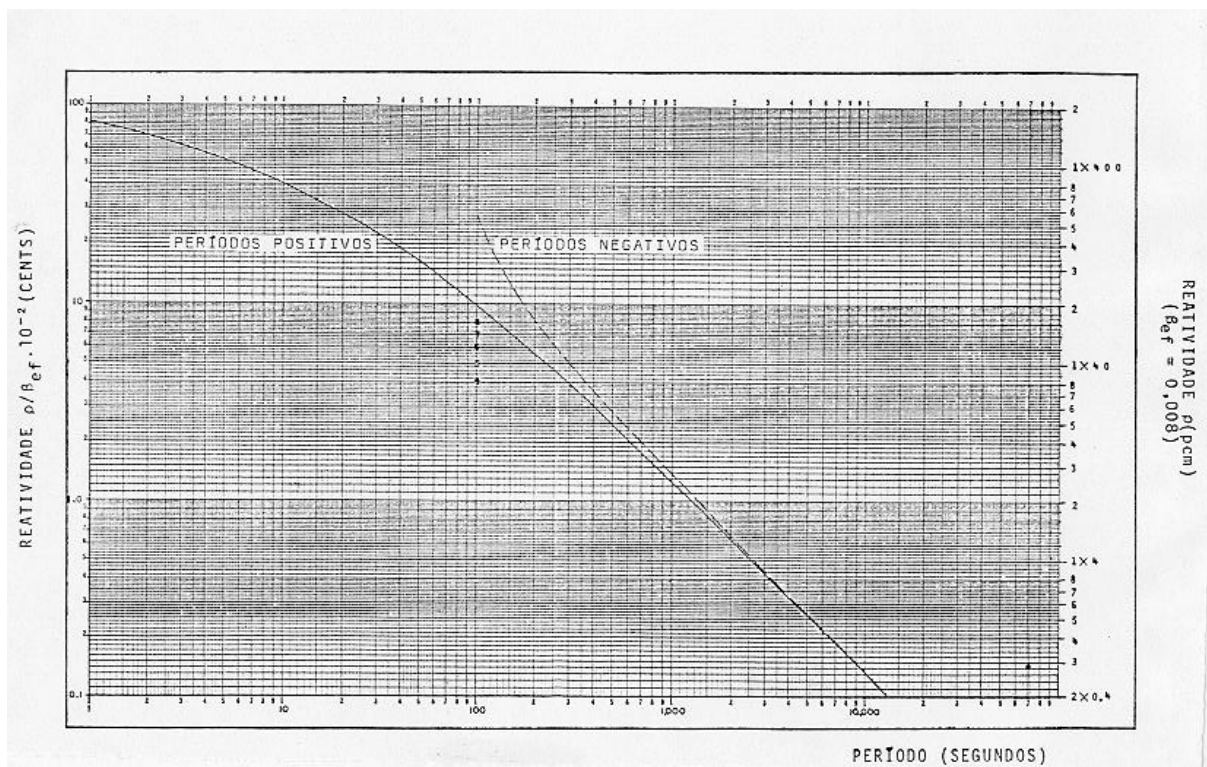


Figura 26 - Gráfico *InHour* oficial do IPR-R1 (Prado Souza, 2023).

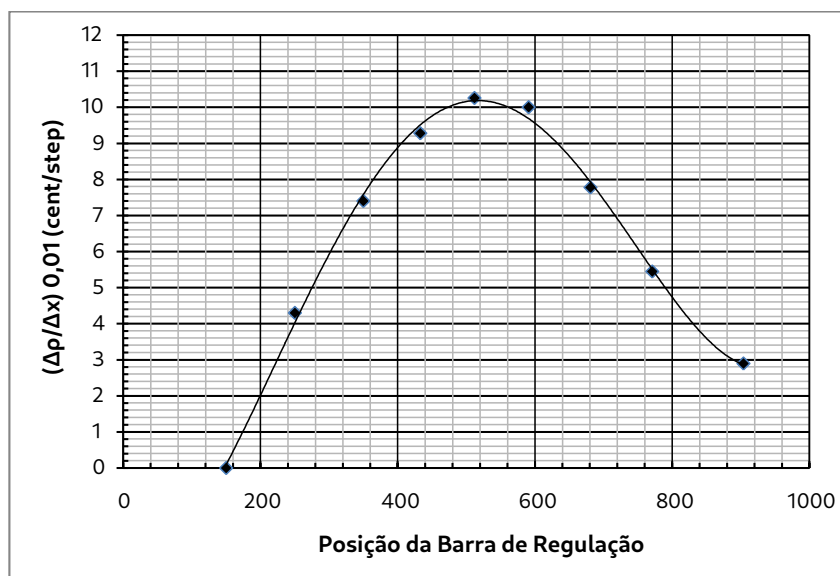


Figura 27 - Curva diferencial de reatividade da barra de Regulação, resultado da calibração realizada em outubro de 2023 (Prado Souza, 2023).

Estes, e outro testes neutrônicos, são previsto para serem realizados anualmente pelos operadores do IPR-R1. Por exemplo, obtenção do excesso de reatividade, obtenção da margem de desligamento, obtenção do coeficiente do efeito negativo de temperatura causado pela potência, entre ou-

tros. Todos estes testes neutrônicos dependem do resultado da calibração das barras de controle.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho tem como objetivo permitir vários usuários realizarem a coleta de dados simultaneamente em tempo real, com taxa de amostragem distintas. Para tal, o design do sistema segue o modelo cliente-servidor, onde o servidor é responsável por coletar os dados da instrumentação do reator e transmiti-los para os clientes por meio de uma Intranet. O sistema é elaborado prevendo ainda o acesso externo (via Internet), o que aumenta os requisitos de segurança.

Como a instrumentação do IPR-R1 é analógica, conforme descrito na Seção 2.2, foi instalado um Computador Lógico Programável (CLP), cuja principal função é a conversão analógica digital. O CLP é dotado de portas de comunicação, as quais podem ser usadas pelo servidor para obter os valores convertidos. A respeito do novo SMFN, como descrito na Seção 2.2.4 o mesmo possui uma saída de aquisição de dados digital que pode ser usada diretamente pelo servidor, sem a necessidade de ser conectado ao CLP.

Para desenvolver o sistema de aquisição de dados, é utilizada a filosofia *Unix*, descrita no Seção 2.3. Logo cada aplicação tem basicamente 1 função específica, se comunicam por meio de fluxo de texto (via rede), e são executadas via linha de comando, conforme descrito abaixo:

- **TrigaPLC**: Aplicação construída para o CLP, contendo as configurações de portas para a conversão analógico-digital, definição das variá-

veis e da comunicação via de rede;

- **TrigaServer**: Aplicação principal, que obtém dados dos dispositivos digitais (CLP, novo SMFN, e de outros que venham a ser instalados) e os re-transmite por meio de fluxos de texto via rede;
- **TrigaMirror**: Aplicação espelho, que tem a função de retransmitir o fluxo de texto do TrigaServer para os clientes, de forma que os clientes não acessem diretamente o servidor principal, evitando sobrecarga do mesmo e aumentando a segurança em caso de ataques;
- **TrigaLog**: Aplicação para armazenamento de dados, cuja função é salvar o fluxo de texto gerado pelo TrigaServer em um banco de dados;
- **TrigaLogServer**: Aplicação para envio de dados armazenados, cuja função é enviar via fluxo de texto os dados armazenados, conforme intervalo de tempo e taxa de amostragem solicitado pelo cliente.

Por outro lado, as aplicações clientes, tem o diferencial de interagirem com o usuário através de interface gráfica:

- **TrigaGet**: Aplicação simples, cuja função consiste em salvar o fluxo de texto oriundos do servidor em um computador pessoal, permitindo os clientes escolherem a taxa de amostragem e quais dados salvar;
- **TrigaViewer**: Aplicação mais avançada, que permite além de salvar o fluxo de texto, o interpretar para visualizar o dados em tempo real através de gráficos e tabelas.

Uma visão geral das conexões do sistema de aquisição de dados, clientes e da instrumentação do IPR-R1, pode ser vista na Figura 28. Mais detalhes a respeito de cada parte integrante são descritos nas subseções seguintes.

Como as aplicações descritas acima irão trabalhar com múltiplos clientes em simultâneo, o uso de múltiplas *threads* é um facilitador no desenvolvimento dos mesmo, onde cada *thread* pode ficar responsável por 1 único cliente, e o *kernel* do sistema operacional faz o gerenciamento automático do momento que cada *thread* é executada.

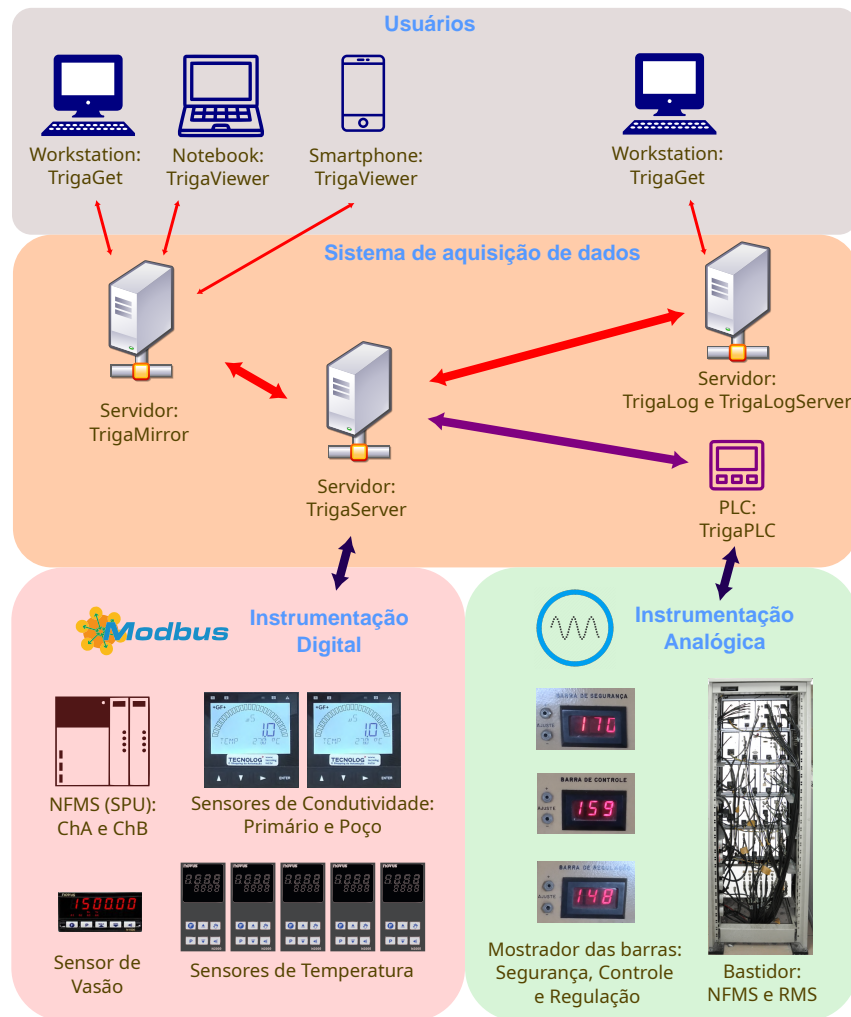


Figura 28 - Visão geral das aplicações e instrumentações.

O sistema operacional usado para o desenvolvimento dos servidores deste trabalho é o *GNU*, considerando que o suporte disponível na internet é maior em comparação aos derivados do BSD, conforme Seção 2.3. E considerando ainda que os códigos desenvolvidos neste trabalho são licenciados sob a licença *GNU* (GPLv3), protegendo a apropriação do mesmo por sistemas proprietários, assim, a licença das aplicações que compõe o sistema de aquisição fica totalmente compatível com o sistema operacional usado, podendo ser distribuídos juntos.

A linguagem de programação foi escolhida para os servidores foi C/C++, a mesma usada no sistema operacional, pois é uma linguagem compilada, de alta eficiência com uma ampla gama de bibliotecas livres disponíveis para serem reutilizadas. Como os dados serão passados via fluxo de texto, a escolha da linguagem dos servidores não impacta na escolha da linguagem

de desenvolvimento dos clientes.

3.1.1 Computador Lógico Programável

O Computador lógico programável usado neste trabalho foi financiado pelo mesmo projeto *FINEP* que adquiriu os novos canais neutrônicos. Seu modelo é *TM251MESE* da fabricante *Schneider Electric*. Sua alimentação é ligada na mesa de controle, logo, assim que a mesa é ligada automaticamente, e ele inicia a aquisição de dados. Ele possui 3 portas de comunicação *Ethernet* e 1 porta de comunicação serial *RS232/RS485*. Além disso, ele suporta expansão por módulos de entrada e saída, sendo até 7 módulos locais e 14 remotos.

Também foram adquiridos no projeto 5 módulos de entrada analógica e 1 módulo de entrada digital. O modelo de todos módulos analógicos é *TM3AI8*, o qual possui 8 entradas analógicas cada, com um conversor analógico digital de 12 bits que pode ser configurado para ler tensões de 0 a 10 V, de -10 a 10 V, ou ainda de correntes de 4 a 20 mA. Quanto ao módulo digital é do modelo *TM3DI16*, o qual possui 16 entradas digitais de 24 V. O módulo digital terá utilidades futuras, como aquisição da escala do canal linear e do canal de partida, mas ainda não foi implementado. Eles podem ser vistos no diagrama da Figura 29.

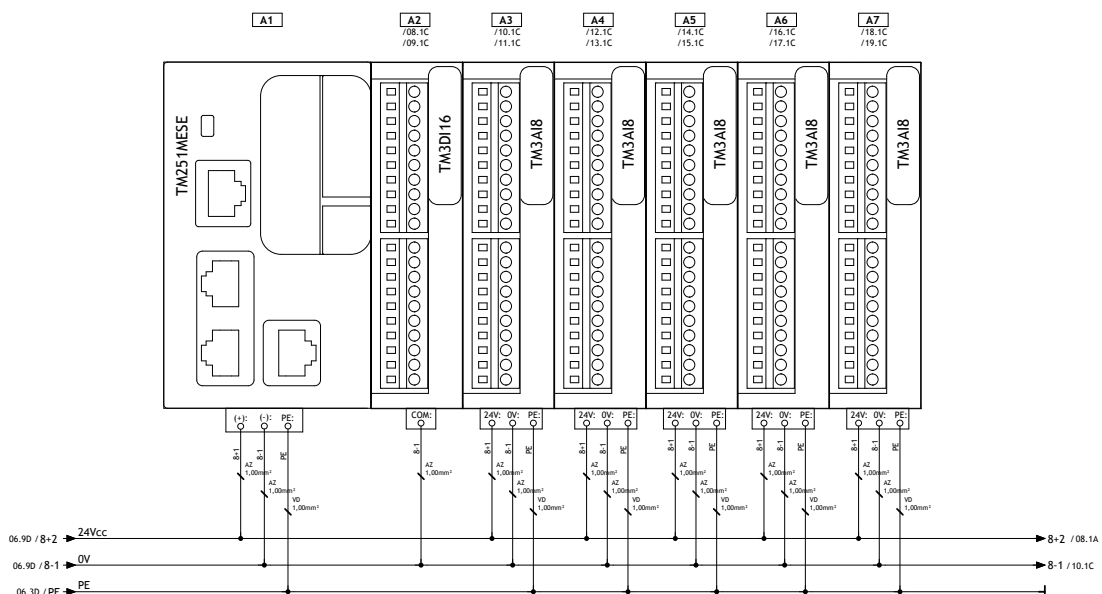


Figura 29 - Diagrama de posicionamento do PLC e seus módulos.

Não foi adquirido ou instalado nenhum módulo de saída no CLP, portanto o mesmo não tem capacidade física de controlar qualquer parâmetro do reator. Isso é importante para garantir a segurança da instalação, pois o sistema de aquisição de dados será conectado a intranet do CDTN, e possivelmente também na internet. Em ambos os casos não é possível interferir no funcionamento do reator em caso de, por exemplo, uma invasão ou *hacking* do sistema.

Para a conexão com os potenciômetros da barra de controle, foram adquiridos 4 isoladores galvânicos, sendo 1 para cada uma das 3 barras, e outro de reserva. Eles tem entrada de 0 a 10 V e saída de 4 a 20 mA, e são conectados nas 4 primeiras portas do módulo A0. O diagrama elétrico do módulo A0 pode ser visto na Figura 30, onde a Figura 30a é referente as 4 primeiras portas, e a Figura 30b referente as 4 restantes. O restante dos módulos analógicos segue uma estrutura similar a Figura 30b para todas as portas.

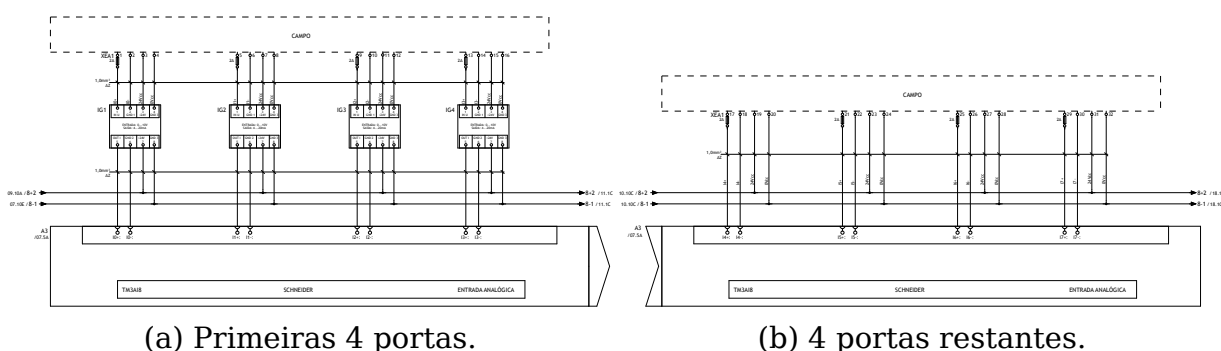


Figura 30 - Diagrama elétrico do Módulo A0.

A empresa *MAESTEC* foi contratada com recursos do projeto FINEP para realizar o projeto elétrico do CLP, montá-lo e instalá-lo dentro da mesa de controle. Mas as conexões do CLP com a instrumentação do reator foram realizadas neste trabalho. O CLP montado com seus módulos, conectados a instrumentação do IPR-R1, podem ser vistos na Figura 31.

As portas de entradas analógicas dos módulos do CLP são ligadas aos Bornes, que por sua vez são ligados por meio de cabos coaxiais com conectores *BNC*, as saídas de aquisição da instrumentação fabricada pelo IEN, vistas na Figura 5c. Tais saídas trabalham com uma faixa de tensão de 0



Figura 31 - CLP instalado na mesa de controle.
(Conectado ao SMFN, SMRA e aos potenciômetros das barras de controle).

a 10 V, com exceção do reativímetro do canal logarítmico, que trabalha de -10 a 10 V, conforme explicado em Seção 2.2. Na outra extremidade do cabo foi instalado conectores paralelos, para conectar nos Bornes do CLP. Foram confeccionados ao todo 15 cabos com essa configuração, os quais podem ser vistos na Figura 32, assim como suas conexões com o CLP na Figura 31. Os cabos são agrupados em trios e são identificados pelo número de presilhas. Na Figura 32a, a quantidade de presilhas contidas no círculo verde identifica o cabo, e a quantidade no círculo vermelho identifica o trio.



(a) BNC.



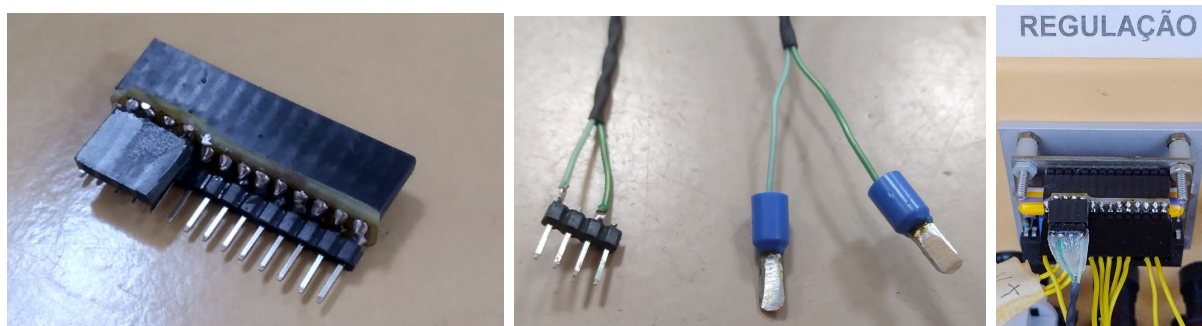
(b) Cabos.



(c) Paralelo.

Figura 32 - Cabos e conectores.

Além disso, algumas portas de entradas analógicas são ligadas também nos potenciômetros que medem as posições de cada uma das barras de controle. Os circuitos de instrumentação da posição de cada barra não possuem saída de aquisição de dados, entretanto são separados do circuito de controle de posição delas, portanto eles não fazem parte da cadeia de segurança conforme explicado em Seção 2.2. Para tal conexão, foi confeccionado um adaptador para o conector do circuito de instrumentação de cada uma das barras, que permite conectar a saída de sinal de cada um dos potenciômetros a uma porta diferente do módulo de entrada analógica do CLP. E também foi confeccionado 1 cabo para conectar os 3 adaptadores aos Bornes no PLC. O adaptador pode ser visto na Figura 33a, o cabo na Figura 33b, e na Figura 33c é mostrado o adaptador conectado a placa indicadora de posição da barra de regulação e também conectado ao cabo. O adaptador foi isolado eletricamente com esmalte, e o cabo com resina epóxi.



(a) Adaptador.

(b) Extremidades do cabo.

(c) Conexão.

Figura 33 - Conexão com sinal do potenciômetro da barra.

Como o potenciômetro é alimentado por tensões de 0 e 2,5 V, sua saída de sinal corresponderá a essa faixa de tensão. Tanto o isolador galvânico, quanto os módulos de entrada do PLC trabalham em uma faixa de tensão mínima de 0 a 10 V, o sinal do potenciômetro é capaz de ocupar no máximo 25 % da faixa de leitura do módulo de entrada analógica.

Por fim, uma das portas de entradas analógica foi conectada ao sensor de vazão, cuja saída é um valor de corrente entre 4 e 20 mA. Este sensor também não faz parte da cadeia de segurança do reator. Mas diferente dos outros dispositivos conectados ao CLP, que são sinais em valores de

tensão, o sinal deste é em valores de correte. Portanto é preciso as configurar individualmente as portas de cada módulo de entrada analógica para corresponder o tipo de sinal a ser lido, bem como a amplitude.

Para configurar os módulos e programar o CLP é preciso usar um programa fornecido pelo fabricante dedicado este fim. Neste trabalho foi utilizado o programa *SoMachine V4.3*, que apesar de ser proprietário e sua licença de uso ser comercializada, a fabricante disponibiliza gratuitamente uma versão com recursos limitados, os quais atenderam as necessidades deste trabalho. Por ele foi criado o TrigaPLC¹, que contém as configurações de cada uma das portas dos módulos de entrada, mapeamento de variáveis, configurações de rede e configurações de um servidor de comunicação através do protocolo Comunicação de Plataforma Aberta, do Inglês, Open Platform Communication (OPC)², um protocolo de comunicação industrial e em tempo real.

No TrigaPLC os módulos analógicos são nomeados de A0 a A4, de acordo com seu posicionamento no barramento, e o módulo digital como D0. As portas portas de entrada analógica são quase todas configuradas para ler um valor de tensão de 0 a 10 V, com exceção das portas conectadas ao reatímetro e ao sensor de vazão, pelos motivos explicados anteriormente. Além disso, as portas foram configuradas para realizar 100 aquisições por 100 ms e calcular o valor médio, implementando assim um filtro de média, o que atenua ruídos e diminui incertezas na medição. Apesar do sensor ser de apenas 10 bits, com o filtro ativado é possível obter valores na precisão máxima do tipo de variável que o CLP trabalha com filtro, que é do tipo inteiro sem sinal de 13 bits. Logo, quase toda a instrumentação analógica do IPR-R1 será convertida digitalmente com essa precisão, exceto pela posição das barras de controle. Conforme explicado anteriormente, o sinal do potenciômetro corresponde no máximo a 25% da faixa de tensão de entrada que o módulo trabalha, portanto a precisão máxima de leitura será 25% da precisão máxima alcançável quando se usa a faixa de tensão completa. Na prática, a precisão varia de acordo com a faixa de operação

¹ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/TrigaPLC

² Site da fundação que padroniza o protocolo: opcfoundation.org

do potenciômetro, pois como a variação da posição da barra de controle do seu ponto máximo ao mínimo não proporciona uma excursão completa do potenciômetro, a precisão de fato é menor ainda.

A relação de conexões entre cada porta de entrada e dispositivos de instrumentação, bem como o nome das variáveis definidas no TrigaPLC para armazenar os valores lidos por cada porta, pode ser vista na Tabela 3. Todas essas variáveis são do tipo inteiro, armazenando valores entre 0 e 8191, sendo que cada valor naquele instante corresponde linearmente a intervalo de tensão configurado, ou corrente, de acordo como explicado anteriormente. Para as barras controle o valor máximo teórico seria 2048, devido aos motivos citados anteriormente.

Varável	Módulo	Porta	Conexão com instrumentação do reator
inBarraReg	A0	4	Barra de Regulação
inBarraCon		5	Barra de Controle
inBarraSeg		6	Barra de Segurança
inCLin		7	Canal Linear
inCPer	A1	0	Canal Percentual
inCLogARea		1	Canal Logarítimo - Aquisição Reativímetro
inCLogALin		2	Canal Logarítico - Aquisição Linear
inCLogALog		3	Canal Logarítico - Aquisição Logarítima
inCLogAPer		4	Canal Logarítimo - Aquisição Período
inCParALin		5	Canal Partida - Aquisição Linear
inCParALog		6	Canal Partida - Aquisição Log
inCParAPer	7	Canal Partida - Aquisição Período	
inSRadAre	A2	0	Sensor Radiação Área
inSRadEntPri		1	Sensor Radiação Entrada Primário
inSRadPoc		2	Sensor Radiação Poço
inSRadRes		3	Sensor Radiação Resinas
inSRadSaiSec		4	Sensor Radiação Saída Secundário
inSRadAer		5	Sensor Radiação Aerossois
inVasPri	A4	0	Sensor Vazão Sistema Primário

Tabela 3 - Relação das conexões no PLC e nome das variáveis.

O CLP dispõe nativamente de dois tipos de interfaces de comunicação que podem ser usado para aquisição de dados por dispositivos externos: Ethernet e Comunicação Serial. Ambos suportam uma diversidade de protocolos de comunicação. Neste trabalho, foi escolhido a interface Ethernet

para aquisição de dados, pois a mesma não exigirá um adaptador externo para comunicação com o servidor de aquisição de dados, possui menos limitação de distância, velocidade, entre outros. Foi escolhido ainda usar o protocolo OPC, que é compatível com este modelo de CLP e amplamente usando na indústria. Para tal, foi configurado um Servidor OPC no TrigaPLC com acesso de leitura a todas variáveis de entrada definidas na Tabela 3. O próprio servidor OPC define automaticamente o `nodeId` correspondente as variáveis conforme seu nome e seu endereço na memória do CLP.

3.1.2 Servidor de Aquisição

O `TrigaServer`³ é o único servidor que tem a capacidade de se comunicar com os dispositivos de instrumentação do reator, portanto seu desenvolvimento leva em conta os protocolos de comunicação específicos de cada dispositivo. Para tal, foi estabelecido que o desenvolvimento da aplicação seria dividido em bibliotecas, onde cada uma delas conteria os algoritmos específicos para gerir a comunicação e aquisição de dados de cada um dos dispositivos:

- **`libOpcTrigaPLC`**⁴: biblioteca para comunicação com o TrigaPLC através do protocolo OPC via Ethernet;
- **`libModbusSystematomSPU`**⁵: biblioteca para comunicação com cada canal da SPU (novo SMFN) da empresa Systematom, através do protocolo Modbus-RTU.

Estava previsto o desenvolvimento da biblioteca `libModbusNovus2000`, dado que seria executada a substituição dos transmissores de temperatura da mesa de controle pelo modelo N2000 da empresa Novus, que possui saída para aquisição de dados de forma digital através do protocolo Modbus-RTU, o mesmo usado pela SPU. Entretanto, a substituição não foi aprovada pelo comitê de segurança até a data de publicação deste trabalho, portando a mesma não foi desenvolvida.

³ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/TrigaServer

⁴ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/libOpcTrigaPLC

⁵ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/libModbusSystematomSPU

As bibliotecas coletam as informações simultaneamente de cada respectiva I&C do reator, e salva temporariamente na memória do computador. Estes dados podem ser convertidos para o formato CSV ou JSON para serem enviados ao cliente via rede TCP/IP, ou ainda serem enviados diretamente da memória (formato RAW).

Os detalhes de implementação do TrigaServer podem ser encontrados na Seção B.1 do Apêndice B, bem como quais dados e de que tipo podem ser obtidos através dele.

Os parâmetros de linha de comando para utilizar o TrigaServer estão descritos na Seção A.1 do Apêndice A.

3.1.3 Servidor Espelho

O TrigaMirror⁶ é um servidor que atua como espelho do TrigaServer, ou seja, ele recebe a transmissão de dados em tempo real do TrigaServer e espelha ela para os demais clientes. Como cada cliente pode solicitar uma taxa de amostragem diferente, o TrigaMirror solicita a transmissão na taxa de amostragem máxima que o TrigaServer está configurado para entregar, e retransmite para os clientes de acordo com a taxa solicitada.

O acesso direto ao TrigaServer por parte dos usuários pode ser limitado, os permitindo apenas a conexão com os TrigaMirror(s). Caso algum TrigaMirror seja atacado, esse ataque não interferirá em nada no funcionamento do TrigaServer. Portanto, conexões importantes e que não podem ser interrompidas, como o TrigaLog, se feitas diretamente com TrigaServer não serão afetadas. Desta forma, mesmo em caso de um suposto ataque, o sistema continuaria realizando a aquisição de dados e salvando o histórico de operação do reator.

Desta maneira, o TrigaMirror pode ser exposto a internet para acesso externo ao CDTN, por exemplo, por funcionários da própria instituição trabalhando de forma remota, para pesquisadores de outras instituições de ensino e pesquisa, entre outros, sem comprometer a segurança e funcionamento do sistema como um todo. É possível executar mais de um Tri-

⁶ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/TrigaMirror

gaMirror ao mesmo tempo, separando os usuários internos (via Intranet) e externos (via Internet) em servidores diferentes. Ou ainda conectar um TrigaMirror a outro, permitindo expandir o número máximo de usuários. A autorização para acesso externo ao CDTN do sistema de aquisição de dados ainda está em discussão pelo setor responsável do reator IPR-R1 e a administração do CDTN.

Os detalhes de implementação do TrigaServer podem ser encontrados na Seção B.2 do Apêndice B.

Os parâmetros de linha de comando para utilizar o TrigaMirror estão descritos na Seção A.2 do Apêndice A.

3.1.4 Servidor de Armazenamento de Dados

O TrigaLog será uma aplicação cliente do TrigaServer, em que irá receber os dados transmitidos em tempo real para armazenar todo o histórico de operação do reator para posterior consulta. Seu funcionamento será basicamente interpretar o fluxo de texto transmitido em tempo real e salvar os valores em um banco de dados.

Para permitir a consulta do banco de dados é previsto um servidor chamado TrigaLogServer, que recebe do cliente a requisição contendo o intervalo de tempo em que se quer obter os dados, e então envia para o cliente os dados no formato de fluxo de texto, análogo ao TrigaServer. A diferença do TrigaLogServer para o TrigaServer é que o primeiro transmite os dados gravados e o segundo transmite os dados em tempo real.

O desenvolvimento do TrigaLog e TrigaLogServer também são previstos para complementar o sistema de aquisição de dados, mas não serão desenvolvidos neste trabalho pelos mesmos motivos citados na subseção anterior.

3.1.5 Aplicações Clientes

O TrigaServer e TrigaMirror permitem que qualquer aplicação desenvolvida por um usuário se conecte e receba o fluxo de informação, desde que tenha capacidade de se conectar via TCP/IP e enviar a taxa de amostragem

ao iniciar a conexão. Um exemplo de programa do próprio *GNU/Linux* capaz de realizar a conexão e receber os dados (não criptografados) é o *GNU NetCat*⁷. O executando pelo terminal é possível informar o IP em que se localiza o TrigaServer ou TrigaMirror, e a porta em que se deseja conectar. Posteriormente a conexão bem sucedida, é possível digitar e enviar a taxa de amostragem desejada, passando a exibir os dados recebidos no terminal em tempo real, ou ainda pode-se redirecionar a saída para um arquivo, de forma a armazenar os dados no computador. Para isso, o usuário precisa dominar o mínimo de habilidade para manipular o terminal de computador.

Para o usuário não precisar desenvolver sua própria aplicação nem precisar usar o terminal, foi concebido o TrigaGet⁸, permitir os usuários salvar os dados recebidos em seus computadores usando uma interface gráfica, escolher receber dados de forma criptografada e descriptografar automaticamente antes de salvar, e ainda filtrarem os dados recebidos, ou seja, permitir os usuários escolherem a informação de quais sensores salvar. A linguagem escolhida para o desenvolvimento foi Python para maior compatibilidade entre sistemas operacionais de computadores pessoais, como Windows, MacOS, GNU e BSD's, o qual o Python é capaz de abstrair as chamadas de sistema de forma que um único código possa ser executado em qualquer um desses sistemas citados.



Figura 34 - Interface gráfica do TrigaGet.

⁷ Site oficial: <https://netcat.sourceforge.net> netcat.sourceforge.net

⁸ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/TrigaGet

Para usar o TrigaGet o usuário precisa especificar o endereço do TrigaServer ou TrigaMirror (IP e porta), a taxa de amostragem que deseja obter os dados (em milissegundos), e se quer que os dados sejam enviados de forma criptografada ou não. Filtrar os dados é opcional, caso desejado, o TrigaGet realiza uma conexão com o TrigaMirror para receber o cabeçalho CSV, assim conhecendo o nome de todas as variáveis, e exibindo-as na interface gráfica para o usuário selecionar quais variáveis salvar ou não. Além disso, o usuário deve definir o nome do arquivo a ser salvo.

O arquivo salvo no computador contem o mesmo formato do fluxo de textos recebido. Inicialmente foi desenvolvido apenas a capacidade de filtrar dados no formato CSV, que é o formato que será usado na calibração de barras. Este formato pode ser importado por diferentes aplicações úteis as quais os pesquisadores desejem trabalhar, como aplicações de planilhas, de computação científica como MATLAB/Octave/SciLab, ou até mesmo o próprio Python através de bibliotecas designadas para tal.

É planejado o desenvolvimento do *TrigaViewer* para complementar o sistema de aquisição de dados, que irá além de permitir salvar os dados, e visualizar em tempo real através de gráficos, tabelas e mostradores similares aos da mesa de controle. Entretanto, não será desenvolvido neste trabalho, pois o escopo do mesmo é obter os dados em tempo real durante realização do experimento de calibração das barras de controle, e o TrigaGet cumpre essa função.

3.1.5.1 Descriptografia

Caso o usuário selecione que deseja receber os dados de forma criptografada, é necessário que o arquivo de chave pública correto esteja no mesmo diretório que o TrigaGet. Tal arquivo está disponível no repositório do TrigaGet no GitHub.

O funcionamento do TrigaGet com descriptografia é basicamente o mesmo, com a diferença que a cada 256 bytes recebidos, ele executa o algoritmo de descriptografia da biblioteca OpenSSL para obter a mensagem original. Caso hipoteticamente a mensagem seja alterada durante o tráfego da inter-

net, o algoritmo de descritografia irá falhar, interrompendo o funcionamento do programa. Para um programa gerar um pacote criptografado que seja descritografável pela chave pública distribuída juntamente com o TrigaGet, é necessário uma chave privada compatível, que só o servidor com o TrigaMirror detém, garantindo a integridade da informação recebida.

3.2 Automação da calibração de barras

Para realizar a calibração de barras com uma incerteza menor, é proposto usar o sistema de aquisição de dados computacional desenvolvido. Com este sistema é possível obter os sinais da posição das barras em função do tempo ($r(t)$), bem como a potência em função do tempo ($P(t)$). Com o sinal temporal da barra é possível calcular a variação da mesma (Δr), e com o sinal da potência é possível calcular o período estável (T), conforme descrito na Seção 2.4. Entretanto será proposta nessa metodologia uma outra maneira de calcular o período estável a partir da potência.

Além disso, é proposto processar os dados coletados e realizar todos os cálculos automaticamente, via *script* computacional. Entretanto, como o reator não dispõe de um sistema de controle automático das barras, o operador continua responsável por conduzir o procedimento.

3.2.1 Procedimento proposto para execução do experimento

No procedimento atual o operador deve criticalizar o reator antes do início da extração de barras, conforme descrito na Seção 2.4. Caso em alguns dos testes o operador coloque o reator próximo da criticidade, mas não exatamente crítico, isso irá resultar em um erro no cálculo de $\Delta\rho$, o que aumenta a incerteza dos resultados. Isso se deve ao fato de que a metodologia atual considera a reatividade inicial como 0, mas na situação descrita essa consideração não estaria sendo atendida. Portanto é proposto medir a reatividade também antes da extração da barra.

É proposto também que a extração da barra possa ser realizada com o reator em uma reatividade diferente de 0, dado que medir a reatividade de

um reator próximo da criticalidade leva muito tempo para ter uma medida confiável. Essa alteração no procedimento permite que sejam executadas consecutivas extrações de barra, onde a posição e período finais de uma extração, são usados como iniciais da próxima extração. Isso permite reduzir o tempo total do procedimento.

A limitação para as consecutivas extrações na barra calibrada, antes de atingir a extração total, são: A potência atingir um valor em que ocorre alteração na reatividade devido ao efeito de temperatura; A potência atingir um valor próximo dos limites de segurança (entretanto pode ser considerado para o reator IPR-R1, pois ele é muito acima da potência que não causa efeito de temperatura); e o período positivo atingir valores próximos aos limites de segurança. Quando algum dos limites forem atingidos, é necessário pausar o experimento, mantendo a barra de calibração imóvel e usando outra barra para controlar a reatividade do reator, assim, permitindo continuar o experimento da exata mesma posição de quando ele foi pausado.

Uma decorrência da reatividade ser também medida antes da extração, apesar deste procedimento ser baseado no método do período positivo, é possível iniciar o experimento a partir de um período negativo. Dado o limite de reatividade que o reator pode atingir (período positivo mínimo de segurança), começar o experimento com um valor negativo de reatividade possibilita maior inserção de reatividade, ou seja, passos maiores ou uma quantidade maior de passos. Mas é importante considerar que o maior período estável **negativo** possível de se obter em um reator nuclear é -80 s , a qual ele converge assintoticamente (Duderstadt; Hamilton, 1976). Portanto, é recomendado evitar períodos negativos próximos deste valor, a fim de evitar incertezas no processo de conversão de período para reatividade inerentes a essa zona.

A aquisição de dados deve estar sendo realizada desde antes de iniciar a extração, para que seja permitido calcular a reatividade inicial do teste. Ela também deve permanecer ativa durante a extração da barra, para que seja possível medir a variação da mesma. E ainda deve permanecer ativa,

mesmo com um período não estável, para que seja possível calcular o tempo que se decorreu desde a extração, assim realizando o calculo do período só após o tempo pré-determinado para acomodação dos nêutrons atrasados. Ela só deve ser interrompida, caso o limite de extração seja atingido, onde será necessário abaixar a potência.

Assim, o procedimento proposto para a calibração automática de uma das barras se torna:

1. Colocar a barra ser calibrada na posição “inferior”;
2. Colocar o reator em baixa potência sem alterar a posição da barra a ser calibrada;
3. Iniciar a aquisição de dados;
4. Esperar o tempo necessário para acomodação de nêutrons atrasados (t_a) somado com o tempo determinado para medição do período (t_T);
5. Extrair a barra em uma quantidade (Δr) que não supere os limites de segurança para período;
6. Esperar o tempo necessário para acomodação de nêutrons atrasados (t_a) somado com o tempo determinado para medição do período (t_T);
7. Verificar o valor da potência, período e posição da barra em calibração.

Caso:

- a barra tenha atingido a posição “superior”, finalizar a aquisição de dados e o experimento;
- a potência esteja próxima de um valor que gere efeito de temperatura, finalizar a aquisição de dados retornar ao passo 2;
- o período está próximo do limite de segurança, finalizar a aquisição de dados, abaixar a reatividade usando outra barra e retornar ao passo 3; ou
- o operador deseje realizar apenas 1 extração por aquisição, finalizar a aquisição de dados retornar ao passo 2.

O operador é o responsável por conduzir o experimento, definindo a quantidade de extração por aquisição (podendo ser inclusive 1 única extração por aquisição, análogo ao procedimento atual) e a quantidade que a barra será extraída a cada passo. É considerado que o operador não movimentará a barra em calibração durante a aquisição de dados desligada, a qual ocorre o processo de ajuste de reatividade e potência. Assim, as aquisições realizadas se complementam, permitindo processar os dados posteriormente ao experimento, a fim de realizar a calibração de forma computacional e automatizada.

3.2.1.1 Diferenças em relação ao procedimento atual

O procedimento atual utiliza o método do tempo de dobramento para calcular o período, ou seja, é necessário no mínimo esperar a potência dobrar (caso seja realiza apenas uma medição), enquanto no procedimento proposto é calculado posteriormente usado os dados obtidos pelo o sistema de aquisição de dados por um método que requer menor tempo de medição.

O procedimento atual especifica que o reator deve ser colocando em uma potência constante de 2,5 W antes de cada movimento de extração de barra, enquanto o proposto:

- Não especifica o valor de potência antes das extrações;
- Não determina que a potência antes das extrações deva ser estacionária; e
- Permite sucessivas extrações sem movimentar a barra de controle.

Além disso, o procedimento atual especifica uma extração fixa de 100 unidades para cada extração, enquanto o proposto:

- Não especifica valores para as extrações; e
- Não determina que as extrações devam acontecer em algum valor fixo.

Desta maneira, o procedimento atual permite que a experiência seja realizada em um tempo menor em reação ao procedimento atual, pois:

- Não necessita criticalizar o reator antes de cada extração de barra;
- Não necessita de ajustar a posição de outra barra após cada extração da barra que está sendo calibrada; e
- Não necessita esperar que a potência dobre para medir o período.

Apesar das diferenças, o procedimento proposto é compatível com o anterior, ou seja, permite que o operador criticalize o reator a cada extração de barra em calibração usando outra barra, mas as custas de aumentar o tempo determinado para medição do período (t_T) para que se possa obter uma medida confiável. Permite também que o operador realize as extrações (Δr) em valores fixos, mas as custas de: ou coletar menos pontos nas regiões da curva de calibração onde ela é mais acentuada; ou se coletar mais pontos nessas regiões, coletar também em todo restante da curva, o que aumenta o tempo de execução do procedimento.

3.2.2 Desenvolvimento de uma equação *InHour*

A curva *InHour* é fundamental no procedimento de calibração de barra, permitindo converter período em reatividade, para aquele reator em específico. Como os cálculos são feitos computacionalmente de acordo metodologia proposta neste trabalho, faz-se necessário usar a equação *InHour* do reator IPR-R1. Infelizmente, o CDTN não fornece uma equação *InHour* oficial para o IPR-R1, apenas um gráfico para sua curva *InHour* (Figura 26). O CDTN também não ofereceu detalhes da origem do gráfico, sendo provavelmente o mesmo fornecido inicialmente pelo fabricante, ou seja, considerando o combustível fresco.

Como a curva *InHour* depende principalmente do nuclídeo que está sendo fissionado (no caso do TRIGA com combustível fresco, é o U-235), e considerando que conforme o combustível é queimado são produzidos outros nuclídeos físseis (transmutação do U-238 gerando Pu-239 e Pu-241), a curva *InHour* oficial fornecida deve divergir da curva *InHour* real para a atual composição. É importante obter uma equação *InHour* que represente a composição atual do IPR-R1, o que permitiria obter resultados mais pre-

cisos, não só nos cálculos de calibração das barras de controle, mas em vários outros cálculos ligados a física de reatores. Entretanto, curvas de calibração geradas por diferentes curvas *InHour* podem divergir uma das outras, o que dificultaria a comparação dos resultados gerados pela metodologia proposta com os resultados anteriormente gerados com uso da metodologia atual (Turso, 2018).

A fim de gerar resultado comparáveis com os resultados de anos anteriores e realizar os cálculos de forma computacional, é necessário gerar uma equação *InHour* que corresponda ao gráfico *InHour* oficial do reator IPR-R1. Como uma equação *InHour* tem uma quantidade grande de parâmetros (por exemplo, são 13 parâmetros para 6 grupos de nêutrons atrasados), uma regressão numérica produzirá resultados com incerteza alta. A estratégia usada neste trabalho é ajustar uma equação *InHour* de um reator do tipo TRIGA para corresponder ao gráfico do IPR-R1.

De acordo com Matthias Baron Helmuth Böck e O'Kelly (2005), os coeficientes da equação *InHour* com 6 grupos de nêutrons atrasados para um reator TRIGA genérico de combustível fresco, são

$$\begin{aligned} l &= 0,000073; \lambda_1 = 0,01243982736; \lambda_2 = 0,03050823858; \\ \lambda_3 &= 0,1114384535; \lambda_4 = 0,3013683394; \lambda_5 = 1,136306853; \\ \lambda_6 &= 3,013683394; \beta_1 = 0,00021; \beta_2 = 0,00141; \beta_3 = 0,00127; \\ \beta_4 &= 0,00255; \beta_5 = 0,00074; \beta_6 = 0,00027; \beta_{eff} = 0,007. \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde a equação é dada por

$$\rho(T) = \frac{l}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T}. \quad (3.2)$$

A curva produzida por esta equação, com estes coeficientes fornecidos pela IAEA, é plotada na Figura 35. Vários pontos foram coletados do gráfico oficial *InHour* do IPR-R1 (de forma manual, mas com auxílio de um programa de edição de imagens a fim a melhorar precisão da coleta) e ela foi reproduzida na Figura 35. Após ajustes eurísticos, foi encontrado que 25% na equação *InHour* com os coeficientes fornecidos pela IAEA é suficiente para gerar uma curva semelhante à curva oficial do IPR-R1, o que também pode ser visto na Figura 35.

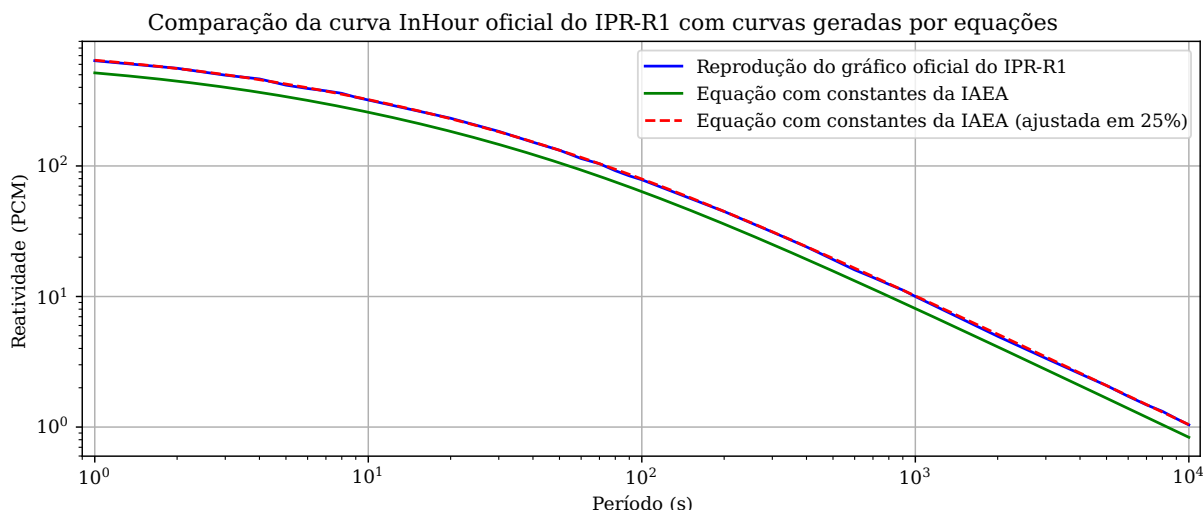


Figura 35 - Comparação da curva *InHour* do IPR-R1 (reprodução do gráfico oficial) com a equação *InHour* da IAEA sem ajuste e com ajuste.

A equação *InHour* ajustada pode então ser usada nos cálculos computacionais deste trabalho, gerando resultados comparáveis aos anos anteriores.

A mesma é dada por

$$\rho(T) = 1,25 \cdot \left(\frac{0,000073}{T} + \frac{0,00021}{1 + 0,0124 \cdot T} + \frac{0,00141}{1 + 0,0305 \cdot T} + \frac{0,00127}{1 + 0,1114 \cdot T} + \frac{0,00255}{1 + 0,3014 \cdot T} + \frac{0,00074}{1 + 1,1363 \cdot T} + \frac{0,00027}{1 + 3,0137 \cdot T} \right), \quad (3.3)$$

aonde os coeficientes referentes a λ_i são arredondados apenas para poupar espaço neste texto.

3.2.3 Processamento de dados

Foi criado um *script* em Python, chamado *TrigaClib*⁹, que realiza a calibração de forma automática a partir das aquisições realizadas durante o procedimento. Os parâmetros de linha de comando para utilizá-lo estão descritos na Seção A.3 do Apêndice A. Ele é capaz de importar os arquivos de aquisição no formato CSV e processar os dados gerando um relatório em PDF com os resultados da calibração.

Para tal, a cada passo dado pelo operador (extração da barra em calibração) contido na aquisição, é preciso: separar os sinais temporais em janelas de tempo; calcular a variação da barra; calcular a variação da reatividade;

⁹ Código fonte disponível em: github.com/TRIGA-IPR-R1/TrigaCalib

e gerar o relatório parcial, contendo os gráficos com as respectivas janelas, e uma tabela com os valores encontrados. Depois é preciso gerar o gráfico integral da calibração, contendo os pontos encontrados e uma regressão polinomial dos mesmos. Por fim, o gráfico integral e todos relatórios parciais são unidos em um único PDF, gerando o relatório final de calibração.

3.2.3.1 Separação de Janelas de Tempo

De acordo com o procedimento descrito na Seção 3.2.1, cada aquisição de dados realizada contem os sinais temporais antes e depois da extração da barra a ser calibrada, podendo ter mais de uma extração na mesma aquisição. Nem todos os dados podem ou precisam ser usados para os cálculos a serem realizados. Assim, faz-se necessário separar os sinais temporais em janelas de tempo, onde é preciso definir quais janelar usar os dados para os cálculos, e quais não. Para isso, são definidos os tempos $t_{[N]}$:

- t_0 : Início da coleta de dados (0 s);
- t_1 : $t_0 + t_a$;
- t_2 : Início do movimento de extração da barra;
- t_3 : Fim do movimento de extração da barra;
- t_4 : $t_3 + t_a$;
- t_5 : Início de outro movimento de extração da barra;
- E assim por diante.

O tempo t_a representa o “tempo de acomodação” e indica o tempo necessário para que a dinâmica dos nêutrons atrasados crie um período estável após uma mudança de reatividade. De acordo com a metodologia anterior, foi determinado como 90 s (Prado Souza, 2023).

Os tempos t_2 e t_3 podem ser determinados através da derivada da posição da barra ($\dot{r}(t)$). O tempo t_2 pode ser definido quando o valor da derivada ultrapassa um limiar predeterminado, e t_3 quando ele retorna abaixo desse limiar.

Assim, o sinal temporal da posição da barra e da potência do reator podem ser separados em janelas de tempo baseadas nos tempos $t_{[N]}$, conforme definidas abaixo.

- Janela 1 (t_0 a t_1): Tempo inicial para acomodação de nêutrons atrasados.
- Janela 2 (t_1 a t_2): Período inicial estável.
- Janela 3 (t_2 a t_3): Movimento de extração da barra de controle (mudança na reatividade).
- Janela 4 (t_3 a t_4): Novo tempo para acomodação de nêutrons atrasados.
- Janela 5 (t_4 a t_5): Novo período estável.

As janelas 4 e 5 torna-se as janelas 1 e 2 do próximo passo de extração, considerando uma mesma aquisição. Logo, cada passo possui suas respectivas janelas, numeradas de 1 a 5 conforme definido acima.

Os dados contidos nas janelas definidas como 2 e 5, contém a informação da posição da barra de controle e a referente evolução temporal da potência (a qual pode ser usada para calcular o período estável). Como a metodologia requer uso de apenas períodos estáveis para os cálculos de calibração, os dados contidos nas janelas 1, 3 e 4, de cada passo, podem ser descartados.

3.2.3.2 Cálculo da variação da posição da barra

O sinal temporal da posição da barra na janela 2 é definido como $r_2(t)$. Ele é constante em função do tempo por definição (do procedimento realizado e da própria janela de tempo), e representa a posição da barra antes da extração. Igualmente, o mesmo sinal para a janela 5 é definido como $r_5(t)$, apresentando a mesma propriedade, e representa a posição da barra depois da extração.

Apesar da barra permanecer imóvel durante o procedimento, pode aparecer no sinal algum ruído inerente ao processo de medição e aquisição, podendo ter como origem vibrações, induções eletromagnéticas, entre outros. As posições da barra antes de depois da extração (r_2 e r_5), podem

ser calculadas a partir do valor médio dos respectivos sinais ($r_2(t)$ e $r_5(t)$), reduzindo assim incerteza induzida por qualquer ruído de média nula.

Por fim, a variação na posição da barra (Δr) correspondente ao respectivo passo é dada por

$$\Delta r = r_5 - r_2. \quad (3.4)$$

3.2.3.3 Cálculo da variação de reatividade

O sinal temporal da potência contido na janela 2 é definido como $P_2(t)$, e tem o formato de uma curva exponencial por definição (reatividade diferente de 0 com período estável). Igualmente, o mesmo sinal para a janelas 5 é definido como $P_5(t)$, apresentando a mesma propriedade.

Para calcular o período a partir da evolução temporal da potência, poderia ser usado o tempo de duplicação em cada sinal de potência ($P_2(t)$ e $P_5(t)$), o mesmo método usado na metodologia atual. No entanto, isso consideraria apenas dois pontos para o cálculo em um sinal que também pode ter ruído e outras incertezas de medição. Além disso, quanto menor a reatividade, maior será o tempo de espera após o período estável, pois será necessário esperar que a potência se duplique, o que levará mais tempo para acontecer (Merljak; Trkov; Lengar, 2014).

Portanto, para aumentar o número de pontos utilizados no cálculo do período, a fim de reduzir a incerteza e diminuir o tempo necessário para realizar o teste, aplica-se regressão exponencial nos sinais de potência na forma

$$f(x) = a \cdot e^{bx}. \quad (3.5)$$

De acordo com Duderstadt e Hamilton (1976), a evolução temporal da população de nêutrons ($N(t)$) é dada por

$$N(t) = N_0 \cdot e^{\frac{k-1}{l}t}, \quad (3.6)$$

e o período (T) é definido como

$$T = \frac{l}{k-1}, \quad (3.7)$$

onde l é o tempo de vida do nêutron, k é o fator de multiplicação, N é a população atual de nêutrons, N_0 é a população inicial de nêutrons, e t é o tempo.

Fazendo $x = t$ e $f(x) = N(t)$, temos

$$a \cdot e^{bt} = N_0 \cdot e^{\frac{t}{T}}, \quad (3.8)$$

o que implica que

$$N_0 = a; \quad T = \frac{1}{b}, \quad (3.9)$$

portanto o período é determinado através do inverso valor encontrado como expoente na regressão exponencial. O valor de a (N_0) encontrado não é útil nos cálculos, portanto pode ser descartado.

Assim, os valores dos expoentes encontrados nas janelas 2 e 5 (b_2 e b_5) são usados para encontrar os respectivos períodos estáveis de cada janela (T_2 e T_5). Tais valores de período são aplicados na equação *InHour* (com os coeficientes e ajuste definidos em Seção 3.2.2), gerando os respectivos valores de reatividade correspondente a cada janela (ρ_2 e ρ_5).

Por fim, a variação na reatividade ($\Delta\rho$) correspondente ao respectivo passo é dada por

$$\Delta\rho = \rho_5 - \rho_2. \quad (3.10)$$

Essa reatividade é expressa em δk , e pode ser convertida para partes por cem mil (PCM), dólar (\$) e centavos de dólar (¢), respectivamente por

$$\rho_{pcm} = 10^5 \cdot \rho; \quad \rho_{\$} = \frac{\rho}{\beta_{eff}}; \quad \rho_{¢} = 100 \cdot \frac{\rho}{\beta_{eff}}. \quad (3.11)$$

3.2.3.4 Relatórios Parciais e Gráfico Integral

A fim de poder verificar a coerência dos resultados produzidos, a cada passo são gerados relatórios parciais no formato PDF contendo o gráfico temporal da posição da barra, bem como o gráfico temporal da potência. Ambos gráficos divididos nas 5 janelas descritas, juntamente com as regressões exponenciais referentes as janelas 2 e 5. A regressão da janela 2 é estendida para a janela 1 e 3, e a regressão da janela 5 é estendida para a janela 3 e 4. Isso permite verificar se o tempo de acomodação dos nêutrons

atrasados foi o suficiente, além de se a regressão exponencial convergiu. Além dos 2 gráficos, é gerada no relatório parcial uma tabela contendo os seguintes valores calculados para o respectivo passo: $r_2, r_5, \Delta r, \rho_2, \rho_5, \Delta \rho, T_2, T_5, a_2, b_2, a_5, b_5$, além da descrição tempo de início e fim de cada janela.

Depois de gerados todos os valores de Δr_i e $\Delta \rho_i$, sendo cada i referente a cada passo, eles podem ser usados plotar em um PDF os pontos correspondentes ao gráfico integral da reatividade em função da posição, $(x[i], \rho[i])$, onde

$$\begin{aligned} r[i] &= \Delta r_i + x[i - 1]; \\ \rho[i] &= \Delta \rho_i + \rho[i - 1], \end{aligned} \tag{3.12}$$

fazendo a consideração que o primeiro passo é dado por $i = 1$, que $x[0]$ é a posição inicial da barra, a qual ela está mais inserida, e que a reatividade nessa posição é nula, logo $\rho[0] = 0$.

A curva integral da reatividade em função da posição, $\rho(x)$, pode ser encontrada realizando uma regressão polinomial nos pontos encontrados. A mesma é plotada no gráfico juntamente com os pontos, gerando a curva de calibração da referida barra. Por fim, os PDF são unidos, gerando o relatório final, o qual pode ser visto um exemplo no Apêndice C.

Resultados

O sistema de aquisição de dados desenvolvido é usado no procedimento de calibração das barras de controle, conforme descrito na metodologia. Entretanto, como ainda não foram conectados detectores de nêutrons na SPU, a potência precisa ser medida por algum dos canais do SMFN analógico, com menor precisão. Foi escolhido o canal logaritmo, dado que o canal linear não dispõe de maneira nativa de realizar a aquisição da escala atual da potência, que o canal percentual não possui precisão para ler baixa potência, e que o canal de partida satura sua medição para potências acima de 10 W, em sua configuração atual. Assim, a leitura do canal logaritmo pelo CLP calibrado, e sua incerteza de medição associada foi analisada.

A barra de controle escolhida para realizar o procedimento de calibração foi a barra de regulação. Essa é a barra menos reativa, criando menos necessidade de interromper a aquisição de dados no procedimento proposto. Os resultados produzidos neste trabalho são comparados com os resultados disponíveis de anos anteriores.

4.1 Sistema de aquisição de dados

Enquanto que não há a necessidade de converter os valores lidos pela instrumentação digital (canais da SPU), dado que eles enviam os dados nas unidades de medida corretas, é preciso gerar valores de conversão para cada valor de tensão/corrente lido pelo Conversor analógico para digital

(C-AD) do CLP. O CLP realiza a leitura de muitas variáveis da instrumentação analógica (20 atualmente), sendo que somente duas são necessárias no procedimento de calibração proposto (potência e posição de barra). Assim, serão exibidos os resultados de leitura e conversão do CLP somente para essas duas variáveis.

São apresentados ainda os resultados de leitura das variáveis da SPU, e por fim, os resultados do servidor de aquisição de dados.

4.1.1 Leitura da instrumentação analógica através do CLP

A fim de verificar a relação da posição da barra com o valor emitido pelo potenciômetro e o valor exibido na mesa de controle, foram coletados pontos para várias posições diferente da barra de regulação, as quais podem ser visto na Tabela 4. A barra foi colocada em sua posição inferior e foi sendo extraída a cada ponto 50 posições (exibidas pelo circuito indicador de posição). A posição foi medida com uso de um paquímetro através do mecanismo de posicionamento da barra, e a tensão do potenciômetro com o uso de um multímetro. Os mesmo valores foram plotados na Figura 36, a qual é possível comprovar a relação linear entra as variáveis.

Posição exibida	186	236	336	436	536	636	736	836	940
Posição (mm) medida	0	24,9	74,6	125,5	176	228,5	281,5	331,25	381
Tensão (V) medida	0,398	0,505	0,704	0,935	1,149	1,364	1,578	1,793	2,016

Tabela 4 - Relação entre variáveis da barra de regulação para várias posições diferentes.

Conforme pode ser visto no Tabela 4 o potenciômetro da barra de regulação está ajustado para emitir 0,398 V quando ela está em sua posição “inferior”, e o circuito indicador de posição está ajustado para indicar o número 186 nessa posição. Quando a barra está na posição “superior”, o potenciômetro está ajustado para emitir 2,016 V, o circuito indicador está ajustado para exibir o número 940. Isso quer dizer que o circuito indicador consegue exibir 754 posições diferentes. De acordo com o fabricante do

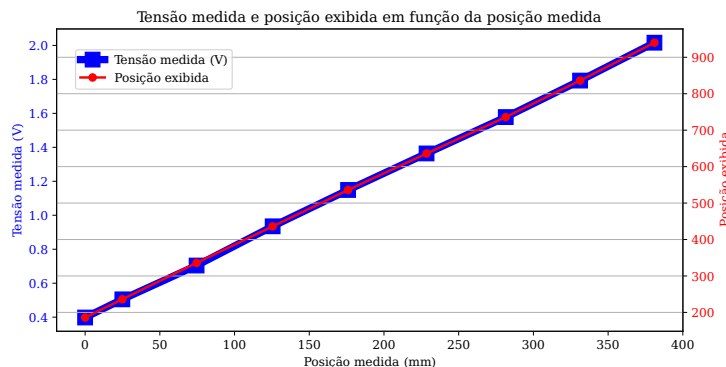


Figura 36 - Linearidade entre as variáveis: Posição medida, Posição exibida e Tensão medida.

mesmo, a precisão é de 1 Bit menos significativo (BMS). Considerando que a barra varia sua inserção de 0 a 381 mm, cada dígito nessa configuração tem uma precisão de 0,5 mm.

Esse intervalo de tensão do potenciômetro da barra de regulação é lido pelo C-AD do CLP, o qual possui uma precisão de 13 bits e foi configurado ler valores de 0 a 10 V, conforme explicado em Seção B.1.2. Quando o sinal de tensão do potenciômetro indica a posição da barra inserida totalmente, 0,398 V, o mesmo gera o número 326 no C-AD. Por outro lado, quando o valor para a posição de retirada total da barra, 2,016 V, gera o número 1652. Isso quer dizer que o CLP consegue indicar 1326 posições diferentes, aproximadamente o dobro de posições. Considerando a mesma variação de posição da barra e de acordo com o fabricante o conversor tem a precisão de 1 dígito menos significativo, cada dígito tem uma precisão de 0,287 mm. Portanto foi possível ler o valor da barra com uma precisão 75 % maior do que a indicada na mesa de controle, mas só 16 % da capacidade máxima da precisão do C-AD.

A respeito do canal logarítmico, a relação entre as variáveis é um pouco mais complexa. De acordo com o fabricante, o indicador de potência do canal logaritmo na mesa de controle é um miliamperímetro analógico, que seu ponteiro varia linearmente com corrente de entrada, a qual em condições ideais se compreende em um intervalo de 0 a 1 mA. Também em condições ideais, quando o miliamperímetro recebe um sinal de 0 mA seu ponteiro deveria estar posicionando na posição $2,5 \cdot 10^{-3} W$ e quando recebe um sinal de

1 mA o ponteiro deveria estar posicionado na posição $2,5 \cdot 10^5$ W. Os outros valores de potência são igualmente espaçados por década, ou seja, $10 \cdot 10^{-3}$ W, $10 \cdot 10^{-2}$ W, $10 \cdot 10^{-1}$ W, e assim sucessivamente. Ainda em condições ideais, quando o canal indicasse potência máxima ($2,5 \cdot 10^5$ W) a saída de aquisição deveria ser 10 V e quando indicasse potência mínima a saída deveria ser de 0 V, variando linearmente conforme a corrente do miliamperímetro.

Com o objetivo de coletar os valores reais para qual a eletrônica está ajustada, foi usado o simulador do canal para coletar vários pontos de potência diferentes, os quais estão concatenados na Tabela 5. Ao invés de ler visualmente o valor do ponteiro do indicador de potência, o que introduziria incerteza de medição manual, foi lida a corrente que o módulo do canal manda para o mesmo, através de um amperímetro digital. Ao mesmo tempo, um voltímetro digital foi conectado a saída de aquisição de dados logarítmica. Foi descoberto que a saída de corrente máxima para o indicador de potência está ajustada para um pouco mais de 1 mA: 1,013 mA conforme pode ser visto na Tabela 5, o qual foi considerado como a potência máxima ($2,5 \cdot 10^5$ W). O menor valor de corrente que o canal está ajustado para emitir é (0 A), correspondendo corretamente a descrição do fabricante, o que também gera um valor de tensão de (0 V) na saída de aquisição logarítmica.

Potência (W) conhecida	250000										0,0025
Corrente (mA) do indicador	1,013	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,176	0
Tensão (V) da aqui. log.	9,863	9,735	8,761	7,792	6,826	5,85	4,879	3,918	2,937	1,729	0

Tabela 5 - Relação medida entre várias variáveis do canal do logaritmo.

Foi plotada a tensão de aquisição logarítmica em função da corrente do indicador de potência na Figura 37, a qual verifica a linearidade entre as duas variáveis. Além disso, foi plotado também os respectivos números gerados pelo C-AD, o que permite ver que todas as 3 variáveis são lineares entre si.

A respeito da precisão disponível de leitura do canal logaritmo, é usada quase toda a precisão disponível do C-AD, dado que a saída de aquisição do canal é de 0 a 9,863 V e o C-AD está configurado para ler valores de 0

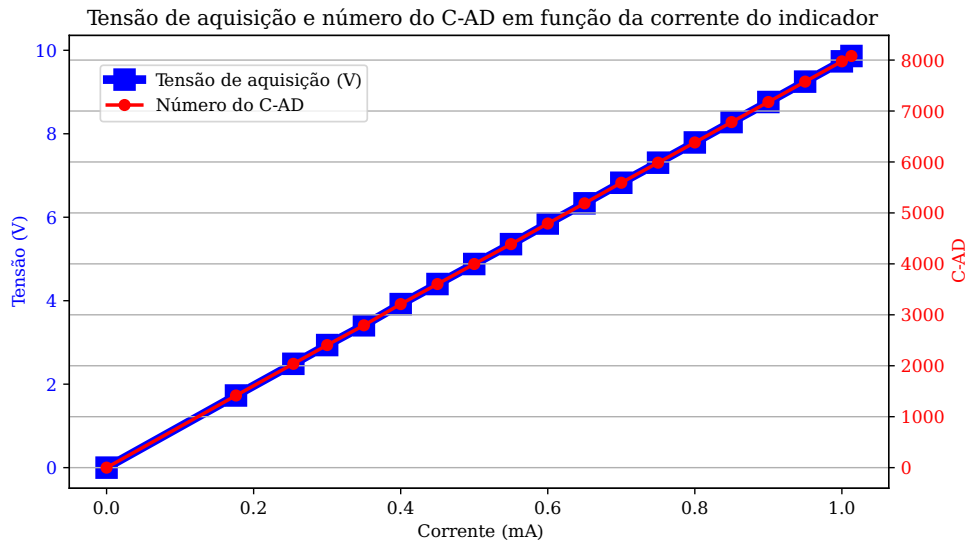


Figura 37 - Linearidade entre as variáveis: Corrente do Indicador, Tensão de aquisição e Número gerado pelo C-AD.

a 10 V. O valor de tensão de 9,863 V gera o número 8080 como leitura do C-AD. Ou seja, é possível ler 8081 diferentes valores de tensão (incluindo o valor 0), correspondente a 8081 valores diferentes possíveis de potência. Entretanto, dado que a relação entre tensão e potência não é linear neste canal, a análise de precisão de leitura da potência tem que ser feita após a conversão.

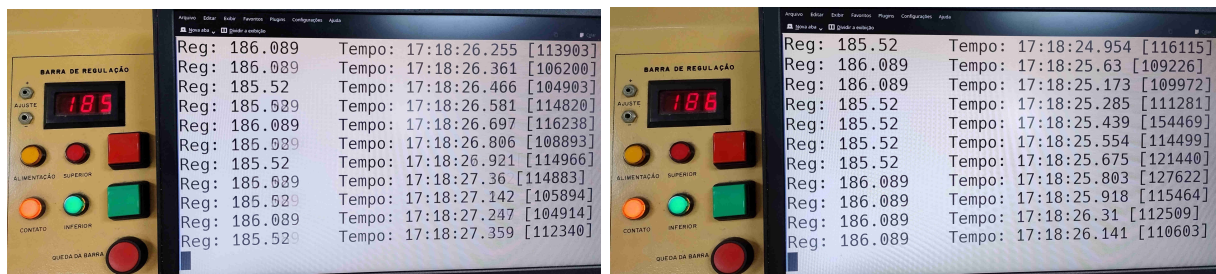
4.1.1.1 Leitura de variáveis do CLP e conversão da posição da barra de regulação

O número gerado pelo C-AD do CLP precisa ser convertido para um número equivalente ao número exibido pelo indicador de posição da mesa de controle, pois este é o usado pelos operadores. Após comprovada a linearidade da tensão, posição medida e posição exibida, quaisquer dois pontos são o suficiente para realizar a conversão. Assim, os valores dos pontos (x_0, y_0) e (x_1, y_1) coletados para realizar a conversão linear foram

$$\begin{aligned}
 x_0 &= 367; \\
 x_1 &= 1579; \\
 y_0 &= 210; \\
 y_1 &= 900,
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

sendo x referente ao número gerado pelo C-AD e y referente o número exibido pelo indicador de posição da barra.

Estes valores são usados pela libOpcTrigaPLC para converter o valor salvo na variável BarraReg do CLP. A fim de verificar a eficácia da conversão e a taxa de amostragem máxima possível de se obter na leitura de todas as variáveis, foi compilado um programa de testes usando a função getAll() da libOpcTrigaPLC. Este foi configurado para realizar 1 solicitação de leitura após cada resposta do CLP, em um total de 100 solicitações. Além disso, ele foi configurado para exibir o valor convertido da variável BarraReg no terminal, juntamente com o tempo que a aquisição foi realizada (no formado hora:minuto:segundo.milissegundo) e a diferença de tempo entre uma amostragem e outra (em microssegundo). Foi realizada uma foto do procedimento ao lado do indicador de posição da barra de regulação, conforme pode ser visto na Figura 38. A média das diferenças de tempo entre as leituras foi de 110,86 ms, o que representa a taxa de amostragem média para leitura de todas variáveis do CLP pelo TrigaServer.



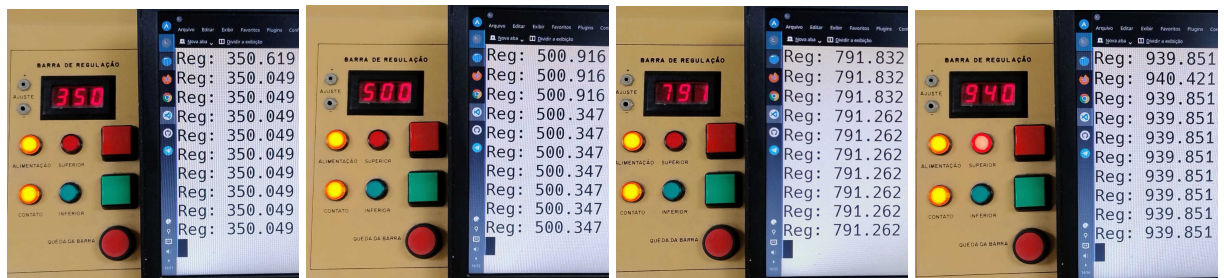
(a) Posição da barra exibida: 185.

(b) Posição da barra exibida: 186.

Figura 38 - Leitura e conversão de dados dos CLP sem restrição de taxa de amostragem.

Conforme também pode ser visto pelas Figura 38a e Figura 38b, quando o indicador na mesa exibe o número 186, o dado lido pelo CLP é convertido para o número 186,086. E quando o indicador exibe 185, o dado lido pelo CLP é convertido para o número 185,52. A barra estava parada na sua posição totalmente inserida no núcleo, fato confirmado pela luz acesa indicando posição “inferior” em ambas figuras. Essa variação de valor é dada por ruídos no sinal do potenciômetro. Assim, é demonstrado que o CLP é capaz de ler a posição da barra com uma precisão superior.

Para demonstrar a eficácia da conversão, são coletados e convertidos valores para mais 4 posições da barra de regulação, sendo 3 posições intermediárias e outra na posição “superior”. A Figura 39 exhibe os resultados para este pontos, onde é possível perceber que todos os valores convertidos estão próximos dos valores exibidos na mesa.



(a) Posição 350.

(b) Posição 500.

(c) Posição 791.

(d) Posição 940.

Figura 39 – Demonstração da eficácia da conversão para outras posições da barra de regulação.

4.1.1.2 Leitura de variáveis do CLP e conversão da potência dada pelo canal logaritmo

A respeito da conversão do número gerado pelo C-AD a partir da leitura do valor de tensão da saída de aquisição logarítmica do canal logarítmico, foram feitas algumas considerações. Foi considerado que a corrente máxima na saída para o indicador de potência (1,013 mA) corresponde a potência máxima de indicação ($2,5 \cdot 10^5$ W), sendo a respectiva leitura feita pelo C-AD gerando o número 8080. Foi considerado ainda que a corrente mínima na saída para o indicador de potência (0 mA) corresponde a potência mínima de indicação ($2,5 \cdot 10^{-2}$ W), sendo a respectiva leitura feita pelo C-AD gerando o número 0. E por fim, foi considerado que a década de potência varia linearmente em relação a potência e corrente citadas.

Assim, foi identificado os coeficientes A e B referentes a Equação (B.2),

$$A = 0,0025; \tag{4.2}$$

$$B = 0,000990098877,$$

os quais são usados para calcular o valor de potência do canal logaritmo a partir do número gerado pelo C-AD conectado a saída de aquisição logarítmica.

Os valores de tensão referentes a Tabela 5 lidos pelo C-AD, geram os números contidos na Tabela 6. Estes números são usados juntamente com os coeficientes encontrados (Equação (4.2)) na Equação (B.2) para gerar os valores de potência contidos na mesma tabela. Os dados desta tabela são usados para gerar o gráfico contido na Figura 40, a qual corresponde a potência calculada em função do número dado pelo C-AD. No mesmo gráfico foi plotada a curva exponencial de referência, a qual tem os 2 pontos conhecidos (valor lido pelo C-AD na potência máxima possível de ser indicada, valor lido na potência mínima possível de ser indicada). Conforme pode ser percebido pelo gráfico, a curva ficou bastante próxima da curva de referência.

Número do C-AD do CLP	8080	7975	7177	6383	5592	4792	3997	3210	2406	1416	0	
Potência (W) conhecida	250000											0,0025
Potência (W) calculada	249999,38	196778,91	31906,54	5220,85	860,15	138,83	22,67	3,76	0,6	0,063	0,0025	

Tabela 6 - Relação entre valor do C-AD e potência calculada.

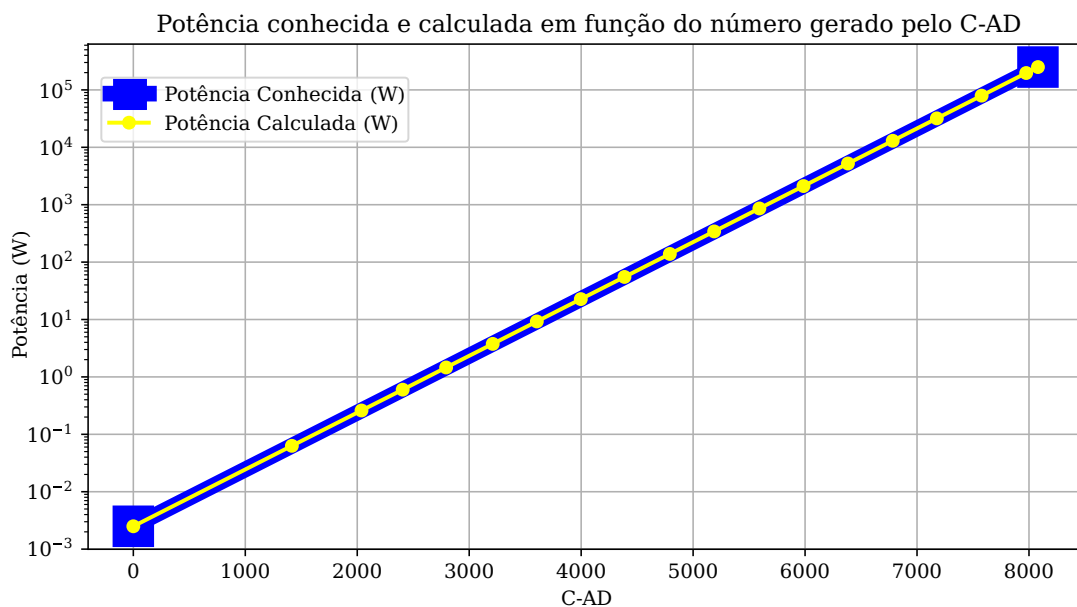


Figura 40 - Potência calculada em função do número gerado pelo C-AD, e reta ligando os 2 pontos conhecidos de potência em função do número gerado pelo C-AD.

A fim de verificar a eficácia da conversão e também do sistema de aquisição de dados, dessa vez foi usando o TrigaServer. Que foi colocado em

A respeito da precisão do valor de potência lido, é possível usar a equação para calcular a variação de potência para a variação positiva de 1 BMS, o que é a incerteza associada ao processo de conversão analógico digital. Foi usado alguns dos valores contidos na Tabela 6 para os cálculos, e os valores foram concatenados na Tabela 7. Nela, é possível perceber que a incerteza absoluta medida em W (**Varição potência (W)**) varia conforme a potência absoluta, mas a incerteza relativa (**Varição potência (%)**) é constante para todos os valores, representando sempre 0,2277% do valor absoluto.

Número C-AD do CLP	Potência calculada (W)	Número C-AD do CLP	Potência calculada (W)	Varição potência (W)	Varição potência (%)
8080	2,50E+05	8081	2,51E+05	5,71E+02	2,28E-01
7177	3,19E+04	7178	3,20E+04	7,28E+01	2,28E-01
6783	1,30E+04	6784	1,30E+04	2,97E+01	2,28E-01
5986	2,11E+03	5987	2,12E+03	4,82E+00	2,28E-01
4792	1,39E+02	4793	1,39E+02	3,17E-01	2,28E-01
3997	2,27E+01	3998	2,27E+01	5,17E-02	2,28E-01
3210	3,77E+00	3211	3,78E+00	8,60E-03	2,28E-01
2038	2,60E-01	2039	2,61E-01	5,94E-04	2,28E-01
1416	6,31E-02	1417	6,32E-02	1,44E-04	2,28E-01
0	2,50E-03	1	2,51E-03	5,71E-06	2,28E-01

Tabela 7 - Variação da potência convertida, dada a variação de um BMS.

4.1.1.3 Incerteza real da aquisição das variáveis

A incerteza dada pelo BMS, representa a menor incerteza possível de se obter, dado a resolução do C-AD e os intervalos de tensão do sinal de entrada. Entretanto, a incerteza real pode ser afetada por outros fatores, como ruídos no sinal. Para poder analisar o sinal em função do tempo da barra de regulação e potência do canal logarítmico, o reator foi colocado em estado crítico e foi realizada uma aquisição de dados de aproximadamente por 30 segundos. Para a aquisição foi usado novamente o TrigaServer, mas dessa vez com TrigaGet para filtrar e salvar os dados em CSV. A taxa de amostragem solicitada foi a taxa média do CLP, e os dados foram filtrados

para obter o tempo de aquisição do CLP (variáveis TIME) e os valores não convertidos da barra de regulação (PLC_ORIG_BarraReg) e da aquisição logarítmica do canal logarítmico (PLC_ORIG_CLogALog).

A variável PLC_ORIG_BarraReg foi plotada em função ao tempo na Figura 42. Conforme pode ser visto, precisão real da aquisição da barra de regulação foi realmente de 1 BMS, com o número lido pelo CLP variando entre 701 e 702 (com exceção de 3 amostras apenas, em um universo total de 300 amostras).

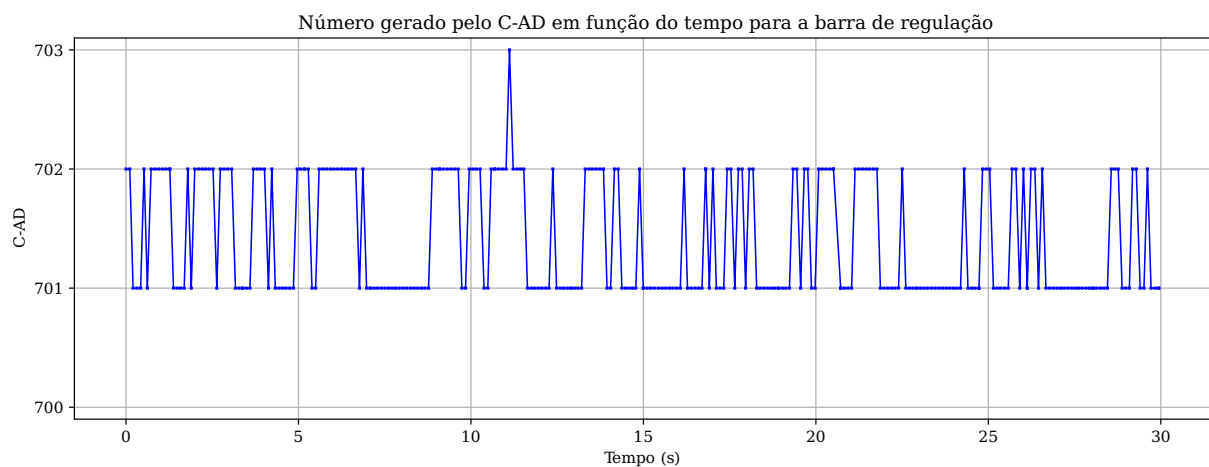


Figura 42 - Número gerado pelo C-AD em função do tempo, referente a leitura de tensão do potenciômetro da barra de regulação.

A variável PLC_ORIG_CLogALog foi plotada em função ao tempo na Figura 43. Conforme pode ser visto o canal logarítmico possui bastante ruído, no mesmo intervalo variando do número 2684 ao número 2691, o que gera 8 possibilidades de números lidos pelo CLP para uma potência real do reator constante. Isso representa uma variação percentual máxima de 1,8216% em relação ao valor absoluto de potência, após a conversão. O número 2684 convertido em potência pela Equação (B.2) com coeficientes dados pela Equação (4.2) gera o valor 1,135 W e o número 2691 convertido em potência gera o valor 1,154 W, representando uma variação absoluta de 0,019 W. Portanto, o ruído nessa faixa de baixa potência não representa grandes incertezas.

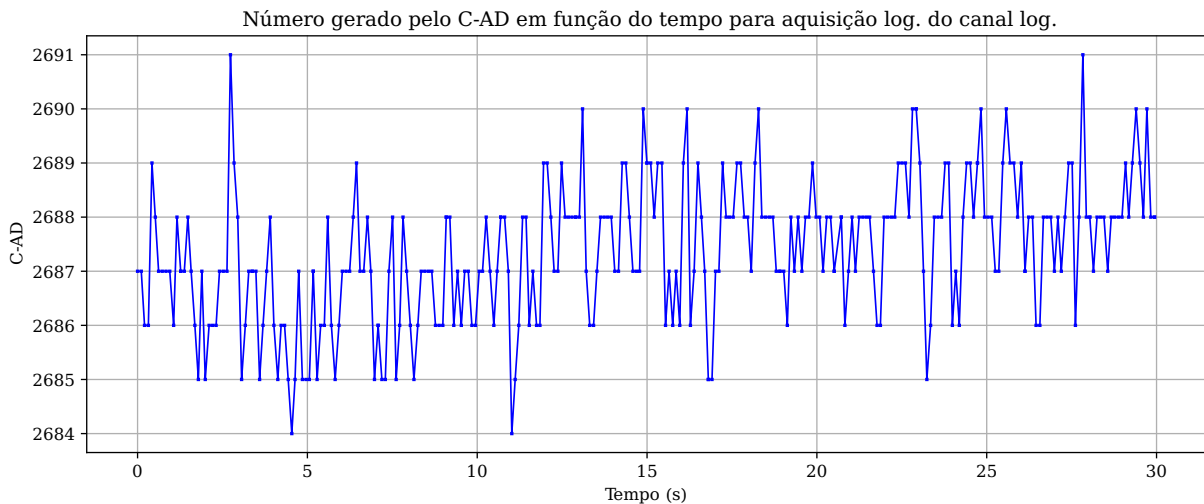


Figura 43 – Número gerado pelo C-AD em função do tempo, referente a leitura de tensão da saída de aquisição logaritmo do canal logaritmo.

4.1.2 Leitura da instrumentação digital

Atualmente, a única instrumentação digital lida é a SPU. Para verificar a máxima taxa de amostragem de leitura da mesma, o conversor Serial-485 para USB foi conectado em um computador, e foi compilado o programa teste da libModbusSystematomSPU. O programa teste configurado para obter os valores em todos endereços através da função `getAll()` da SPU, e a cada aquisição, exibir no terminal: a potência (N) e período lidos (T), o tempo em que foi realizada a leitura (no formato HH:MM:SS.MS), e a diferença de tempo entre uma leitura e outra (em microssegundos). Foi realizada uma foto mostrando o *display* do canal A da SPU ao lado do terminal do computador, a qual pode ser vista na Figura 44a. Os valores de diferença de tempo entre uma leitura e outra foram usados para calcular a taxa média de amostragem máxima, o que resultou em 32,134 ms. Como pode ser visto pela mesma figura, o valor da potência (N) corresponde a 0% e do período (T) corresponde a 0 s^{-1} , mesmos valores exibidos no *display* do canal.

Para averiguar o funcionamento da leitura através do TrigaServer, o módulo conversor RS485-USB foi reconectado ao computador do TrigaServer, e usando o *GNU NetCat* foi solicitado ao TrigaServer o recebimento dos dados no formato JSON, os quais são exibidos no terminal em tempo real.

Assim, foi ativado o teste da SCU conectada ao intervalo 1 e realizada uma foto do terminal juntamente com o *display* do canal. O procedimento foi repetido para o teste da SCU conectada o intervalo 2 e 3, e as fotos com os resultados de todos os procedimentos podem ser vistas respectivamente na Figura 44b, Figura 44c e Figura 44d.

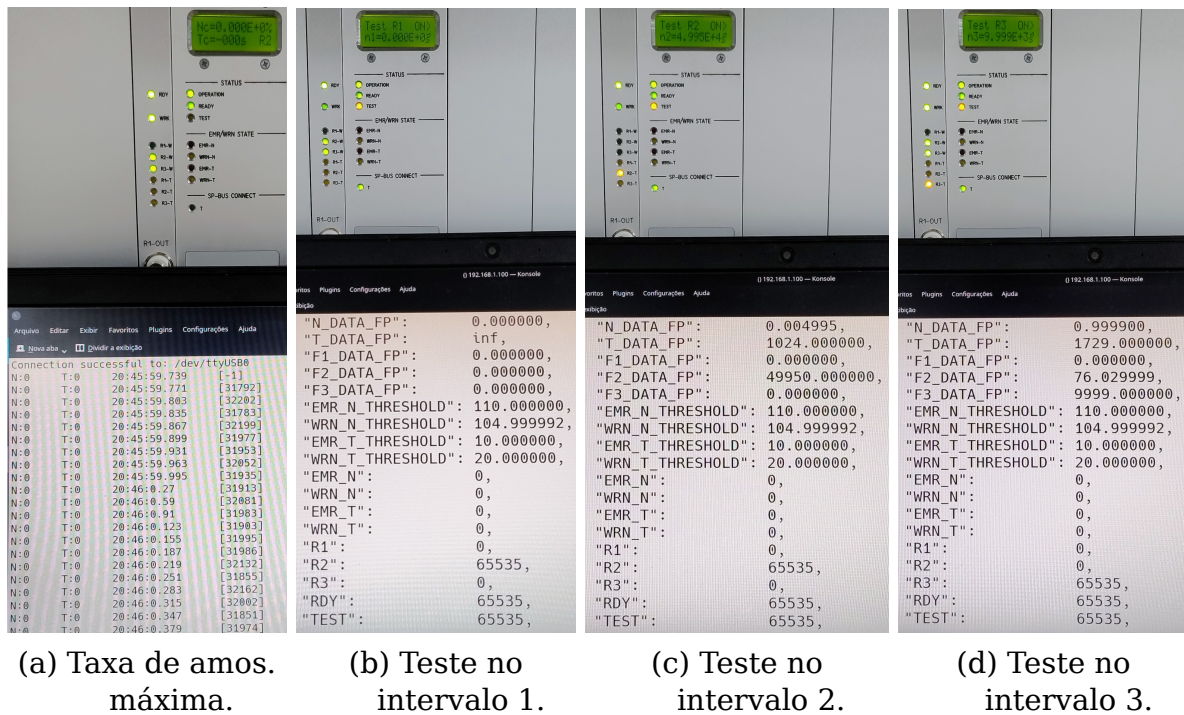


Figura 44 - Resultados de leitura de valores da SPU.

Para o teste no intervalo 1, como não há nenhuma SCU neste intervalo, a taxa de contagem média exibida no *display* do canal da SPU é de $0s^{-1}$, conforme pode ser visto na Figura 44b. Entretanto, é possível observar que os valores exibidos no terminal são coerentes, os quais as taxas de contagem média para os 3 intervalos (F1_DATA_FP, F2_DATA_FP e F3_DATA_FP) são exibidos com valor 0, dado que não há detectores conectados nas outras SCU. O que resulta em potência nula (N_DATA_FP) e período infinito (N_DATA_FP). Os valores que constam como 65535 (R2, RDY e TEST) significam “ativo”, e podem ser confirmados pelos LED's indicadores no painel do canal da SPU, e pelo fato que os canais da SPU estão configurados para trabalhar apenas com o intervalo 2 e 3, sendo o intervalo 2 preferencial para baixas potências.

Para o teste no intervalo 2, como há uma SCU-01R neste intervalo e esta

é configurada para emitir pulsos a uma taxa aproximada de $5 \cdot 10^4$ no modo teste, a taxa de contagem média exibida no *display* do canal da SPU é de $4,995 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$, o mesmo valor que é exibido para a variável F2_DATA_FP, conforme pode ser visto na Figura 44c. Assim, o coeficiente de conversão para potência do 2º intervalo foi ajustado para 1,00 e a SPU é programada para multiplicar o a taxa média por 10^{-7} , portanto a potência lida é deveria ser de $4,995 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, fato confirmado pelo valor de potência exibido no terminal.

Para o teste no intervalo 3, como há uma SCU-02R neste intervalo e esta é configurada para emitir pulsos a uma taxa aproximada de 10^4 no modo teste, a taxa de contagem média exibida no *display* do canal da SPU é de $9,999 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, o mesmo valor exibido para a variável F3_DATA_FP, conforme pode ser visto na Figura 44d. O coeficiente de conversão para potência do 2º intervalo foi ajustado para 1,00 e a SPU é programada para multiplicar o a taxa média por 10^{-4} , portanto a potência lida é deveria ser de $9,999 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, fato confirmado pelo valor de potência exibido no terminal. É possível notar que o intervalo ativo mudou para o 3º, onde o valor de R3 foi lido como 65535, fato esperado dado que o 3º intervalo atingiu uma alta taxa de contagens.

Finalmente, foi demonstrado que o TrigaServer leu coerentemente os valores da SPU, e que a média da taxa de amostragem máxima é de 32,134 ms.

4.1.3 Desempenho do servidor

Conforme descrito na metodologia, foi instalado o sistema *GNU/Linux* por meio do projeto *ArchLinux* em um computador alocado pelo CDTN. A fabricante de tal computador é a brasileira POSITIVO, placa mãe *POS-RIH670EU*, a qual está instalada um processador *Intel Core i3-12100T*, 8 GB de memória RAM, e um SSD do tipo *M.2* com 256 GB de armazenamento. Ele dispõe de 1 conexão *Ethernet* e 8 portas USB para serem usadas na comunicação com os dispositivos de instrumentação do reator.

O sistema com todos pacotes necessários instalados ocupou um total de 6,2 GB de armazenamento (sem o TrigaServer instalado), representando 2,42% do total disponível no computador. O TrigaServer compilado e empa-

cotado juntamente com seus arquivos de configuração (através do *PKBUILD* do *ArchLinux*), gerou um pacote de apenas 167,5 kB. Os arquivos extraídos do pacote ocupam no total 500,3 kB, o que representa $1,9 \cdot 10^{-4}$ % do tamanho do disco. Como sua execução não requer mais espaço em disco, o consumo de disco pelo TrigaServer pode ser considerado irrelevante, e se incluído o sistema como todos os outros pacotes necessários, pode ser considerado muito baixo.

A respeito do consumo de memória RAM sistema ocupou um total de 264 MB de memória RAM sem o TrigaServer em execução, de um total de 8192 MB disponível pelo computador. A estimativa para o consumo de memória RAM dado pelo monitor de sistema *htop* para o TrigaServer, com ou sem clientes conectados, foi de aproximadamente 0,1 % da memória disponível. Uma captura de tela do *htop* em execução no TrigaServer por meio de *ssh* pode ser vista na Figura 45a. Portanto o consumo de RAM também pode ser considerado irrelevante.

A respeito do consumo de processamento, o consumo total de todas aplicações necessárias para rodar somente o sistema é tão baixo que ficou abaixo do mínimo que a aplicação usada para o monitoramento (*htop*) consegue medir. Igualmente, o consumo TrigaServer sem clientes conectados (ou seja, sem *thread's* de envio) ficou abaixo do que a aplicação de monitoramento é capaz de medir. Por outro lado, o consumo referente a uma *thread* de envio, o qual o cliente solicitou a máxima que é possível de ser solicitada ao TrigaServer (1 ms, foi de 4,0 % de 1 *thread* do processador, conforme pode ser visto na Figura 45a. Considerando que o *kernel Linux* tem a capacidade de intercalar a execução de mais de uma *thread* de programa em uma *thread* de processador, e que esse processador tem 8 *thread's* no total, o que significa que aproximadamente seria possível alocar até 200 clientes simultâneos com taxa de amostragem máxima.

A taxa de amostragem máxima que é possível solicitar ao TrigaServer é muito maior que a taxa média lida pelos equipamentos de instrumentação atual (aproximadamente 32 ms para os canais da SPU e 110 ms para o CLP). O consumo de processamento de 1 *thread* que envia a 32 ms não foi possível

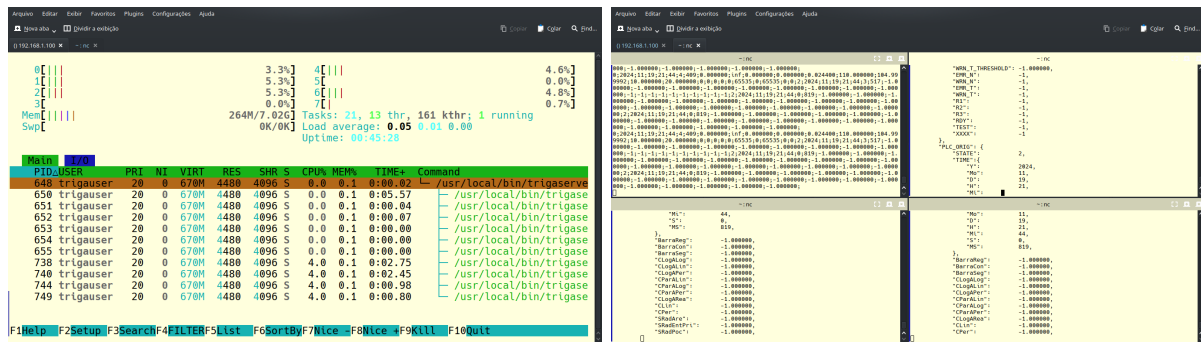
(a) *htop* em execução no servidor.(b) 4 *NetCat* em execução no cliente.

Figura 45 – Consumo de processamento do TrigaServer para 4 clientes conectados e uma taxa de envio de 1 ms cada.

ser medido pela aplicação de monitoramento, mas pode ser estimado como 32 vezes menor, ou seja, 0,15%. E o consumo de processamento de 1 *thread* que envia a 110ms também não foi possível ser medido pela aplicação de monitoramento, mas pode ser estimado como 110 vezes menor, ou seja, 0,036%.

Em relação ao consumo de rede, o mesmo foi medido com o auxílio da ferramenta *iftop*. Considerando o envio de dados na taxa de amostragem máxima, e a taxa de transferência média em um intervalo de 40 segundos, o envio de dados através do formato RAW gerou um consumo de rede de $2,43 \text{ Mbit s}^{-1}$ para o envio de pacotes do tipo RAW. O formato de envio do tipo CSV gerou um consumo médio um pouco maior, de $5,22 \text{ Mbit s}^{-1}$. E o formato de envio JSON gerou o maior consumo médio, de $31,5 \text{ Mbit s}^{-1}$. Mas considerando a taxa de amostragem média da SPU (32 ms) e do CLP (110 ms) o consumo medido para o envio de dados pelo formato JSON foi de respectivamente $14,5 \text{ kbit s}^{-1}$ e $4,8 \text{ kbit s}^{-1}$. Como o TrigaServer está conectado a intranet do CDTN por meio de uma conexão *Ethernet* com uma largura de banda de 100 Mbit s^{-1} , esses valores representam respectivamente 0,0142% e 0,0047% da largura de banda disponível. Assim, o consumo de rede para as taxas de amostragem correspondentes a da instrumentação pode ser considerado irrelevante.

Portanto a maior restrição para o número máximo de usuários conectados foi o consumo de banda de rede, dependendo da taxa de amostragem. O consumo de memória RAM por usuário conectado é insignificante, e o

consumo de processamento também.

4.1.4 Discussões

O TrigaServer conseguiu ler simultaneamente os valores da CLP e SPU, mas devido ao protocolo escolhido para comunicação com o CLP, a taxa de amostragem foi aproximadamente 4 vezes maior que da SPU, e essa taxa aumenta conforme a quantidade de variáveis lidas aumenta. Poderia ser estudado as vantagens e desvantagens de alterar esse protocolo para *Modbus TCP/IP*, aproveitando a comunicação *Ethernet* existente, ou ainda *Modbus RTU*, o mesmo usado para comunicação com a SPU, dado que o CLP dispõe de uma interface de comunicação serial disponível. De qualquer forma, o TrigaServer conseguiu cumprir os objetivos estabelecidos de forma eficiente, ou seja, ler simultaneamente os valores das instrumentações do reator e repassar os valores lidos a diferentes clientes simultaneamente e em tempo real, isso tudo sem consumir muitos recursos de processamento, rede, armazenamento e RAM.

A precisão de leitura da posição da barra de controle foi apenas 16% da capacidade máxima de precisão do C-AD do CLP, portanto devem ser desenvolvidas estratégias para melhorar a precisão da aquisição de dados. Por exemplo, poderia ser desenvolvido um circuito eletrônico com isolamento galvânico para conversão de sinal do potenciômetro em um intervalo adequado ao C-AD do CLP. Ou ainda, poderia ser desenvolvido um novo circuito indicador de posição com saída de aquisição de dados. Essa solução tem a vantagem de poder aumentar a precisão da posição das barras exibidas na mesa de controle, poder exibir a posição das barras em uma unidade de medida real (centímetro, milímetro, ou ainda percentual), e poder enviar os valores de forma digital para o TrigaServer. Isso tiraria a necessidade do CLP ler a posição da barra de controle, e do TrigaServer de converter o valor lido.

A precisão de leitura da potência pelo canal logaritmo foi a máxima disponível pelo C-AD, o que representa uma precisão variável em valores absolutos, dado a natureza do sinal lido. Mas em termos relativos, a precisão

representa aproximadamente 0,0% do valor absoluto, qualquer que seja ele. Para obter uma precisão maior na leitura da potência, usando a instrumentação atualmente em funcionamento, seria necessário ler a potência através do canal linear, o qual de acordo com o fabricante é que tem maior precisão de leitura dos canais. Entretanto, não foi projetado uma saída de aquisição da escala de tal canal, gerando a necessidade de realizar a aquisição da escala pelo escalímetro na mesa de controle (o qual está inserido na cadeia de segurança), ou acrescentar um circuito ao indicador de escala para realizar a aquisição de dados da mesma.

A melhor solução para melhorar a precisão de leitura da potência do reator, é simplesmente adicionar os detectores de nêutrons na SPU, a qual é capaz de ler a potência percentual do reator com uma precisão de ponto flutuante de 4 B. A precisão de leitura das variáveis da SPU pelo TrigaServer segue a mesma precisão da SPU.

4.2 Automação da calibração de barras

A barra em que o procedimento de calibração foi realizado foi a nomeada como barra de regulação, a qual se encontra na posição F16 do núcleo conforme pode ser visto na Figura 24. Por estar no anel mais externo, essa é a barra menos reativa, portanto menos sensível a variações, o que poderá ser visto no resultado final deste trabalho.

O procedimento foi realizado conforme seguindo as instrução proposta na Seção 3.2.1, e o TrigaGet foi usado para realizar a aquisição de dados recebendo dados através do TrigaMirror. Os dados de aquisição foram processados usando a metodologia descrita em Seção 3.2.3 através do Triga-Calib.

4.2.1 Procedimento realizado

Pela curva de calibração do ano de 2023, vista na Figura 25, é possível perceber que a curva é mais acentuada perto das posições “inferior” e “superior”, enquanto se aproxima mais de uma reta nas posições interme-

diárias. Visando coletar mais pontos aonde onde a curva é mais acentuada, foi planejado realizar passos menores nessas regiões, e um passo maior na região intermediária.

O dispositivo de controle de posição da barra não dispõe da possibilidade de estabelecer previamente a posição desejada da barra, e o mecanismo do mesmo realizar a movimentação automaticamente. A movimentação da barra acontece pressionando a botoeira “desce” na mesa de controle ou “sobe”, e a posição é atingida de acordo com o tempo que a botoeira foi pressionada. Como a metodologia restringe movimento da barra a ser regulada para apenas “subida”, se torna atingir uma determinada posição planejada com precisão, dado que só há uma tentativa para atingir tal posição.

Em relação ao tempo, conforme descrito no procedimento proposto é preciso aguardar o tempo de acomodação de nêutrons, t_a atrasados, somado com o tempo que em será calculado o período estável, t_e . Foi estabelecido aguardar pelo menos 120 s em cada extração, considerando que os dados serão processados com $t_a = 60$, isso gerará um t_e mínimo de 60 s. Não há problemas relacionados a calibração em extrapolar os 120 s definidos, isso gerará mais pontos de coletas de dados, o que teoricamente aumentaria a precisão da regressão exponencial. Entretanto, quanto maior o tempo de espera, mais o potência do reator aumenta, que se se aproximar da potência que gera defeito de temperatura, cria a necessidade de interromper a aquisição para abaixar a potência.

Desta maneira foi realizado a primeira aquisição de dados, com as posições 187 (posição “inferior”), 201, 215, 233, 254, 301 e 401. Depois da aquisição realiza na posição 400, a potência estava próxima de 100 W e crescendo em uma velocidade maior, o que rapidamente atingiria a zona que começa a aparecer efeito de temperatura (), portanto a aquisição foi finalizada e a potência reduzida controlando a reatividade do reator pela barra de controle. O gráfico da primeira aquisição pode visto na Figura 46.

Para a segunda aquisição, dado que a barra de regulação está em uma posição em que sua curva é mais linear, foi realizada uma única extração

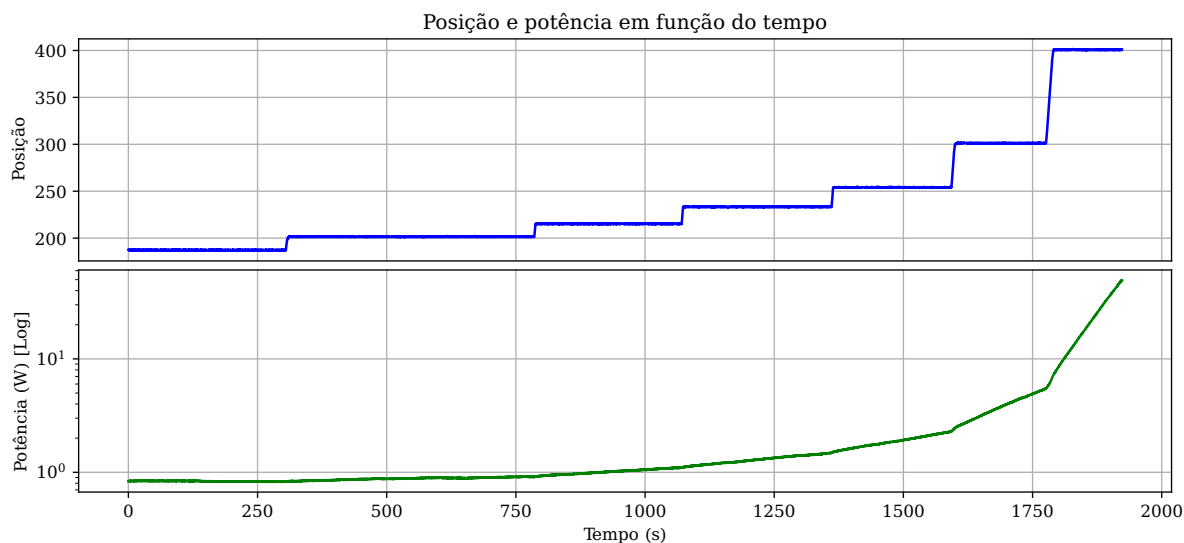


Figura 46 - Posição e potência em função do tempo para 1° aquisição.

de 300 posições. Como a potência após o tempo de espera estava se aproximando de 100 W a aquisição foi encerrada e a potência diminuída. O gráfico da segunda aquisição pode ser visto na Figura 47.

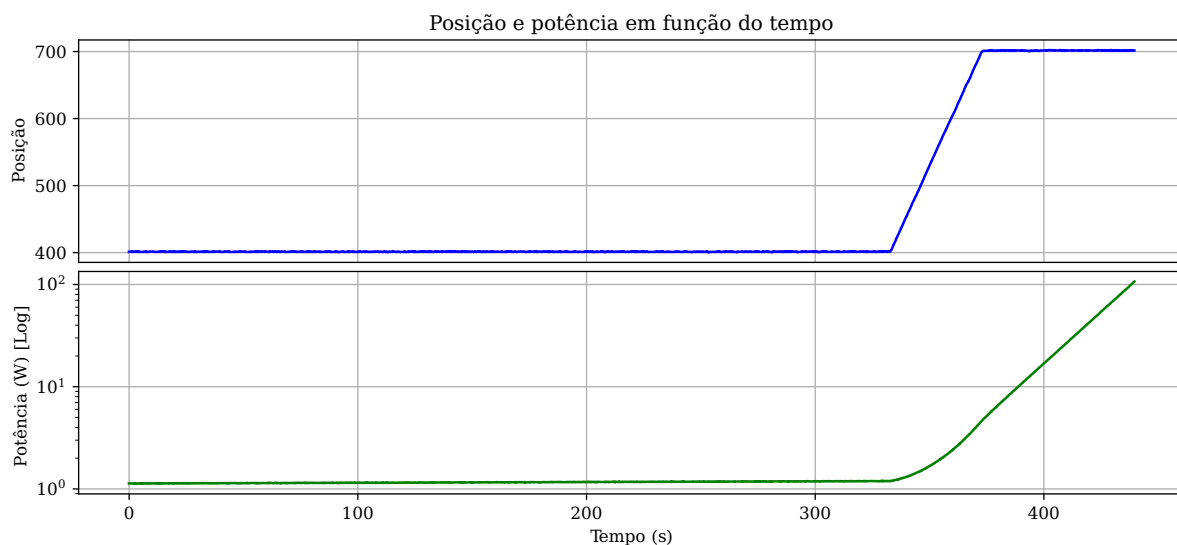


Figura 47 - Posição e potência em função do tempo para 2° aquisição.

Para a terceira aquisição, foram realizadas extrações cada vez menores, dado que estava chegando na posição mais extraída da barra, aonde a curva de reatividade foi mais acentuada. As posições foram 701, 800, 852, 880, 902, 923 e 940 (posição "superior"). O gráfico da terceira aquisição pode ser visto na Figura 48.

Neste experimento toda a extensão da barra foi percorrida, onde foi rea-

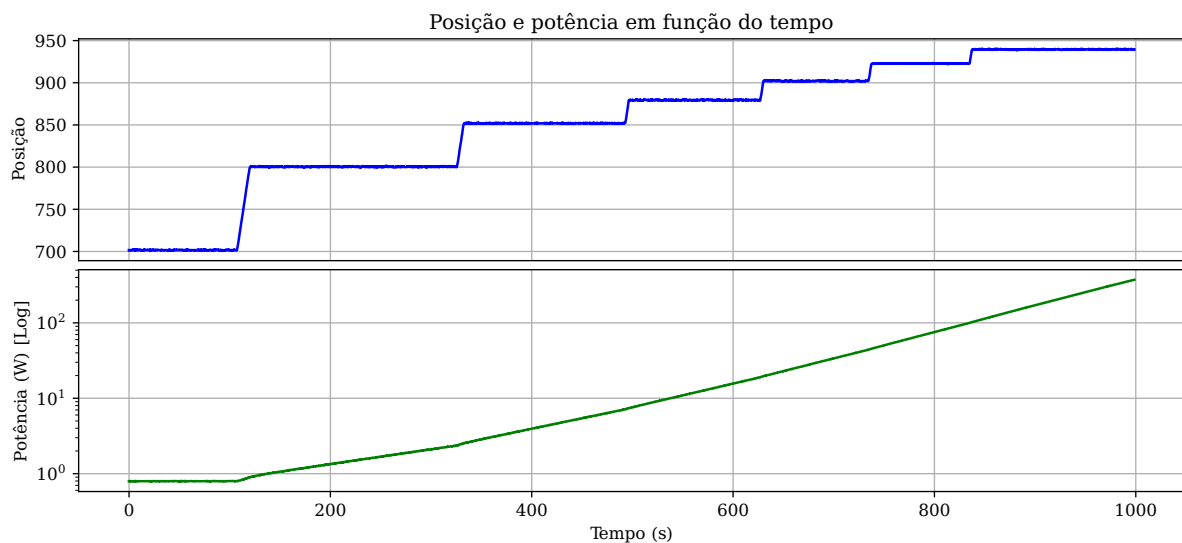


Figura 48 - Posição e potência em função do tempo para 3° aquisição.

lizado no total 13 passos de extração de barra, os quais foram divididos em 3 arquivos de aquisição de dados.

4.2.2 Processamento dos dados

O TrigaCalib foi executado passando como parâmetro os 3 arquivos de aquisição de dados gerados durante o experimento. Primeiramente o algoritmo identifica os tempos $t_{[N]}$ a partir dos dados no arquivo de aquisição de dados, e então separa os dados em janelas de tempo. O procedimento realizado pelo código para todos os passos de extração de barra será ilustrado para o 5° passo de extração do primeiro arquivo de aquisição. Os tempos $t_{[N]}$ identificados pelo algoritmo, para um t_a de 60s, são:

- $t_0 = 1364,18$: Fim do movimento de extração do 4° passo;
- $t_1 = 1424,13$: $t_0 + t_a$;
- $t_2 = 1593,10$: Início do movimento de extração da barra do 5° passo;
- $t_3 = 1599,27$: Fim do movimento de extração da barra do 5° passo;
- $t_4 = 1659,23$: $t_3 + t_a$;
- $t_5 = 1776,45$: Início do movimento de extração da barra do 6° passo.

Assim, dividindo os dados 5 janelas de tempo, as quais podem ser vistas na Figura 49.

Depois o código realiza o cálculo do valor médio para a posição da barra em calibração para as janelas 2 e 5, e também a regressão exponencial para a potência do reator nas mesmas janelas. O valores encontrados para o 5° passo de extração foi

$$\begin{aligned} r_2 &= 254,08 ; a_2 = 1,69 ; b_2 = 1,78 \cdot 10^{-3}; \\ r_5 &= 301,22 ; a_5 = 3,33 ; b_5 = 4,28 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

A curva gerada a partir da regressão exponencial pode ser vista também na Figura 49. Para enfatizar a importância da espera do tempo de acomodação de nêutrons atrasados, a curva da janela 5 foi estendida para janela 4, e a curva da janela 2 foi estendida para janela 1, e ainda, ambas foram estendidas para janela 3. Assim, é possível perceber principalmente pela diferença da curva gerada pela exponencial na janela 4, para a curva real da mesma janela, que se não o tempo de espera, o resultado da regressão seria diferente. Enquanto isso as mesmas curvas são idênticas na janela 5.

O próximo passo que o código realiza é calcular o período através da Equação (3.9), a reatividade através da Equação (3.3). Os valores referentes ao 5° passo são

$$\begin{aligned} T_2 &= 560,28 ; \rho_2 = 17,59; \\ T_5 &= 233,44 ; \rho_5 = 39,2. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Por fim, o código calcula os valores Δr e $\Delta \rho$ para cada passo pelas Equação (3.4) e Equação (3.10). Os valores encontrados referente ao 5° passo são

$$\begin{aligned} \Delta r &= 47,14; \\ \Delta \rho &= 21,6. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Todos os valores encontrados para as variáveis citadas referentes a cada respectivo passo, se encontram concatenados na Tabela 8.

Para cada passo realizado, é gerado uma pagina de PDF contendo uma tabela com os valores do respectivo passo, um gráfico similar a Figura 49. Todas as páginas geradas pelo TrigaCalib para esse experimento se encontra no Apêndice C.

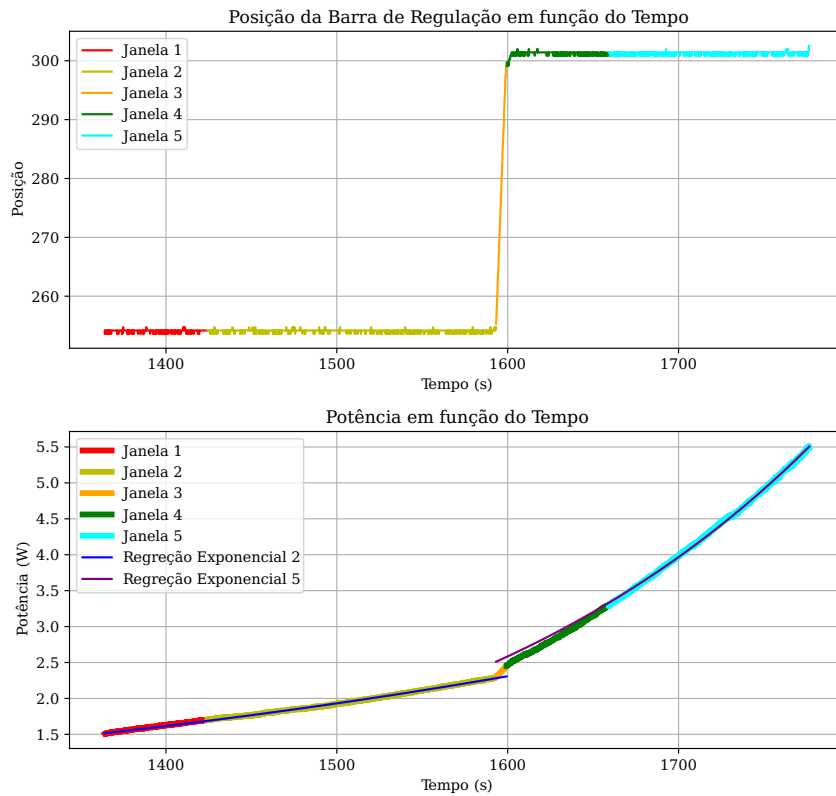


Figura 49 - Janelas de tempo e regressão exponencial referentes ao 5° passo de extração de barra.

*i	r_2	r_5	Δr	b_2	b_5	T_2	T_5	ρ_2	ρ_5	$\Delta\rho$
1	187.15	201.42	14.27	-8.10E-05	1.62E-04	-12341	6161.5	-0.85	1.69	2.54
2	201.42	215.29	13.87	1.62E-04	6.27E-04	6161.5	1595.51	1.69	6.41	4.72
3	215.29	233.29	18.01	6.27E-04	9.75E-04	1595.51	1025.68	6.41	9.86	3.44
4	233.29	254.08	20.79	9.75E-04	1.78E-03	1025.68	560.28	9.86	17.59	7.72
5	254.08	301.22	47.14	1.78E-03	4.28E-03	560.28	233.44	17.58	39.2	21.6
6	301.22	400.74	99.52	4.28E-03	1.41E-02	233.44	71.06	39.2	103	63.8
7	401.27	701.46	300.19	1.67E-04	4.67E-02	5991.63	21.41	1.72	221.61	219.87
8	701.58	800.44	98.86	2.61E-05	4.52E-03	38371	221.44	0.26	41.05	40.79
9	800.44	851.95	51.5	4.52E-03	6.38E-03	221.44	156.66	41.05	55.25	14.19
10	851.95	879.43	27.48	6.38E-03	7.18E-03	156.66	139.32	55.25	60.91	5.66
11	879.43	902.03	22.61	7.18E-03	7.70E-03	139.32	129.92	60.91	64.51	3.59
12	902.03	922.79	20.76	7.70E-03	8.04E-03	129.92	124.44	64.51	66.81	2.3
13	922.79	939.48	16.7	8.04E-03	7.87E-03	124.44	127.09	66.81	65.67	-1.12

Tabela 8 - Dados extraídos das janelas 2 e 5 de cada passo de extração.

*i é o número do passo; r é a posição da barra (adimensional); b é o expoente da exponencial (s^{-1}); T é o período (s); ρ é a reatividade (PCM).

O próximo passo realizado pelo programa é calcular todos os pontos correspondentes a curva integral de reatividade em função da posição. Para tal, todos os Δr e $\Delta\rho$ calculados e a Equação (3.12). Os pontos $(\Delta r, \Delta\rho)$ ge-

rados neste experimento são:

$$\begin{aligned}
 & (187,15 , 0); & (201,42 , 2,54); \\
 & (215,29 , 7,26); & (233,29 , 10,7); \\
 & (254,08 , 18,42); & (301,22 , 40,02); \\
 & (401,27 , 103,82); & (701,58 , 323,69); \\
 & (800,44 , 364,48); & (851,95 , 378,67); \\
 & (879,43 , 384,33); & (902,03 , 387,92); \\
 & (922,79 , 390,22); & (939,48 , 389,1),
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

o que significa que a reatividade total encontrada para a barra de regulação nesse experimento foi de 389,1 PCM, dado pela reatividade do ponto referente a posição “superior” da barra (aproximadamente 940).

Tais pontos são usados para calcular a regressão polinomial que gera a curva integral de reatividade em função da posição. Tal curva é plotada juntamente com os pontos que a geraram em uma pagina de PDF. Por fim o código concatena todas as páginas de PDF e sua execução é encerrada.

Na execução do TrigaCalib com os dados destes procedimentos, foi informado que se deseja uma regressão polinomial de 5° ordem, gerando a curva que pode ser vista na Figura 50, juntamente com os pontos descritos na Equação (4.6). Esta figura também está presente no Apêndice C, dado que faz parte do relatório final.

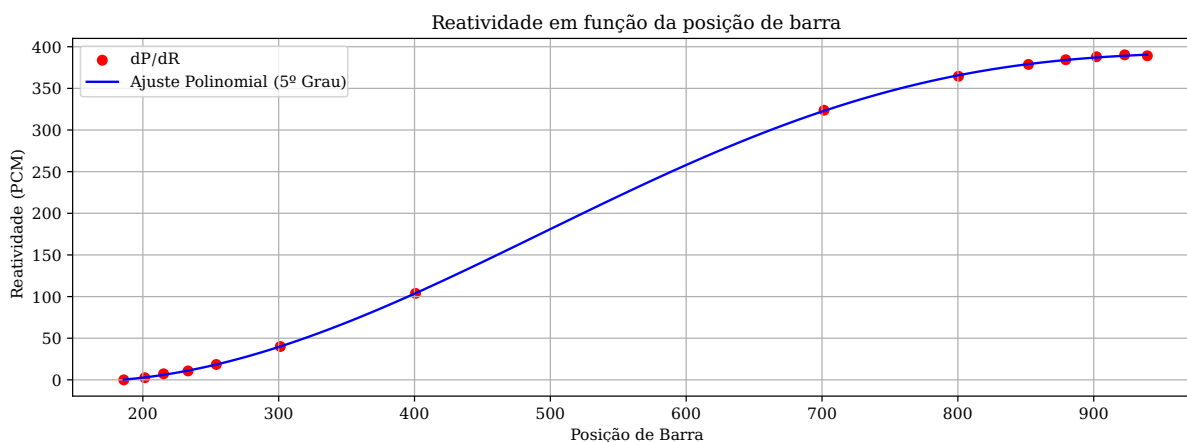


Figura 50 – Resultado final obtido neste trabalho: Curva integral de reatividade em função da posição da barra.

4.2.3 Comparação quantitativa

Para verificar a consistência do resultado, é possível comparar com os resultados do processo de calibração de anos anteriores, com a ressalva que a curva de reatividade pode sofrer alterações em função da queima do combustível. Foi fornecido pelo CDTN os resultados de (2009, 2010, 2018, 2022 e 2023), o qual nesse intervalo não teve modificações no núcleo do reator, como mudança na posição dos combustíveis. A reatividade total encontrada nesses anos foi de 409,2 (Prado Souza, 2009), 381,6 (Prado Souza, 2010), 410,1 (Prado Souza, 2018), 416,3 (Prado Souza, 2022), e 404,1 PCM (Prado Souza, 2023), com uma média de 404,26 PCM. Estes dados foram concatenados na Tabela 9, juntamente com o valor médio e o desvio padrão. Além disso, na mesma tabela foi apresentando o resultado obtido neste trabalho, e o desvio em relação a média dos resultados anteriores.

Resultados		Estatísticas (PCM)				Estatísticas (%)	
Referência	Reatividade total (PCM)	Média	Desvio	Variância	Desvio padrão	Desvio	Desvio padrão
2009	409,2		4,94			1,22	
2010	381,6		-22,66			-5,61	
2008	410,1	404,26	5,84	143,39	11,97	1,44	2,96
2022	416,3		12,04			2,98	
2023	404,1		-0,16			-0,04	
Este trabalho	389,1		-15,16			-3,75	

Tabela 9 - Estatística dos resultados anteriores e do produzido por este trabalho.

O maior desvio em relação a média e 22,66 PCM (5,61%), conforme pode ser visto na Tabela 9, logo o resultado produzido por este trabalho está abaixo do desvio máximo. O desvio padrão encontrado nos resultados anteriores foi de 11,97 PCM (2,96%), logo o desvio em relação a média do resultado produzido está acima do desvio padrão dos anos anteriores. Portanto, o trabalho produziu resultados similares aos anos anteriores, mas um pouco acima do desvio padrão. Maiores investigações são necessárias para descobrir qual resultado se aproxima mais da realidade.

É previsto como proposta futura deste trabalho o cálculo automático da propagação de incertezas no processo de calibração. A comparação com

uma estimativa da propagação de incertezas da metodologia anterior permitirá afirmar categoricamente se houve um ganho de precisão no uso da metodologia proposta, e qual o valor do ganho.

4.2.4 Comparação qualitativa

Para realizar uma comparação qualitativa, a curva integral da reatividade em função da posição encontrada neste trabalho foi plotada no mesmo gráfico das curvas dos anos anteriores. Para isso, as posições da barra de regulação foram traduzidas para o intervalo atual (posição mínima 186, posição máxima 940), dado que a barra de regulação sofreu manutenções ao longos dos anos, o que alterou os valores indicados no mínimo e máximo (por exemplo em 2023 a posição mínima era 150 e a posição máxima 900, o que também gera o mesmo intervalo de 754 posições diferentes). A curva gerada neste trabalho juntamente com a curva gerada pelos anos anteriores pode ser vista na Figura 51, ou em um tamanho maior na Figura 66 do Apêndice C.

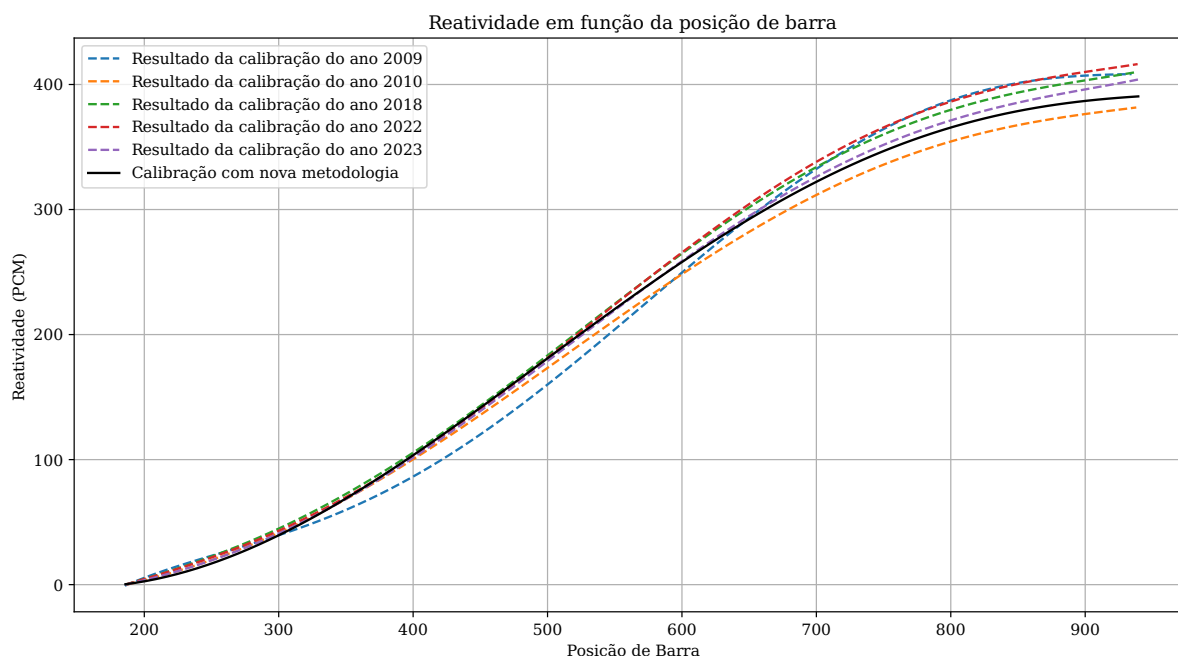


Figura 51 - Comparação da curva de calibração gerada por este trabalho com a dos anos anteriores.

Analisando a Figura 51 é possível concluir que a curva gerada por este trabalho está situada entre as curvas geradas pelos processos de calibração

dos anos anteriores.

Portanto é possível afirmar que a metodologia proposta é capaz de gerar resultados similares aos anos anteriores.

4.2.5 Discussões

Foi possível calcular a inserção de reatividade em uma extração de barra para o reator inicialmente não crítico. Foi possível também realizar vários passos de extração sucessivos, antes de abaixar a potência do reator. Estes dois fatos permitem reduzir consideravelmente o tempo do experimento, o qual demorou aproximadamente 1 hora para ser realizado, mesmo realizando 13 passos de extração. É possível reduzir ainda mais o tempo de experimento, se o operador esperar apenas o tempo mínimo entre cada passo de extração da barra, ou diminuindo a quantidade de passos.

Não foi calculado a propagação de incertezas, nem a influência de outras possíveis variáveis que podem interferir no processo como: a alteração no formato do fluxo no núcleo ao alterar posição barra de controle, a influência do efeito negativo de temperatura a medida quando a potência aumenta, a influência de ruídos nos sinais da potência e da posição da barra de controle, a influência do quantidade total de passos realizados, entre outras. Estes cálculos são fundamentais para saber quão preciso é o resultado gerado, e são previstos como continuação deste trabalho.

A comparação estatística considerou uma população muito pequena, apenas 5 elementos. Para análises mais precisas é necessário obter o resultado de mais anos anteriores, mas é possível afirmar que o resultado produzido neste trabalho se encontra abaixo do desvio máximo dos anos anteriores analisados. Entretanto, ao realizar uma comparação qualitativa, pode-se afirmar que o resultado obtido neste trabalho é semelhante ao dos anos anteriores.

Assim, a metodologia mostrou-se promissora, com potencial para substituir a abordagem atualmente empregada no reator.

Capítulo 5

Conclusão

Constata-se que o objetivo geral foi atendido porque o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados permitiu coleta de dados sem erro humano de medição e o desenvolvimento de um algoritmo computacional que processe os dados adquiridos sem intervenção humana para produzir o resultado de calibração de barras. Isso diminuiu significativamente a quantidade de pessoas necessárias no processo e o tempo total gasto no processo.

O objetivo específico de se conectar um dispositivo computacional a instrumentação do reator para realizar a conversão analógico-digital foi cumprido, bem como o de desenvolver um servidor de aquisição de dados. Usou-se um CLP para conectar as saídas de aquisição de dados analógicas existentes da instrumentação e realizar a conversão. E servidor foi capaz de obter simultaneamente dados do CLP e do novo SMFN enquanto transmite em tempo real para múltiplos clientes, podendo facilmente ser estendido a leitura simultânea mais sistemas. Complementar aos servidores, foi desenvolvido um programa cliente com interface gráfica para obter os dados.

Foram atingidos também os objetivos específicos de desenvolver um procedimento experimental de calibração de barras que utilize o sistema de aquisição de dados, de desenvolver uma metodologia de cálculos para a calibração que possa ser implementada computacionalmente e o de desenvolver o algoritmo de calibração automatizada. O procedimento não requer criticalizar o reator a cada passo de extração da barra em calibração, além permite múltiplos passos de extração de barra, o que economiza tempo.

O algoritmo gera gráficos e tabelas contendo os resultados referentes a cada passo de extração, gera a curva integral de reatividade um função da posição, e repete a mesma curva em outro gráfico contendo os resultados anteriores para título de comparação. Para atingir tal objetivo, foi desenvolvida uma equação Hora Inversa, do inglês, *Inverse Hour (InHour)* que gera uma curva similar a curva do gráfico oficial do IPR-R1, permitindo realizar os cálculos computacionalmente.

Assim, a hipótese do trabalho é confirmada, dado que é possível reduzir o tempo necessário para calibração de barras e o número de pessoas envolvidas no experimento, a partir do procedimento experimental e metodologias de cálculos desenvolvidos, aliados a um sistema de aquisição de dados computacional e a implementação da metodologia computacionalmente.

5.1 Limitações e trabalhos futuros

Algumas limitações e dificuldades foram encontradas no desenvolver do trabalho. O circuito indicador de posição das barras de controle não possui saída de aquisição de dados, fazendo-se necessário realizar a aquisição do potenciômetro em paralelo com o circuito. O CLP e isoladores galvânicos são projetados para lerem valores de tensão em um intervalo diferente do intervalo de tensão de saída do potenciômetro das barras de controle, o que o reduziu a precisão da aquisição de dados.

A respeito da aquisição de dados da potência do reator, o novo SMFN instalado em 2023 no reator, por questões burocráticas, até hoje não obteve autorização para instalação de novos detectores na piscina do reator, inviabilizando o uso do mesmo no procedimento de calibração de barras, apesar da aquisição de dados do novo SMFN ter sido realizada com sucesso e o mesmo ter autorização de uso em pesquisa. Enquanto o atual SMFN possuem 2 canais adequados para o intervalo de potência do procedimento de calibração de barras, o canal linear e o canal logaritmo. Entretanto o canal linear não foi projetado com uma saída de aquisição de dados para qual escala está selecionada, inviabilizando seu uso. E como a calibração da re-

lação da potência lida pelo canal logarítmico não foi realizada através de uma calibração térmica do reator, ela teve de ser calibrada indiretamente através da saída para o indicador da mesa de controle, diminuindo a confiabilidade da potência lida.

As recomendações de trabalhos futuros são:

- Realizar a aquisição de dados dos potenciômetro da barra de controle com um C-AD ajustado para o intervalo de tensão do potenciômetro ou desenvolver um novo circuito indicador de posição das barras de controle com saída de aquisição de dados;
- Experimentar novos protocolos de comunicação para o CLP que possibilite aumentar a taxa de dados obtidos por segundo;
- Realizar a aquisição de dados dos dispositivos do SMAR através do servidor desenvolvido;
- Realizar a calibração do restante das variáveis analógicas lidas pelo CLP;
- Desenvolver uma maneira de realizar a aquisição da escala do canal linear pelo CLP;
- Realizar a aquisição da escala do canal de partida pelo CLP através da saída para escala remota;
- Calibrar a leitura da potência do sistema de aquisição de dados através da calibração térmica para maior precisão;
- Realizar a análise de incertezas de forma isolada para cada variável do processo de calibração de barras:
 - Incerteza de leitura da posição da barra e ruído no sinal;
 - Incerteza de leitura da potência dado o ruído no sinal;
 - Incerteza de leitura da potência dado uma super/sub compensação do detector câmara de ionização compensada;
 - Influência do efeito de temperatura de acordo com a potência;

- Influência da movimentação ou não da barra de controle que não está sendo calibrada;
 - Influência da quantidade de passos de extração;
 - Influência da taxa de amostragem utilizada para aquisição;
 - Influência do tempo de duração da janela de período estável;
 - Influência do tempo de acomodação de nêutrons atrasados utilizado;
 - Entre outras variáveis.
- Depois de isolada cada variável, desenvolver uma metodologia para automatizar a propagação de incertezas no processo de calibração e implementá-la no algoritmo desenvolvido. Assim, além do algoritmo apresentar o resultado de calibração, apresentar também a incerteza associada ao resultado a partir das condições dos dados de entrada fornecidos.

Referências

CDTN/CNEN. **30 anos de operação do reator Triga do CDTN - Um breve histórico**. Texto originalmente publicado no “Informe CDTN - Número 1”. Nov. 1990. Disponível em: https://www.ufmg.br/80anos/box_ipr.htm. Acesso em: 25 nov. 2024.

CDTN/CNEN. **Detectores são testados para atualização do reator TRIGA**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cdtm/pt-br/assuntos/noticias/detectores-sao-testados-para-atualizacao-do-reator-triga>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CDTN/CNEN. **Plano de Gestão do Envelhecimento para o Reator TRIGA IPR-R1**. Rev. 0. Belo Horizonte, MG, Brasil, nov. 2023.

CDTN/CNEN. **RELATÓRIO FINAL DE ANÁLISE DE SEGURANÇA DO REATOR TRIGA IPR-R1**. Rev. 0. Belo Horizonte, MG, Brasil, abr. 2022.

DUDERSTADT, James J.; HAMILTON, Louis J. **Nuclear Reactor Analysis**. [S. l.]: Wiley, 1976. ISBN 9788126541218.

MARETTI JÚNIOR, Fausto *et al.* General improvements of the IPR-R1 Triga Mark I reactor in 37 years of operations. *In*: CGEN Congresso geral de energia nuclear. [S. l.: s. n.], 1999.

MATTHIAS BARON HELMUTH BÖCK, Mario Villa; O’KELLY, S. **TRIGA Reactors (Safety and Technology)**. [S. l.: s. n.], 2005. Produced for the Nuclear Installation Safety Division of the IAEA, updated on 16 February 2005.

MERLJAK, Vid; TRKOV, Andrej; LENGAR, Igor. Comparison of Measured and Calculated Reactivity-Worth Curves of Control Rods in a TRIGA

Reactor. *In: 23RD International Conference Nuclear Energy for Europe.* [S. l.: s. n.], set. 2014.

PRADO SOUZA, Rose Mary Gomes do. **Resultados da Calibração das Barras de Controle, do Excesso de Reatividade, da Margem de Desligamento e do Defeito de Potência do TRIGA IPR-R1 - Núcleo com 63 E.C.** [S. l.], ago. 2010.

PRADO SOUZA, Rose Mary Gomes do. **Resultados dos Testes Neutrônicos no Reator TRIGA IPR-R1 à 100kW - Núcleo com 63 E. C.** [S. l.], set. 2009.

PRADO SOUZA, Rose Mary Gomes do. **Resultados dos Testes Neutrônicos Realizados no Reator TRIGA IPR-R1, em 2018 - Núcleo com 63 E. C.** [S. l.], mar. 2018.

PRADO SOUZA, Rose Mary Gomes do. **Resultados dos Testes Neutrônicos Realizados no Reator TRIGA IPR-R1, em 2022 - Núcleo com 63 E. C.** [S. l.], dez. 2022.

PRADO SOUZA, Rose Mary Gomes do. **Resultados dos Testes Neutrônicos Realizados no Reator TRIGA IPR-R1, em 2023 - Núcleo com 63 E. C.** [S. l.], out. 2023.

SNIIP-SYSTEMATOM. **Neutron Flux Monitoring System NFMS-01R: Operating Manual.** Ver. 0. Moscow, Russia, 2023.

TURSO, James A. Penn State University TRIGA Reactor Digital Reactivity Computer: Development and Testing. **Annals of Nuclear Energy**, Elsevier, v. 114, p. 561-568, 2018. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.12.046.

WALFIELD, Neal H; BRINKMANN, Marcus. A critique of the GNU Hurd multi-server operating system. **ACM SIGOPS Operating Systems Review**, ACM New York, NY, USA, v. 41, n. 4, p. 30-39, 2007.

Parâmetros de linha de comando

A.1 TrigaServer

Seguindo a filosofia Unix, o TrigaServer é executado e configurado pela linha de comando. Através dos parâmetros pré-definidos, é possível alterar as configurações padrão, sem a necessidade de recompilar o servidor. Estes parâmetros são:

- `--SPU_CHA`: Altera o caminho para o dispositivo de serial para comunicação com canal A da SPU;
- `--SPU_CHB`: Altera o caminho para o dispositivo de serial para comunicação com canal B da SPU;
- `--PLC_ADRESS`: Altera o IP e porta do PLC (formato IP:PORTA);
- `--PLC_CONV_FILE`: Altera caminho para arquivo de conversão das variáveis do PLC;
- `--PORT_RAW`: Altera a porta dedicada a receber conexões de clientes que desejam receber dados no formato RAW;
- `--PORT_CSV`: Altera a porta dedicada a receber conexões de clientes que desejam receber dados no formato CSV;
- `--PORT_JSON`: Altera a porta dedicada a receber conexões de clientes que desejam receber dados no formato JSON;

- `--INTERVAL_ERROR_SPU`: Altera o intervalo de tentativas de leitura em caso de erro de leitura em algum dos canais da SPU;
- `--INTERVAL_ERROR_PLC`: Altera o intervalo de tentativas de leitura em caso de erro de leitura do PLC;
- `--INTERVAL_MONITOR`: Altera o intervalo de tempo que o monitor do servidor será atualizado;
- `--monitor` ou `-m`: Exibe o monitor de estados na saída padrão ao invés de escrever no arquivo;
- `--version` ou `-v`: Exibe a versão executada;
- `--license` ou `-l`: Exibe a licença; e
- `--help` ou `-h`: Exibe esta lista de parâmetros.

As opções `-h`, `-l` e `-v` exibem uma mensagem no terminal e encerram a execução da aplicação sem iniciar os servidores ou conectar aos dispositivos. Já opção `-m` realiza o funcionamento normal do servidor, exibindo no terminal algumas informações úteis para diagnóstico, como os membros STATE de cada estrutura, entre outras informações relevantes. Quando o parâmetro `-m` não é utilizado, as mesmas informações são redirecionadas para um arquivo no diretório temporário: `/tmp/trigaserver.systemmonitor`. Logo, por padrão a saída padrão do servidor é desativada (não exibe mensagens linha de comando) já que ele foi feito para trabalhar de forma não monitorada, com exceção dos parâmetros citados anteriormente.

Como o TrigaServer foi feito ser executado de forma não monitorada, o *init* do sistema operacional pode ser facilmente configurado para iniciar automaticamente o TrigaServer com os valores adequados a cada parâmetro. Caso seja necessário verificar a situação do mesmo, basta exibir o conteúdo do arquivo temporário referente ao monitor de estados.

A.2 TrigaMirror

Da mesma maneira que o TrigaServer, o TrigaMirror é executado e configurado pela linha de comando. A lista de parâmetros é descrita abaixo:

- `--RAW`: Espelhar dados originalmente em formato RAW)
- `--CSV`: Espelhar dados originalmente em formato CSV)
- `--JSON`: Espelhar dados originalmente em formato JSON);
- `--ip` ou `-i`: IP do TrigaServer
- `--port` ou `-p`: Porta do TrigaServer
- `--tax` ou `-t`: Taxa de amostragem a solicitar ao TrigaServer
- `--mirror` ou `-m`: Porta TrigaMirror (se não especificada, mantém a mesma TrigaServer)
- `--log` ou `-g`: Salvar log de conexões recebidas
- `--sing` ou `-s`: Ativar criptografia
- `--version` ou `-v`: Mostrar a versão
- `--license` ou `-l`: Mostrar a licença
- `--help` ou `-h`: Mostrar esta lista de parâmetros

Como o TrigaMirror se conecta a apenas uma porta, e atualmente o TrigaServer possui 3 portas disponíveis, faz-se necessário executar 3 TrigaMirror para espelhar todos os tipos de dados diferentes (cada dado oriundo de uma porta). Mais de um TrigaMirror pode ser executado no mesmo computador, desde que sejam configurados para espelhar em portas diferentes, evitando conflito.

A.3 TrigaCalib

O TrigaCalib, assim como os outros código produzidos neste trabalho, é executado pela linha de comando e configurado através de parâmetros em sua execução. A lista de parâmetros é descrita abaixo:

- Argumentos posicionais: Nomes dos arquivos de aquisição de dados (formato CSV)
- `--calib` ou `-c`: Realizar calibração de uma única barra
- `--inter-calib` ou `-i`: Realizar inter-calibração das barras de segurança e de controle
- `--gpoly` ou `-g`: Permite selecionar o grau do polinômio da curva integral da reatividade em função da posição (padrão: 5)
- `--name` ou `-n`: Permite selecionar o nome do arquivo do relatório final (padrão: report.pdf)
- `--report` ou `-r`: Executar apenas os relatórios parciais
- `--test` ou `-t`: Executar em modo de teste (não precisa informar arquivos de entrada)
- `--license` ou `-l`: Exibir a licença
- `--version` ou `-v`: Exibir a versão
- `--help` ou `-h`: Exibir esta lista de parâmetros

Apêndice **B**

Detalhes de implementação

B.1 TrigaServer

B.1.1 Registro do tempo da aquisição de dados

Apesar do sistema de aquisição de dados ser em tempo real, na escala de tempo de milisegundos podem ocorrer atrasos na comunicação entre cliente e servidor, que podem se estender a segundos dependendo da situação momentânea da rede (intranet ou internet). Isso se deve ao protocolo usado (TCP/IP), o qual não foi projetado garantir uma taxa de recebimento constante dos pacotes enviados. Quando ocorre uma perda de pacote no meio do percurso, o pacote precisa ser re-enviado, o que garante o recebimento do pacote em detrimento de poder ocorrer atrasos. Logo, não é confiável deixar o registro de tempo por conta da aplicação cliente.

Uma forma de contornar essa limitação é o servidor registrar o instante de tempo que a aquisição foi realizada e o enviar para o cliente no mesmo pacote o que contem os dados adquiridos. Para registrar o instante de tempo foi usada a própria biblioteca de tempo disponível no *GNU/Linux* para a linguagem C++, a `<chrono>`, que faz parte da *GNU ISO C++ Library*. Esta biblioteca está licenciada sob a licença GPLv3, o que garante que o código é livre mas só pode ser incorporado em projetos GPLv3, que é o caso deste trabalho.

O tipo de dado da biblioteca `<chrono>` usado para registrar o instante de tempo é o `time_point`, que armazena quantas unidades de tempo que

transcorreram desde o *epoch* de um *clock* específico. O *epoch* usado pelo `system_clock` no GNU (derivado do Unix) é 1 de janeiro de 1970 00:00:00 UTC, conhecido como *Unix epoch*. A data e hora do tipo *time_point* pode ser facilmente convertida para outros formatos usando funções disponíveis na própria biblioteca.

B.1.2 Biblioteca para comunicação com o PLC

Para obter os dados do servidor OPC do TrigaPLC e processá-los usando a linguagem C++, faz-se necessário uma biblioteca que implemente o protocolo OPC na referida linguagem. Por sorte, está disponível de forma livre e gratuita a biblioteca `open62541pp`, que de acordo com sua documentação é definida como “Um *wrapper* em C++ da biblioteca OPC UA `open62541`”, que por sua vez define como “`open62541` é uma implementação de código aberto e gratuita da OPC UA (Arquitetura Unificada OPC) escrita no subconjunto comum das linguagens C99 e C++98”. Ambas estão licenciadas pela licença MPL-2.0 (Mozilla Public License v2.0), o que as tornam códigos livres.

Através do `nodeId` respectivo a cada variável do CLP, uma função da `libOpcTrigaPLC` (`PLC_DATA get_all()`) obtém todos os valores dos nodos e os salva em cada respectivo membro da estrutura `PLC_DATA`, definida na Tabela 10. Entretanto, os valores obtidos são do tipo inteiros sem sinal de 13 bits, que correspondem a um valor de tensão de 0 a 10 V, ou de -10 a 10 V, ou ainda um valor de corrente de 4 a 20 mA, como explicado em Seção 3.1.1. Portanto os mesmos precisam ser convertidos para as unidades de medidas adequadas, o que pode ser feito pela função `PLC_DATA convAllData(PLC_DATA plc)`, ou ainda, obtidos e convertidos em uma única operação pela função `PLC_DATA get_all_conv()`. O momento que a tentativa de leitura foi realizado é armazenado no membro `TIME`.

Todos os membros de `PLC_DATA` são inicialmente definidos com o valor -1. Caso a leitura seja bem sucedida, o membro `STATUS` é definido como 0 e o valor de todos os membros são atualizados. Caso ocorra uma falha na leitura de algum nodo, o membro `STATE` é definido com o valor 1 e os nodos

Membro	Tipo	Descrição
STATE	int	Status da leitura/conexão: -1 = Nenhuma tentativa de conexão realizada ainda 0 = Valores lidos com sucesso 1 = Erro de leitura 2 = Servidor desconectado / inalcançável
TIME	time_point	Instância de tempo que leitura foi realizada (ou da tentativa)
{...}	float	Todas as variáveis definidas no TrigaPLC com o mesmo nome, sem o prefixo "in"

Tabela 10 - Membros da struct PLC_DATA.

são parcialmente atualizados (somente até o nodo anterior ao erro). Caso não seja possível conectar ao PLC, o membro STATE é definido como 2 e nenhum membro é atualizado, com exceção do membro TIME, que portanto irá indicar o tempo que a tentativa foi realizada.

Analisando o histórico de operação do reator a partir do TrigaServer, o membro STATE juntamente com o membro TIME permitem saber em que momento a mesa de controle foi ligada/desligada, já que a alimentação do PLC está conectado a mesma, como explicado na Seção 3.1.1.

B.1.3 Conversão dos valores lidos pelo PLC

O sinal de tensão ou corrente lidos pelo PLC representam valores em outras unidades de medida, como potência (W, kW, %), vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), entre outros. Além disso, algumas saída de sinais não são lineares, como é o caso das aquisições logarítmica, período, e reatidade. O PLC poderia facilmente ser configurado para entregar os sinais lineares já convertidos na unidade de medida adequada, e com algumas linhas de código poderia ser programado para converter os outros sinais também. Entretanto, para realizar qualquer alteração na configura da calibração, o PLC precisaria ser reprogramado.

Para facilitar a alteração da configuração de calibração, foi transferida para a libOpcTrigaPLC a responsabilidade de converter as variáveis para as unidades de medida adequadas. Para tal, foi criado um modelo de arquivo de calibração e implementado a capacidade da libOpcTrigaPLC de

interpreta-lo para obter os coeficientes de calibração, conforme exemplo abaixo (conversão linear):

```
[NOME]
x0 = VALOR1
x1 = VALOR2
y0 = VALOR3
y1 = VALOR4
```

Onde NOME corresponde ao nome da variável, e os valores VALOR* correspondem a 2 pontos de uma reta de conversão. A formula usada para a conversão é

$$f(x) = x * \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} + \frac{y_0 * x_1 - y_1 * x_0}{x_1 - x_0}, \quad (\text{B.1})$$

onde x é o valor lido pelo PLC e f é o resultado da conversão.

Enquanto, o modelo para conversão de sinais logaritmos é parecido, mas ao invés de x_0 x_1 , y_0 e y_1 , são definidos os coeficientes A e B de uma potência de 10. A formula usada para conversão é

$$g(y) = A * 10^{By}, \quad (\text{B.2})$$

onde y é o valor lido pelo PLC e g é o resultado da conversão.

Não foram implementados métodos de conversão de sinais para as saídas de aquisição de período e reatividade neste trabalho, devido que não serão necessários na metodologia desenvolvida para a calibração de barras.

B.1.4 Biblioteca para comunicação com a SPU

Para obter os dados da SPU e processa-los usando a linguagem C++, faz-se necessário uma biblioteca que implemente o protocolo Modbus-RTU na referida linguagem. Por sorte, está disponível de forma livre e gratuita a biblioteca libmodbus, que de acordo com sua documentação “é uma biblioteca Modbus de código aberto, rica em recursos e portátil”. A mesma está licenciada sob a LGPL-2.1, o que a torna um código livre.

Através dos endereços definidos na Tabela 2 a biblioteca libModbusSystematomSPU através da função SPU_DATA get_all() obtém todos os valores armazenados nos endereços e os salva em cada respectivo membro da estrutura SPU_DATA, definida na Tabela 11. Os valores obtidos são de mesmo

respectivo tipo dos membros da estrutura, portanto não precisam ser convertidos. O momento que a tentativa de leitura foi realizado é armazenado no membro TIME da mesma forma que a libOpcTrigaPLC.

Membro	Tipo	Descrição
STATE	int	Status da leitura/conexão: -1 = Nenhuma tentativa de conexão realizada ainda 0 = Valores lidos com sucesso 1 = Erro de leitura 2 = Erro de contexto modbus
TIME	time_point	Instância de tempo que leitura foi realizada (ou da tentativa)
{...}	float ou int	Todas as variáveis definidas no manual do fabricante da SPU com o mesmo nome e mesmo respectivo tipo

Tabela 11 - Membros da struct SPU_DATA.

Todos os membros de SPU_DATA também são inicialmente definidos com o valor -1 , e o membro STATUS é definido de forma análoga ao mesmo na libOpcTrigaPLC.

B.1.5 Formato dos dados de envio

Como uma forma de simplificar o desenvolvimento de aplicações clientes, é disponibilizado o formato denominado como RAW, o qual não precisa de conversão de dados. Foi criada a estrutura nomeada como *ALL_DATA*, definida na Tabela 12, para armazenar todos os dados contidos nas estruturas citadas anteriormente. O formato consiste nos bytes armazenados na memória RAM referentes ao objeto declarado com tipo dessa estrutura. Os bytes são simplesmente empacotados e enviados via rede.

Nome	Tipo	Descrição
PLC	PLC_DATA	Atributo para armazenar os dados lidos do PLC
SPU_CHA	SPU_DATA	Atributo para armazenar os dados lidos do canal A da SPU
SPU_CHB	SPU_DATA	Atributo para armazenar os dados lidos do canal B da SPU

Tabela 12 - Estrutura de dados ALL_DATA.

Assim, um usuário que deseje desenvolver sua própria aplicação cliente, pode simplesmente armazenar os bytes recebidos com formato RAW diretamente na memória RAM, em um local que corresponda a um objeto do

tipo *ALL_DATA*. Primeiro o servidor envia o tamanho da estrutura para que o cliente saiba quantos bytes espera receber. A partir de então o servidor passa a enviar o pacote contendo os bytes atuais da estrutura.

Os dados enviados por meio do fluxo de texto representam facilidades para os usuários dependendo da aplicação que os usuários utilizarem para importar os dados. Várias aplicações de planilhas, de computação científica, entre outros, tem a capacidade de importar dados em formato CSV e JSON. Caso seja desejado desenvolver sua própria aplicação que trabalhe com os fluxos de texto, existem bibliotecas prontas (dependendo da linguagem escolhida) para ajudar a desenvolver os algoritmos para interpretar o fluxo de texto.

Para a conversão em fluxo de texto foi desenvolvida a função `genString()`. Ela retorna uma única *string* que contem todo o fluxo de texto no formato solicitado. Os dados do tipo *int* são simplesmente convertidos para *string*. Os dados do tipo *float* estão configurados para serem truncados em 5 casas decimais, quando é o caso. Por outro lado, os dados do tipo *time_point*, são convertidos para valores inteiros, separados em ano, mês, dia, hora, minuto, segundo e milissegundos.

O formato CSV consiste de uma linha cabeçalho contendo os títulos de cada coluna separados por um caractere determinado, e as linhas subsequentes com os respectivos valores separados pelo mesmo caractere. Normalmente é usado a vírgula como separador, mas pode igualmente ser o caractere ponto, espaço, ponto e virgula, entre outros. Neste trabalho é usado o ponto e virgula ao invés da virgula, de forma a evitar incompatibilidades na hora de importação com o *locale* em português brasileiro, considerando que virgula é usada como separador decimal. Os títulos das colunas são então preenchidos com os nomes das variáveis, e este representa sempre o primeiro pacote enviado ao cliente, quando escolhido este formato. Cada pacote enviado subsequentemente representa uma linha contendo todos os respectivos valores das variáveis.

O formato JSON é de mais fácil leitura por humanos. Consiste de chaves e valores separados pelo caractere dois pontos, agrupados por um par

de caractere colchete. As chaves são do tipo `string` e portanto devem estar entre aspas, já os valores podem ser dos mais diversos tipos. Neste trabalho as chaves são definidas então com os nomes das variáveis, e os tipos dos valores podem ser `int` ou `float`. Cada pacote enviado consiste em um arquivo JSON completo, contendo todas as chaves com seus valores correspondendo aos atuais valores das variáveis adquiridas.

O nome das colunas do formato CSV e das chaves do formato JSON segue o formato `[dispositivo]_[variável]`. Podendo `[dispositivo]` ser: `SPU_CHA` para o canal A da SPU, `SPU_CHB` para o canal B da SPU, `PLC_ORIG` para PLC com valores originalmente recebidos e `PLC_CONV` para o PLC com os valores convertidos para as unidades de medidas adequadas. E `[variável]` sendo conforme definido na Tabela 3 e Tabela 2, com exceção da variável `TIME`, que foi separada em: `TIME_Y` representando o ano, `TIME_Mo` representando o mês, `TIME_D` representando o dia, `TIME_H` representando a hora, `TIME_Mi` representando o minuto, `TIME_S` representando o segundo e `TIME_MS` representando milissegundo que foi realizada a aquisição de dados.

B.1.6 Servidor TCP/IP

O TrigaServer é um servidor TCP/IP, logo ele precisa disponibilizar pelo menos uma porta em modo de escuta para poder receber a conexão dos clientes. Mas disponibilizando mais de uma porta em modo de escuta, elas podem ser usadas como uma maneira de escolher o tipo de dado a ser enviado. Como o TrigaServer foi desenvolvido para enviar os dados no formato JSON, CSV ou RAW, são disponibilizadas 3 portas para conexão.

Quando o cliente se conecta a determinada porta do servidor, ele passa a aguardar o recebimento de um pacote contendo o valor da taxa de amostragem em milissegundos (em formato de fluxo de texto). Após este pacote ser recebido pelo servidor, ele se limita a enviar os dados continuamente na taxa de amostragem solicitada, usando formato correspondente a porta a qual o cliente iniciou a conexão. Ou seja, ele passa a ignorar qualquer nova mensagem que seja enviada pelo cliente.

B.1.7 *Threads* e gerenciamento de memória

A divisão das tarefas em *threads* faz-se necessário pois é necessário comunicar simultaneamente com vários dispositivos externos em taxa de amostragens diferentes, para realizar a aquisição de dados. Ao mesmo tempo, é preciso enviar o fluxo de texto para os clientes, cada um com sua respectiva taxa de amostragem solicitada. O uso de *threads* permite utilizar mais do poder computacional disponível no processador, distribuindo as *threads* em vários núcleos, além de permitir a execução de tarefas de forma assíncrona, tudo isso sendo gerenciado pelo *kernel* do sistema operacional (no desenvolvimento deste trabalho está sendo utilizado o *kernel* Linux).

A *thread* principal (main) é responsável inicialmente por instanciar as variáveis globais, iniciar as *threads* de leitura e a *threads* dos servidores TCP/IP. As *threads* dos servidores são responsáveis por iniciar a *thread* de recebimento de solicitação de taxa de amostragem para cada cliente conectado, que por sua vez são responsáveis por iniciar a *thread* individual de envio para cada cliente. A descrição de todas as *threads* pode ser vista na Tabela 13.

Thread	Função
main	- Criar as threads: plcThread, spuChAThread, spuChBThread, serverRawThread, serverCsvThread e serverJsonThread - Registrar o log de eventos
plcThread	Leitura do PLC (libOpcTrigaPLC)
spuChAThread	Leitura do canal A da SPU (libModbusSystematomSPU)
spuChBThread	Leitura do canal B da SPU (libModbusSystematomSPU)
serverRawThread	- Aguardar a conexão de algum cliente
serverCsvThread	- Criar uma clientThread para o cliente informando-a o tipo de dado a ser enviado
serverJsonThread	
clientThread	- Receber do cliente a taxa de amostragem desejada - Criar uma clientThreadSend informando-a o tipo de dado e a taxa de amostragem - Se matar
clientThreadSend	Gerar e enviar o fluxo de texto para o cliente (ou enviar os dados binários direto da memória RAM)

Tabela 13 - Descrição das *threads* do TrigaServer

As *threads* de leitura escrevem na memória RAM (armazenando os novos dados lidos, mas sobrescrevendo a leitura anterior), enquanto as *threads* de

clientes leem da memória RAM (os dados atualmente armazenados). Como as *threads* são assíncronas, pode ocorrer de alguma *thread* tentar escrever em uma variável ao mesmo tempo em que outra está tentando ler, gerando problemas de concorrência, como corrupção de dados ou resultados inesperados. Uma maneira de contornar isso é garantindo a atomicidade das operações, ou seja, que a operação seja executada de forma indivisível, sem interrupção ou interferência de outras operações durante sua execução.

Para realizar compartilhar valores entre as *threads*, mas garantindo que as operações de leitura e escrita sejam realizadas de forma atômica na memória RAM, foi utilizado o ponteiro compartilhado atômico `std::atomic<std::shared_ptr<T>>`, onde T se refere ao tipo primitivo de dado usado. O `std::shared_ptr<T>` é um tipo de ponteiro inteligente que gerencia a memória de um objeto de maneira automática, mantendo uma contagem de referências compartilhada. Quando o último `shared_ptr` que aponta para um objeto é destruído, o objeto é automaticamente desalocado, no entanto ele não é atômico por padrão. Isso significa que, se várias *threads* estão tentando modificar ou acessar o mesmo `shared_ptr`, pode haver problemas de concorrência. Então, o uso do `std::atomic<std::shared_ptr<T>>` permite garantir que essas operações de leitura, escrita e modificação do `shared_ptr` sejam realizadas de forma atômica.

Para transferir todos os dados responsável por uma *thread* a outra, em uma única operação, são declarados globalmente ponteiros compartilhados atômicos do tipo das estruturas de dados definidas em Seção B.1.2 e Seção B.1.4, isto é:

- 1 `std::atomic<std::shared_ptr<PLC_DATA>>` para o PLC;
- 1 `std::atomic<std::shared_ptr<SPU_DATA>>` para o canal A da SPU;
- 1 `std::atomic<std::shared_ptr<SPU_DATA>>` para o canal B da SPU.

Em cada uma *threads* de leitura é definido localmente seu respectivo ponteiro compartilhado, conforme a lista abaixo. Quando o ponteiro compartilhado local é preenchido com os dados, ele é imediatamente armazenado no ponteiro global usando o método `store()` do `std::atomic<std:`

:shared_ptr<T>>. Cada uma das *threads* fica em loop realizando esse processo, enquanto o TrigaServer estiver sendo executado. As *threads* não limitam a taxa de amostragem da aquisição de dados, sendo a taxa máxima atingida dependendo das características da conexão utilizada.

- plcThread: std::shared_ptr<PLC_DATA> para receber os dados de libOpcTrigaPLC::get_all() do objeto plc;
- spuChAThread: std::shared_ptr<SPU_DATA> para receber os dados de libModbusSystematomSPU::get_all() do objeto spuChA; e
- spuChBThread: std::shared_ptr<SPU_DATA> para receber os dados de libModbusSystematomSPU::get_all() do objeto spuChB.

Em cada um das *threads* para envio dos dados para os clientes são declarados os seguintes ponteiros compartilhados locais para receber os dados dos ponteiros globais, conforme lista abaixo. Ela é programada para cada intervalo (taxa de amostragem solicitada pelo usuário) enviar todos os dados convertidos, para o tipo de formato solicitado pelo cliente (através de qual porta ele se conectou).

- 1 std::shared_ptr<PLC_DATA> para receber os dados de seu respectivo ponteiro global (PLC);
- 1 std::shared_ptr<SPU_DATA> para receber os dados de seu respectivo ponteiro global (SPU Canal A); e
- 1 std::shared_ptr<SPU_DATA> para receber os dados de seu respectivo ponteiro global (SPU Canal B);

Assim, todos os dados adquiridos são retransmitidos em tempo real para cada um dos clientes conectados. A Tabela 14 mostra o fluxo de dados entre as variáveis do TrigaServer, bem como das conexões com os dispositivos externos, permitindo compreender melhor o funcionamento do programa de forma assíncrona.

Thread responsável				
plcThread ¹ spuChAThread ² spuChBThread ³			clientThreadSend[N]	
Conexão (Protocolo)	Nome da variável (Tipo)			Conexão (Formato)
PLC (OPC UA)	→ data_local ¹ (PLC_DATA*) →	data_global_plc (PLC_DATA**)	data_local_plc (PLC_DATA*)	Cliente 1 (RAW/CSV/JSON)
SPU Canal A (Modbus RTU)	→ data_local ² (SPU_DATA*) →	data_global_spuCh[0] (SPU_DATA**)	→ data_local_spuChA (SPU_DATA*) →	
SPU Canal B (Modbus RTU)	→ data_local ³ (SPU_DATA*) →	data_global_spuCh[1] (SPU_DATA**)	data_local_spuChB (SPU_DATA*)	
Legenda:			...	
→	Indica o sentido do fluxo de dados			
*	Variável local do tipo std::shared_ptr<T>			
**	Variável global do tipo std::atomic<std::shared_ptr<T>>			
			data_local_plc (PLC_DATA*) data_local_spuChA (SPU_DATA*) → data_local_spuChB (SPU_DATA*)	Cliente N (RAW/CSV/JSON)

Tabela 14 – Fluxo de dados entre as variáveis do TrigaServer.

De acordo com a lógica atual, se um cliente necessitar alterar a taxa de amostragem em que recebe os dados, é necessário reconectar-se para informar a nova taxa de amostragem desejada. Isso se deve-se aos *threads* do tipo “clientThread”, conforme pode ser visto na Tabela 13, são programadas para se encerrarem (*kill*, ou seja, o kernel interrompe sua execução de maneira controlada) depois de recebido o pacote informando a taxa de amostragem desejada. Uma vez morta, qualquer mensagem enviada pelo cliente é ignorada. A *thread* poderia facilmente ser reprogramada para, ao invés de se encerrar, ser responsável por receber solicitações de alteração da taxa de amostragem de envio do respectivo cliente.

B.2 TrigaMirror

B.2.1 Threads

Analogamente ao TrigaServer, o TrigaMirror possui uma *thread* de recebimento e outra de envio. E os dados são trocados entre as *threads* também por ponteiro inteligente atômico, mas seu tipo primitivo é string. Seu funcionamento é mais simplificado, pois o mesmo não precisa suportar protocolos de diferentes dispositivos, ou converter dados.

A *thread* de recebimento é programada para: conectar-se ao TrigaServer na porta especificada; enviar o pacote contendo a taxa de amostragem; e então entrar em um loop eterno onde se salva cada pacote recebido no ponteiro inteligente atômico com o tipo string, o sobrescrevendo a cada novo recebimento. Se o tipo de dado estiver configurado para CSV, ele salva o primeiro pacote recebido em uma variável separada, pois este é o cabeçalho. Se o tipo for em formato RAW, ele também salva o primeiro pacote separado, pois este contém o tamanho da estrutura.

Para receber as conexões dos clientes, uma *thread* fica responsável pelo servidor TCP/IP em uma porta especificada. Quando um cliente se conecta, ele cria uma *thread* de envio, que fica responsável por: aguardar o cliente enviar o pacote contendo a taxa de amostragem desejada e se dados precisam ser enviados de forma criptografada; enviar o pacote atualmente salvo no ponteiro inteligente atômico para o cliente, criptografando se necessário, na taxa de amostragem especificada, até que o cliente se desconecte. Caso o formato seja CSV, enviar primeiramente o pacote contendo o cabeçalho. E caso o formato seja RAW, enviar primeiramente o pacote contendo o tamanho. Desta forma, cada cliente possui sua própria *thread*, que só existe enquanto ele estiver conectado.

B.2.2 Criptografia

Considerando a possibilidade de tornar público o acesso em tempo real dos dados do reator, ou seja, acesso público pela internet ao TrigaMirror, foi implementado a capacidade do envio de dados de forma criptografada (assinatura digital). Isso se faz necessário para garantir a integridade das informações transmitidas, já que os dados transmitidos via internet podem ser interceptados e alterados.

Existe um tipo de criptografia chamada de assimétrica, a qual a chave usada para encriptar a informação tem tamanho diferente da usada para desencriptar. Desta forma, a chave para desencriptar a informação pode ser tornada pública, logo qualquer um com a chave pública conseguirá obter a informação original, enquanto a chave usada para encriptar a informa-

ção deve permanecer sigilosa, garantindo assim que apenas quem detém a chave privada consegue gerar os dados encriptados. Esse processo é conhecido como assinatura digital.

A biblioteca usada para criar as chaves e realizar a encriptação é a OpenSSL, a qual é licenciada sob Apache-2.0 (Apache License Version 2.0), o que garante que é um código livre, podendo ser incorporada ao projeto. Foi criada a função `signMessage()` para realizar a criptografia dos dados. Ela é programada para dividir o bloco a ser enviado em vários blocos menores, e depois usa a OpenSSL com chave privada para realizar a criptografia de cada bloco. Ele precisa ser dividido, pois no tipo algoritmo de criptografia utilizado e tamanho de chave, é possível criptografar um bloco de até 63 bytes por vez, o que independente do tamanho do bloco de entrada gerará um bloco criptografado de 256 bytes. Então, todos os blocos criptografados são agrupados e enviados para o cliente como um único pacote. Esse processo é repetido indefinidamente, respeitando a taxa de amostragem solicitada, até que o cliente se desconecte.

Relatório de calibração

A linha de comando usada para gerar o relatório de calibração com o TrigaCalib e os arquivos de aquisição de dados gerados no experimento realizado para este trabalho, foi:

```
$ python trigaCalib.py -c -g 5 delta_variado_multi_degraus/*
```

a qual pode ser interpretada como:

- `python trigaCalib.py`: referente a execução *script* “trigaCalib.py” através do interpretador *python*;
- `-c`: o parâmetro indicando que se deseja calibrar 1 barra;
- `-g 5`: o parâmetro indicando a regressão polinomial a ser realizada na curva integral deve ser de 5° grau.
- `delta_variado_multi_degraus/*`: o pseudo-parâmetro indicando que deseja passar como parâmetro todos os arquivos contidos na pasta “delta_variado_multi_degraus”. A qual contém os arquivos:
 - “resultados_2024-08-13-18-49-13.csv”
 - “resultados_2024-08-19-17-05-40.csv”
 - “resultados_2024-08-19-17-27-52.csv”

Cada imagem que vem a seguir corresponde a 1 página PDF do relatório gerado. O tamanho original das páginas corresponde ao padrão “A4”, mas elas são redimensionadas para caber nas margens deste anexo.

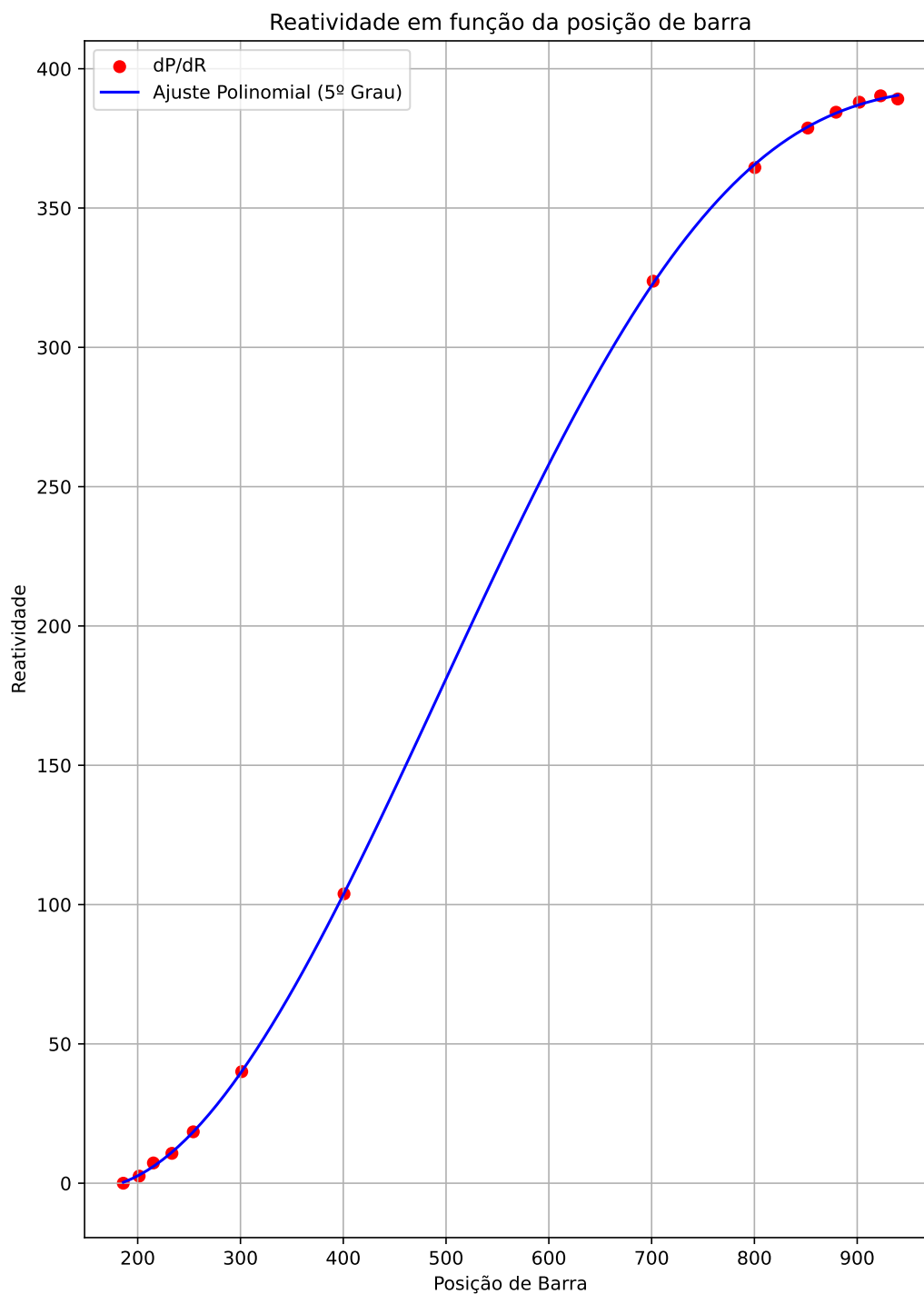


Figura 52 - Página 1 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 1 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	187.15
Posição Final da Barra de Regulação:	201.42
Delta da Posição da Barra de Regulação:	14.27
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	-0.850917676769099
Reatividade Final Encontrada (PCM):	1.6896593279271075
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	2.5405770046962064
Período Inicial Encontrado (s):	-12341.72
Período Final Encontrado (s):	6161.50
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[0.840451322652858, -8.102597654461014e-05]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[0.8548454827227351, 0.00016229802971245354]
Janela de tempo 1 (s):	[-0.11, 59.81]
Janela de tempo 2 (s):	[59.92, 304.97]
Janela de tempo 3 (s):	[305.07, 306.55]
Janela de tempo 4 (s):	[306.66, 366.54]
Janela de tempo 5 (s):	[366.65, 785.94]

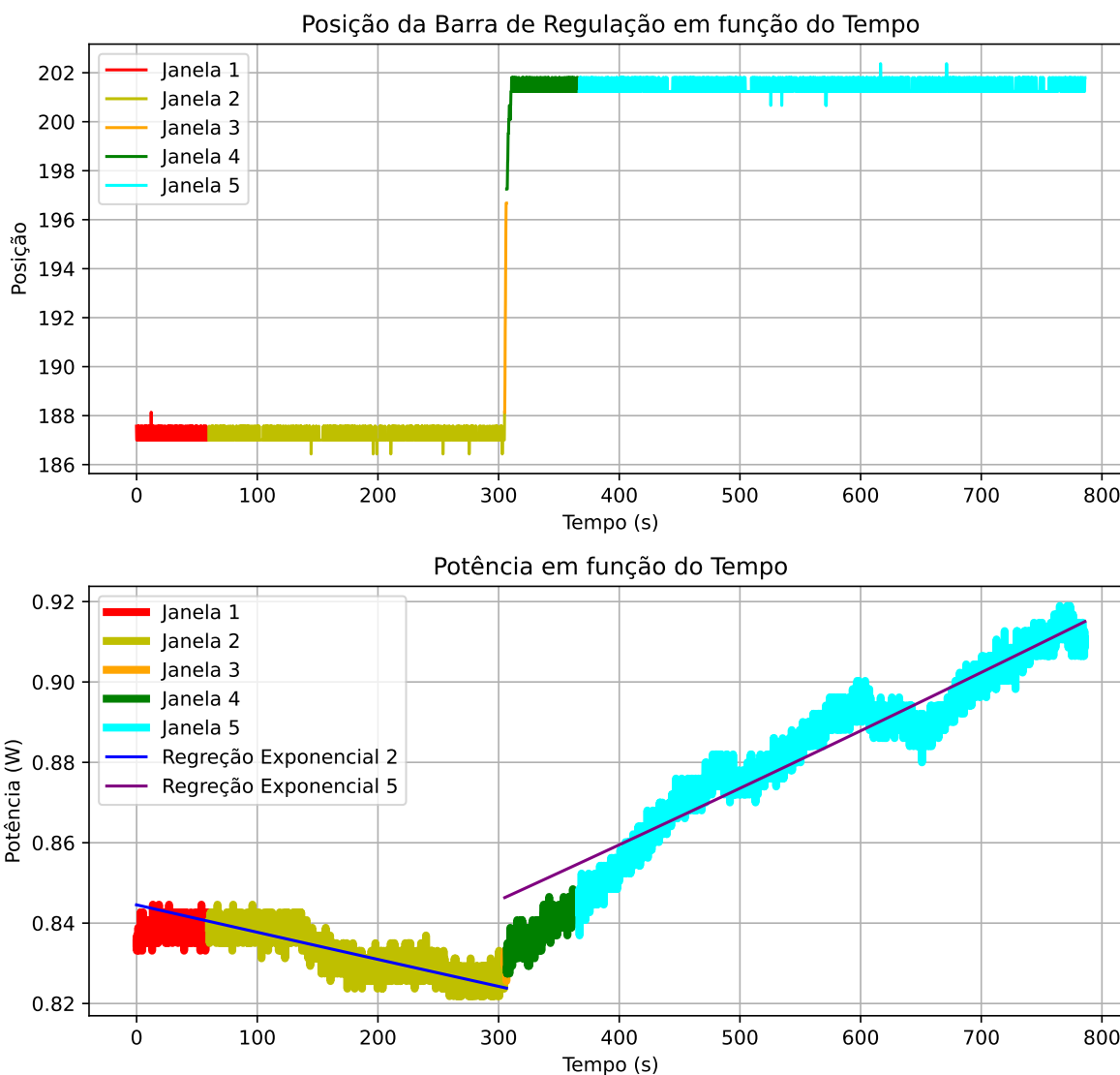


Figura 53 - Página 2 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 2 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	201.42
Posição Final da Barra de Regulação:	215.29
Delta da Posição da Barra de Regulação:	13.87
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	1.6896593279271075
Reatividade Final Encontrada (PCM):	6.42022974499444
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	4.730570417067333
Período Inicial Encontrado (s):	6161.50
Período Final Encontrado (s):	1595.51
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[0.8548454827227351, 0.00016229802971245354]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[0.9584870810413892, 0.0006267600985026452]
Janela de tempo 1 (s):	[306.55 , 366.54]
Janela de tempo 2 (s):	[366.65 , 785.94]
Janela de tempo 3 (s):	[786.05 , 787.97]
Janela de tempo 4 (s):	[788.08 , 847.90]
Janela de tempo 5 (s):	[848.01 , 1071.16]

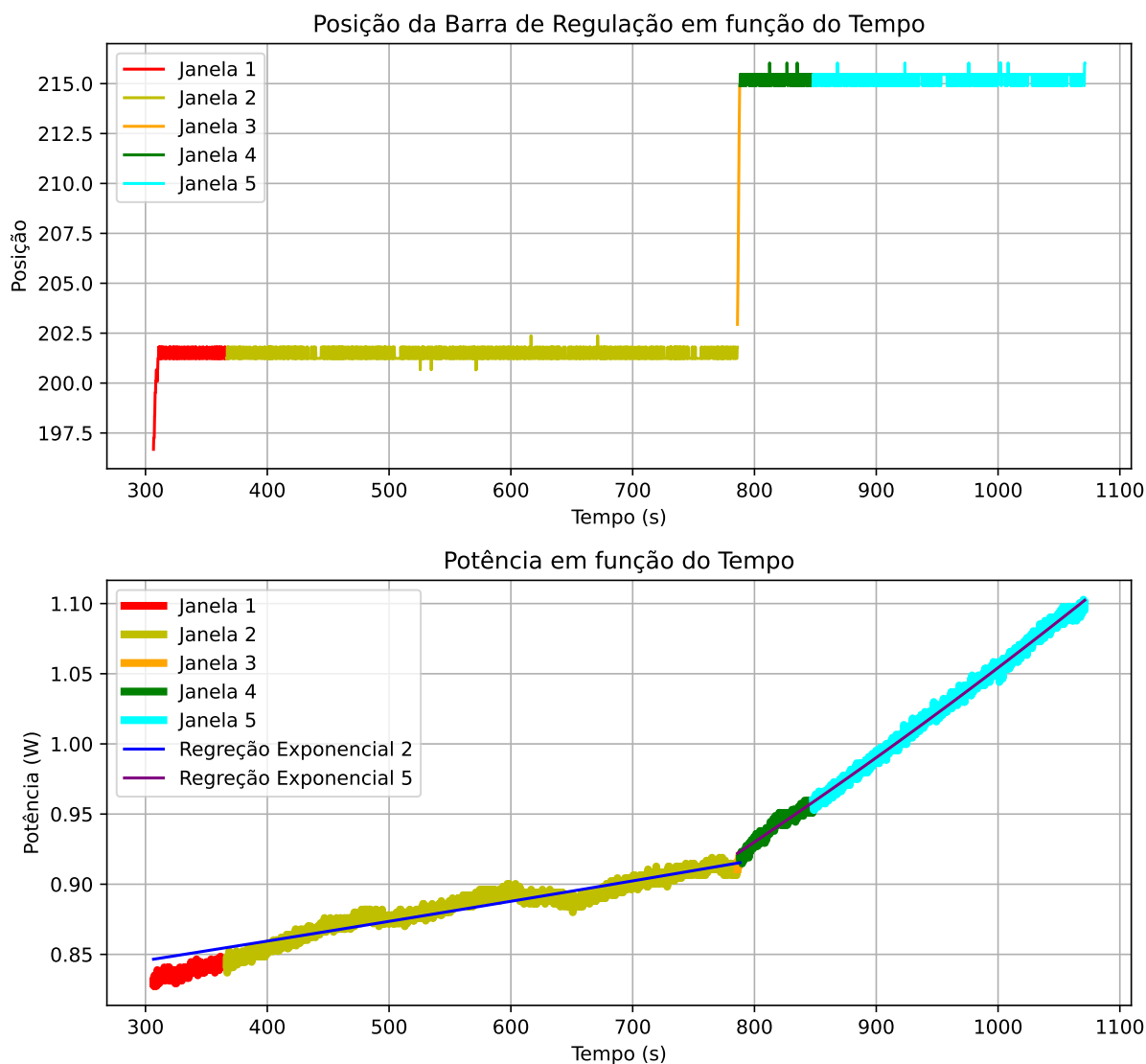


Figura 54 - Página 3 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 3 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	215.29
Posição Final da Barra de Regulação:	233.29
Delta da Posição da Barra de Regulação:	18.01
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	6.42022974499444
Reatividade Final Encontrada (PCM):	9.869657881144427
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	3.4494281361499866
Período Inicial Encontrado (s):	1595.51
Período Final Encontrado (s):	1025.68
Coeficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[0.9584870810413892, 0.0006267600985026452]
Coeficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[1.1902713535388094, 0.000974960368657887]
Janela de tempo 1 (s):	[787.97 , 847.90]
Janela de tempo 2 (s):	[848.01 , 1071.16]
Janela de tempo 3 (s):	[1071.27 , 1073.72]
Janela de tempo 4 (s):	[1073.82 , 1133.66]
Janela de tempo 5 (s):	[1133.76 , 1361.29]

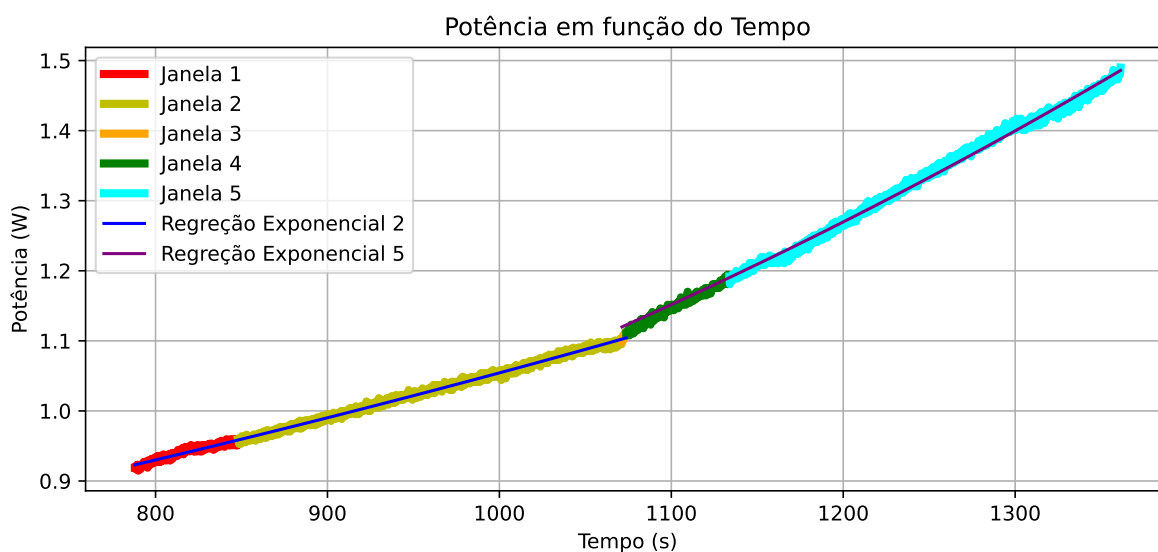
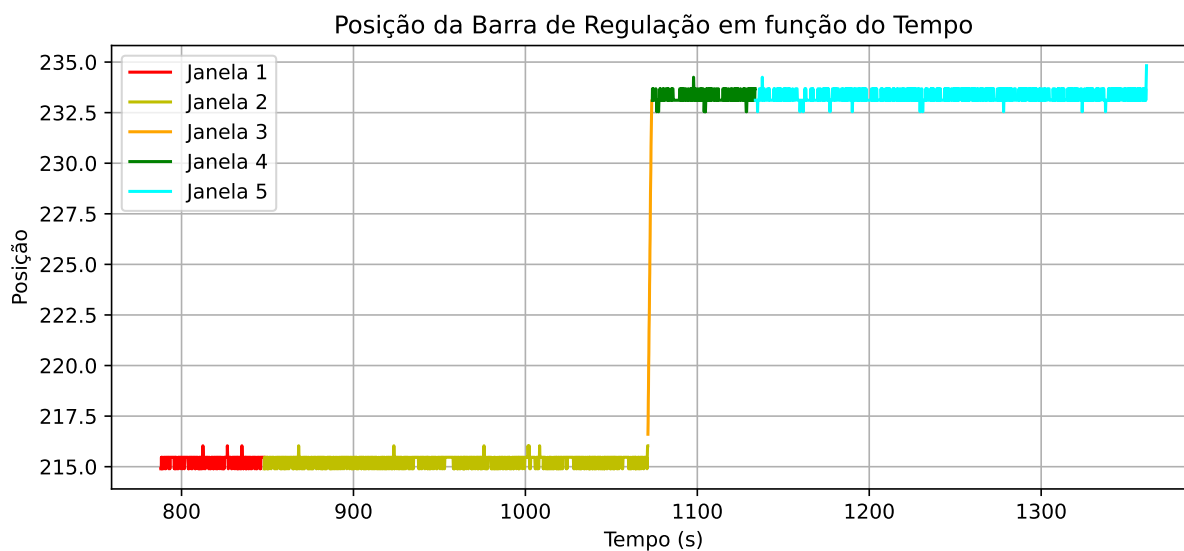


Figura 55 - Página 4 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 4 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	233.29
Posição Final da Barra de Regulação:	254.08
Delta da Posição da Barra de Regulação:	20.79
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	9.869657881144427
Reatividade Final Encontrada (PCM):	17.595339798136767
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	7.72568191699234
Período Inicial Encontrado (s):	1025.68
Período Final Encontrado (s):	560.28
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[1.1902713535388094, 0.000974960368657887]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[1.687328538196913, 0.001784814301603774]
Janela de tempo 1 (s):	[1073.72 , 1133.66]
Janela de tempo 2 (s):	[1133.76 , 1361.29]
Janela de tempo 3 (s):	[1361.39 , 1364.18]
Janela de tempo 4 (s):	[1364.28 , 1424.13]
Janela de tempo 5 (s):	[1424.24 , 1593.10]

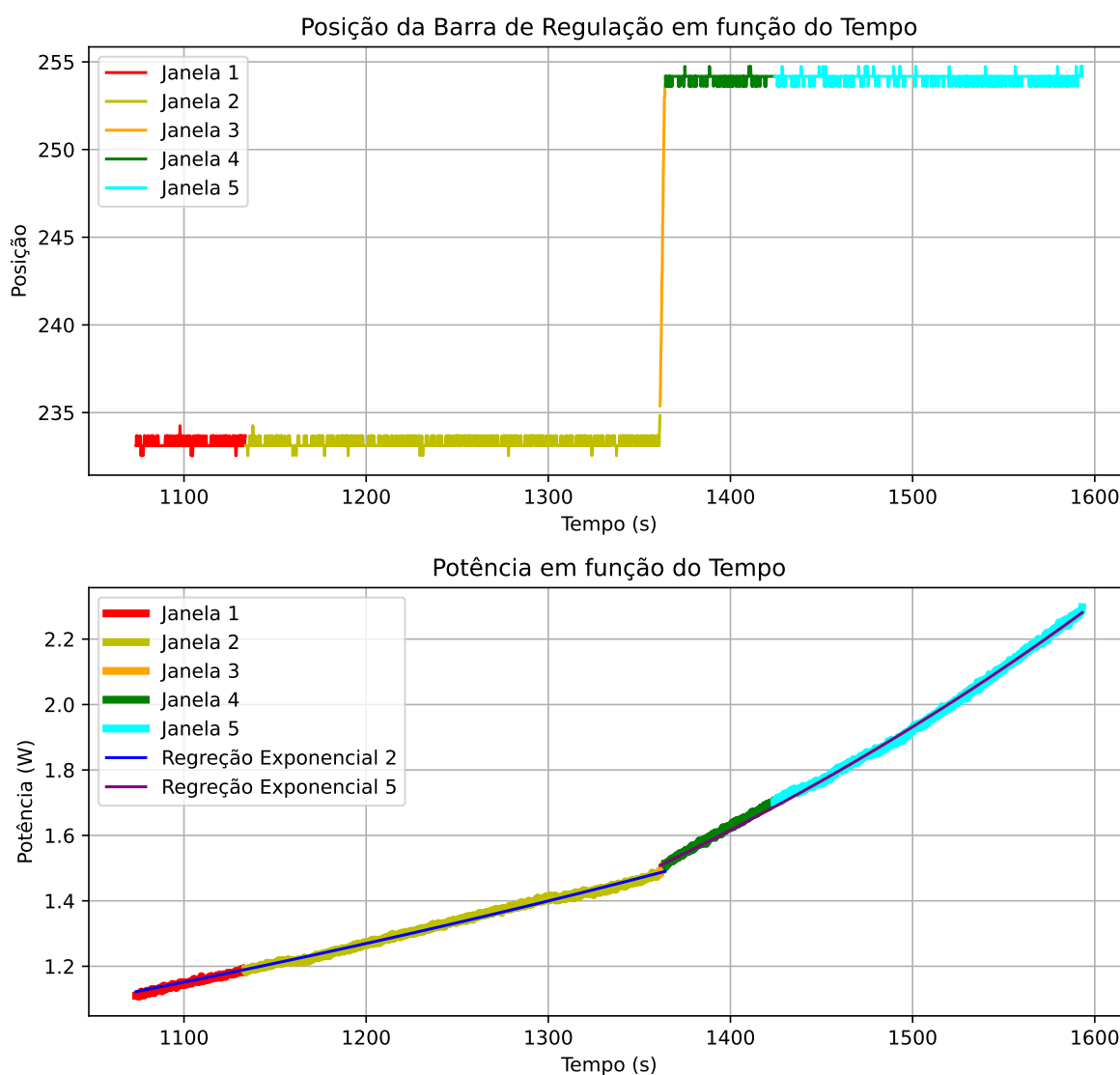


Figura 56 - Página 5 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 5 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	254.08
Posição Final da Barra de Regulação:	301.22
Delta da Posição da Barra de Regulação:	47.14
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	17.595339798136767
Reatividade Final Encontrada (PCM):	39.20222459043928
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	21.606884792302512
Período Inicial Encontrado (s):	560.28
Período Final Encontrado (s):	233.44
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[1.687328538196913, 0.001784814301603774]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[3.332958961872688, 0.004283664996978018]
Janela de tempo 1 (s):	[1364.18 , 1424.13]
Janela de tempo 2 (s):	[1424.24 , 1593.10]
Janela de tempo 3 (s):	[1593.21 , 1599.27]
Janela de tempo 4 (s):	[1599.38 , 1659.23]
Janela de tempo 5 (s):	[1659.33 , 1776.45]

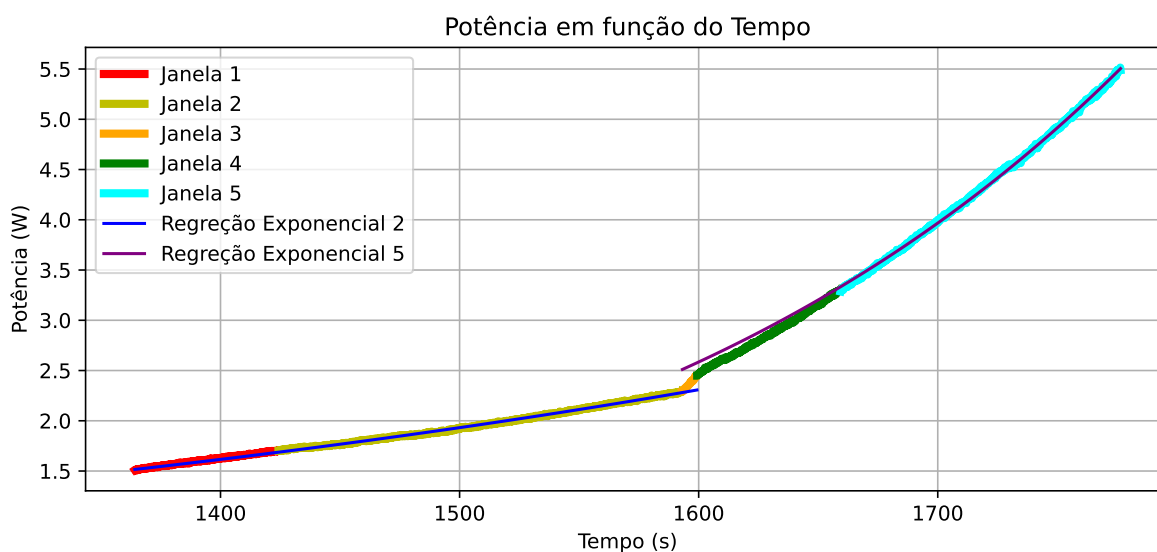
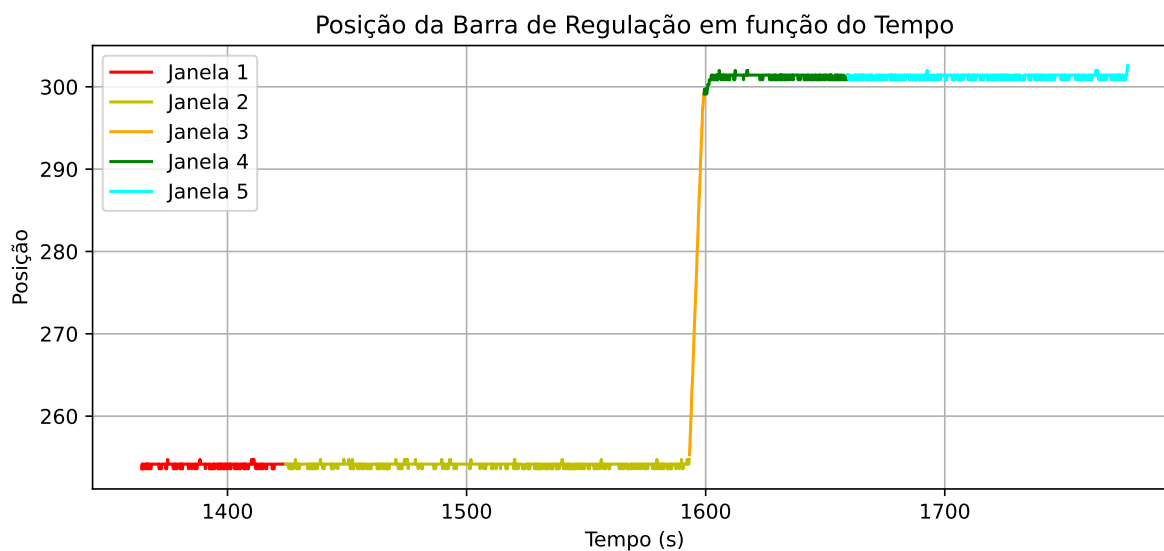


Figura 57 - Página 6 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 6 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	301.22
Posição Final da Barra de Regulação:	400.74
Delta da Posição da Barra de Regulação:	99.52
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	39.20222459043928
Reatividade Final Encontrada (PCM):	103.0069110482127
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	63.80468645777342
Período Inicial Encontrado (s):	233.44
Período Final Encontrado (s):	71.06
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[3.332958961872688, 0.004283664996978018]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[17.825483010926117, 0.014072824651113716]
Janela de tempo 1 (s):	[1599.27 , 1659.23]
Janela de tempo 2 (s):	[1659.33 , 1776.45]
Janela de tempo 3 (s):	[1776.55 , 1789.58]
Janela de tempo 4 (s):	[1789.67 , 1849.47]
Janela de tempo 5 (s):	[1849.58 , 1922.83]

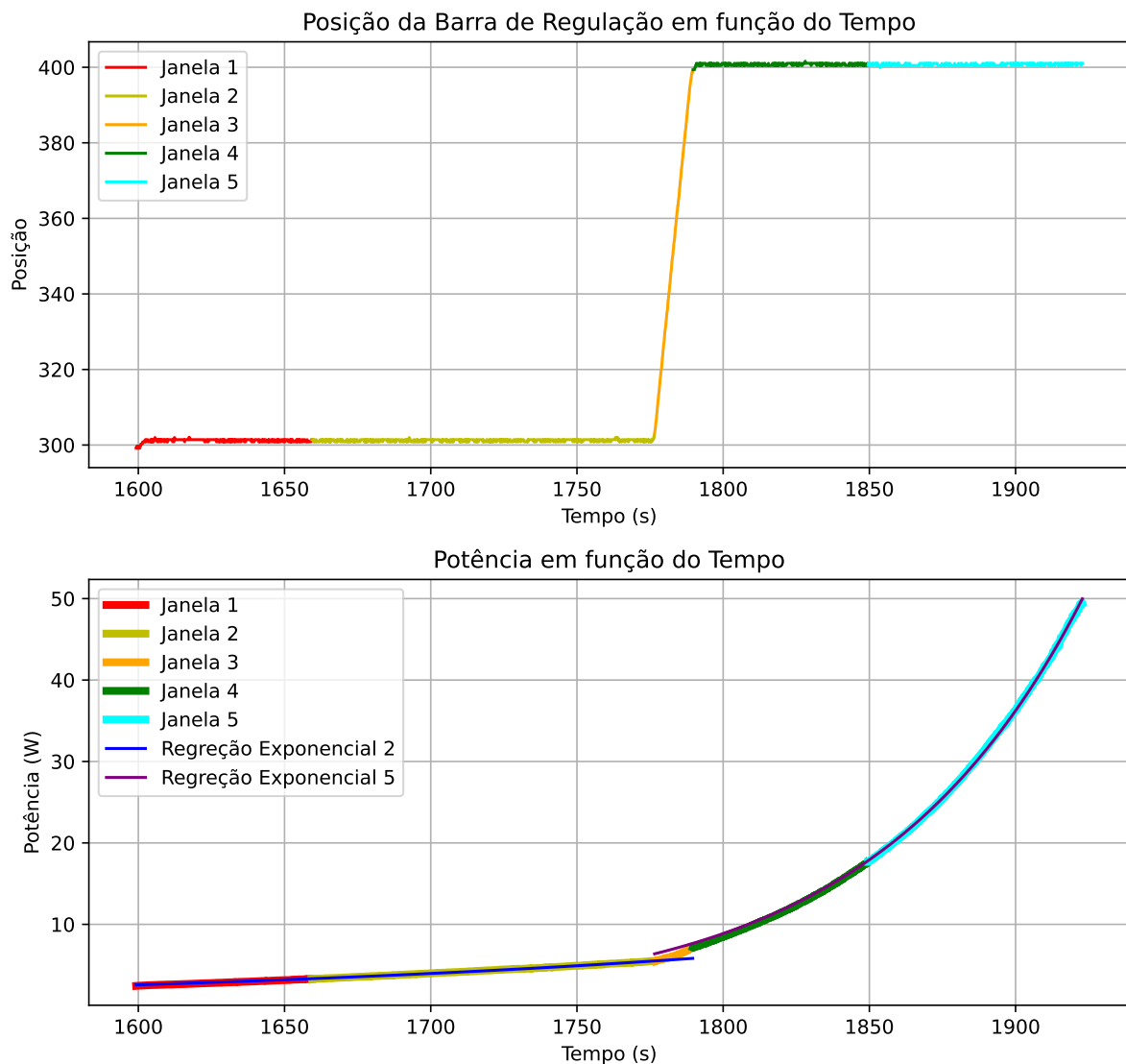


Figura 58 - Página 7 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 7 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	401.27
Posição Final da Barra de Regulação:	701.46
Delta da Posição da Barra de Regulação:	300.19
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	1.7372800390298435
Reatividade Final Encontrada (PCM):	221.6183816080034
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	219.88110156897355
Período Inicial Encontrado (s):	5991.63
Período Final Encontrado (s):	21.41
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[1.1417492935857216, 0.0001668993866841075]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[79.43818185026323, 0.046717047306305874]
Janela de tempo 1 (s):	[-0.10, 59.85]
Janela de tempo 2 (s):	[59.96, 333.02]
Janela de tempo 3 (s):	[333.11, 373.20]
Janela de tempo 4 (s):	[373.30, 433.13]
Janela de tempo 5 (s):	[433.24, 439.53]

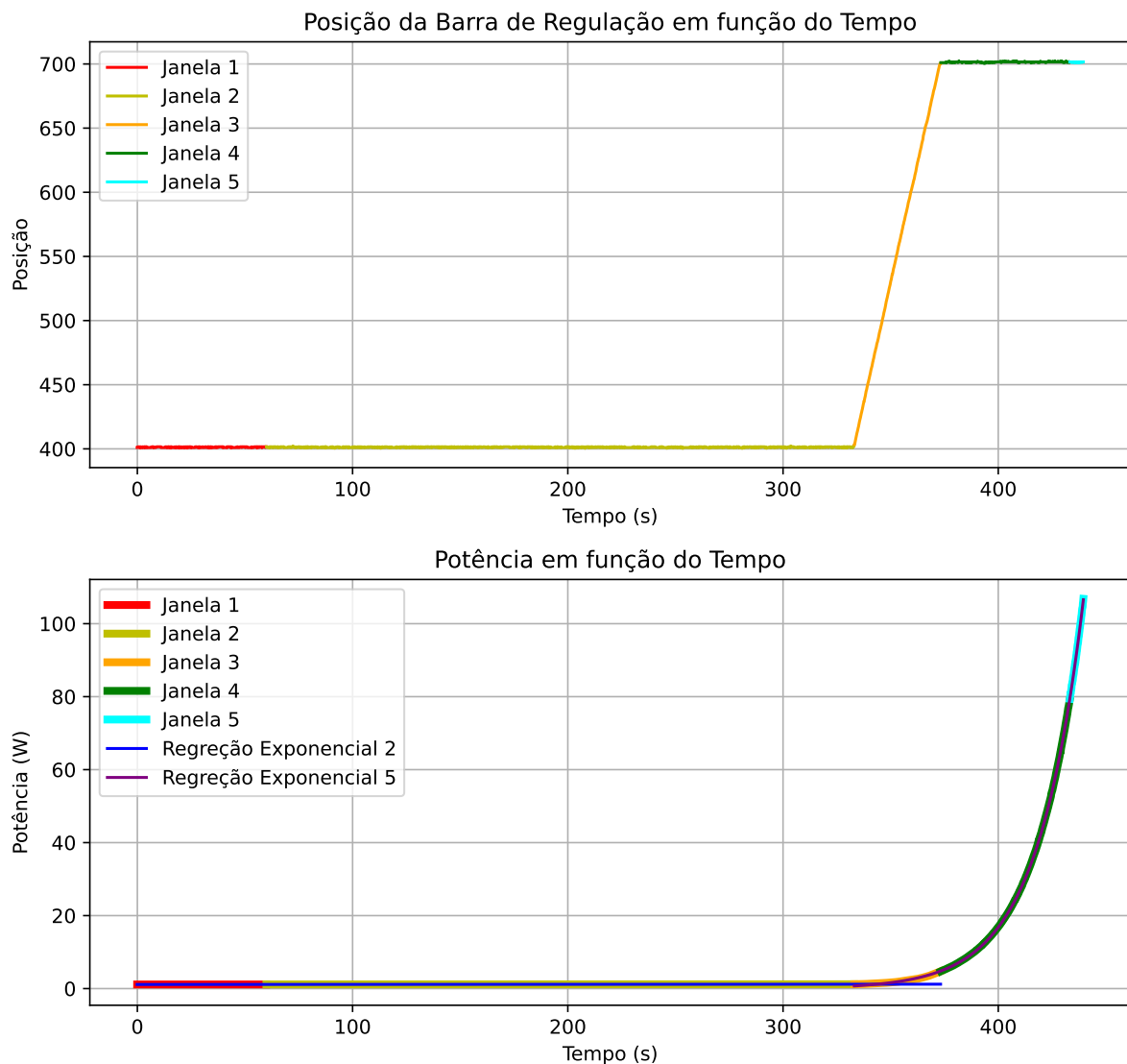


Figura 59 - Página 8 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 8 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	701.58
Posição Final da Barra de Regulação:	800.44
Delta da Posição da Barra de Regulação:	98.86
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	0.2726375452248832
Reatividade Final Encontrada (PCM):	41.062299425079225
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	40.78966187985434
Período Inicial Encontrado (s):	38371.36
Período Final Encontrado (s):	221.44
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[0.794810009711622, 2.6061102157156225e-05]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[1.2264016613955873, 0.004515849644482339]
Janela de tempo 1 (s):	[-0.11 , 59.83]
Janela de tempo 2 (s):	[59.94 , 107.27]
Janela de tempo 3 (s):	[107.36 , 120.26]
Janela de tempo 4 (s):	[120.36 , 180.19]
Janela de tempo 5 (s):	[180.30 , 325.81]

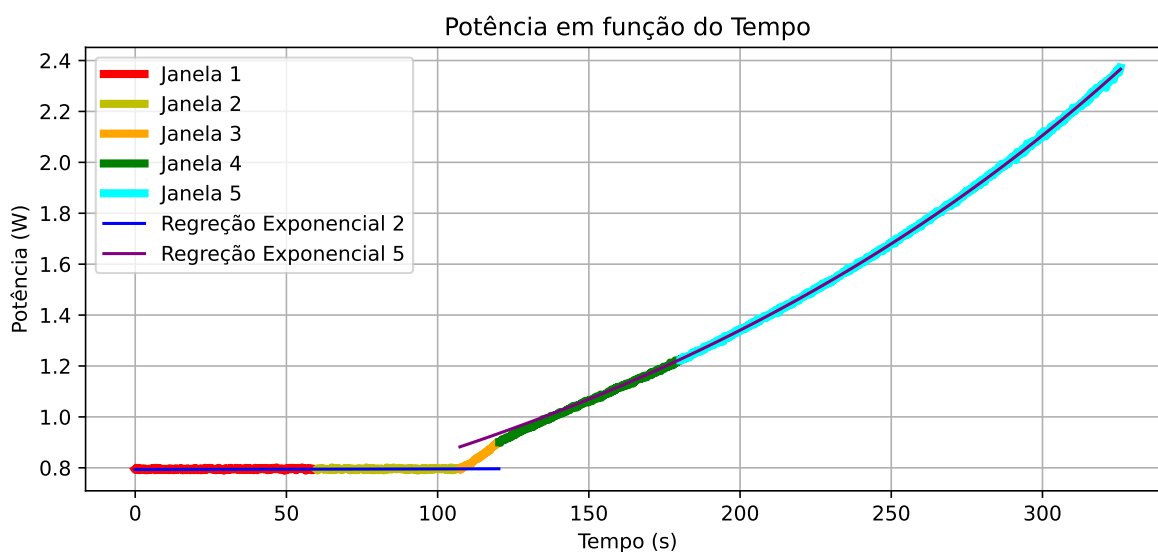
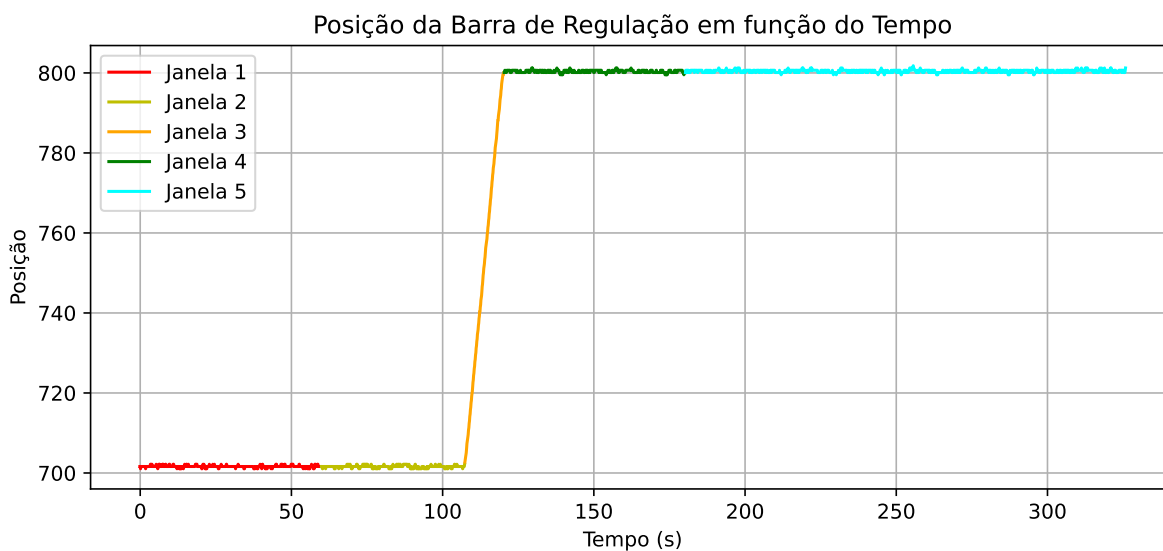


Figura 60 - Página 9 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 9 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	800.44
Posição Final da Barra de Regulação:	851.95
Delta da Posição da Barra de Regulação:	51.50
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	41.062299425079225
Reatividade Final Encontrada (PCM):	55.2559026079773
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	14.193603182898073
Período Inicial Encontrado (s):	221.44
Período Final Encontrado (s):	156.66
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[1.2264016613955873, 0.004515849644482339]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[3.766977331143819, 0.006383195766786503]
Janela de tempo 1 (s):	[120.26 , 180.19]
Janela de tempo 2 (s):	[180.30 , 325.81]
Janela de tempo 3 (s):	[325.91 , 332.68]
Janela de tempo 4 (s):	[332.79 , 392.60]
Janela de tempo 5 (s):	[392.71 , 493.08]

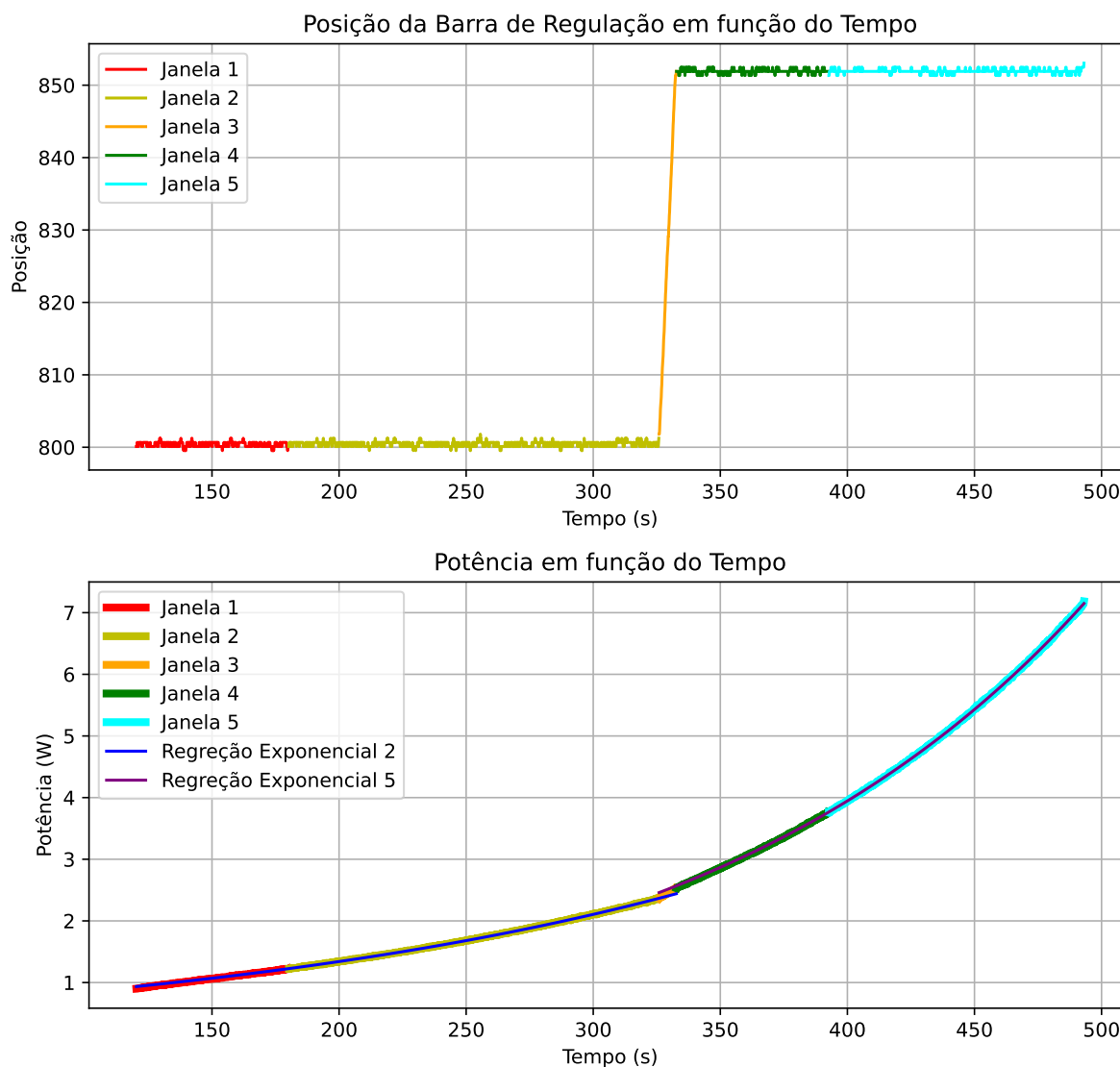


Figura 61 - Página 10 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório nº 10 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	851.95
Posição Final da Barra de Regulação:	879.43
Delta da Posição da Barra de Regulação:	27.48
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	55.2559026079773
Reatividade Final Encontrada (PCM):	60.9200539078862
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	5.664151299908902
Período Inicial Encontrado (s):	156.66
Período Final Encontrado (s):	139.32
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[3.766977331143819, 0.006383195766786503]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[11.474730528147546, 0.007177591401694033]
Janela de tempo 1 (s):	[332.68 , 392.60]
Janela de tempo 2 (s):	[392.71 , 493.08]
Janela de tempo 3 (s):	[493.19 , 496.68]
Janela de tempo 4 (s):	[496.79 , 556.67]
Janela de tempo 5 (s):	[556.77 , 627.23]

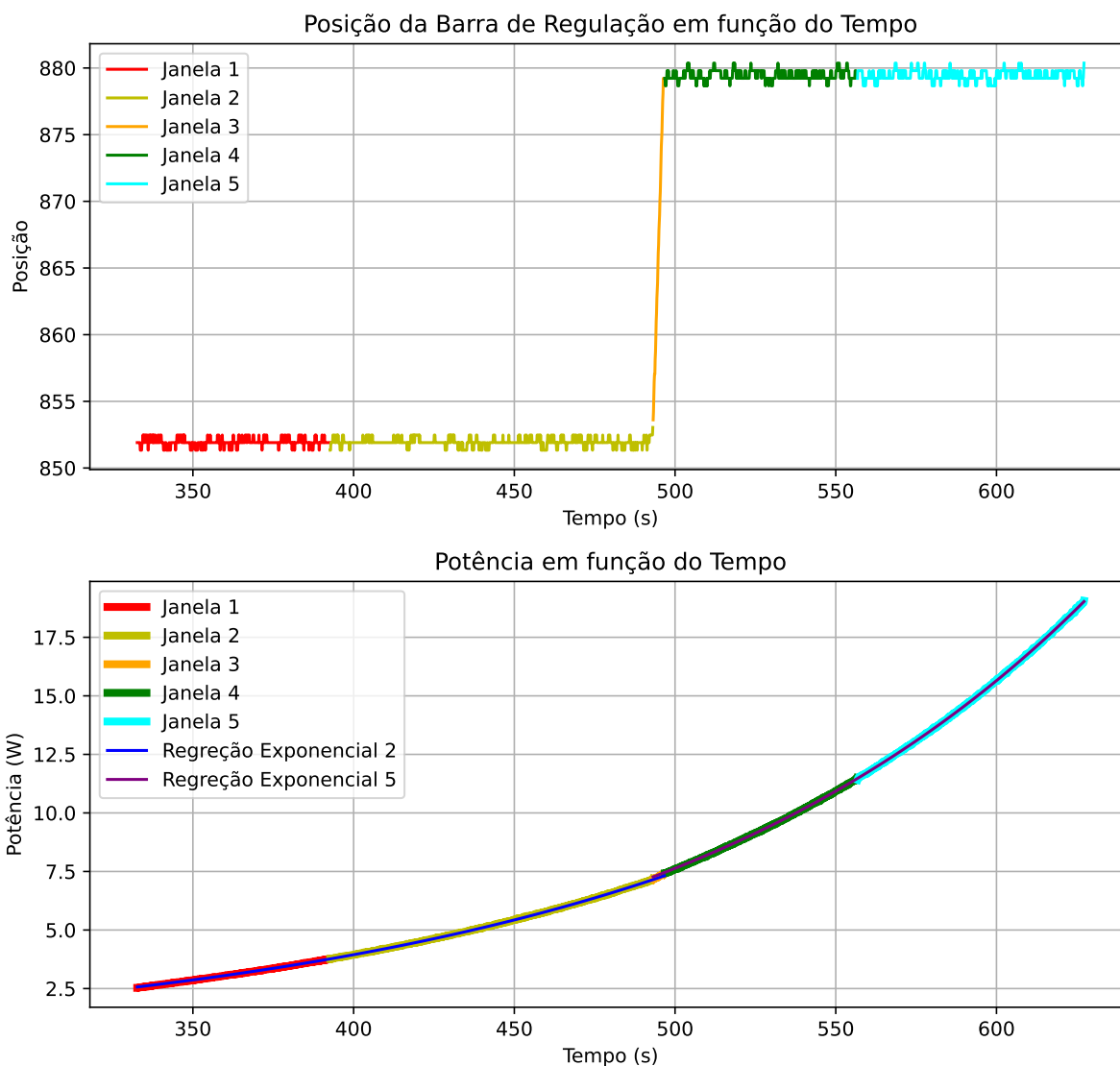


Figura 62 - Página 11 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório n° 11 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	879.43
Posição Final da Barra de Regulação:	902.03
Delta da Posição da Barra de Regulação:	22.61
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	60.9200539078862
Reatividade Final Encontrada (PCM):	64.51630355819103
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	3.596249650304827
Período Inicial Encontrado (s):	139.32
Período Final Encontrado (s):	129.92
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[11.474730528147546, 0.007177591401694033]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[31.386002148152773, 0.007697201463924702]
Janela de tempo 1 (s):	[496.68 , 556.67]
Janela de tempo 2 (s):	[556.77 , 627.23]
Janela de tempo 3 (s):	[627.33 , 630.38]
Janela de tempo 4 (s):	[630.48 , 690.30]
Janela de tempo 5 (s):	[690.40 , 734.72]

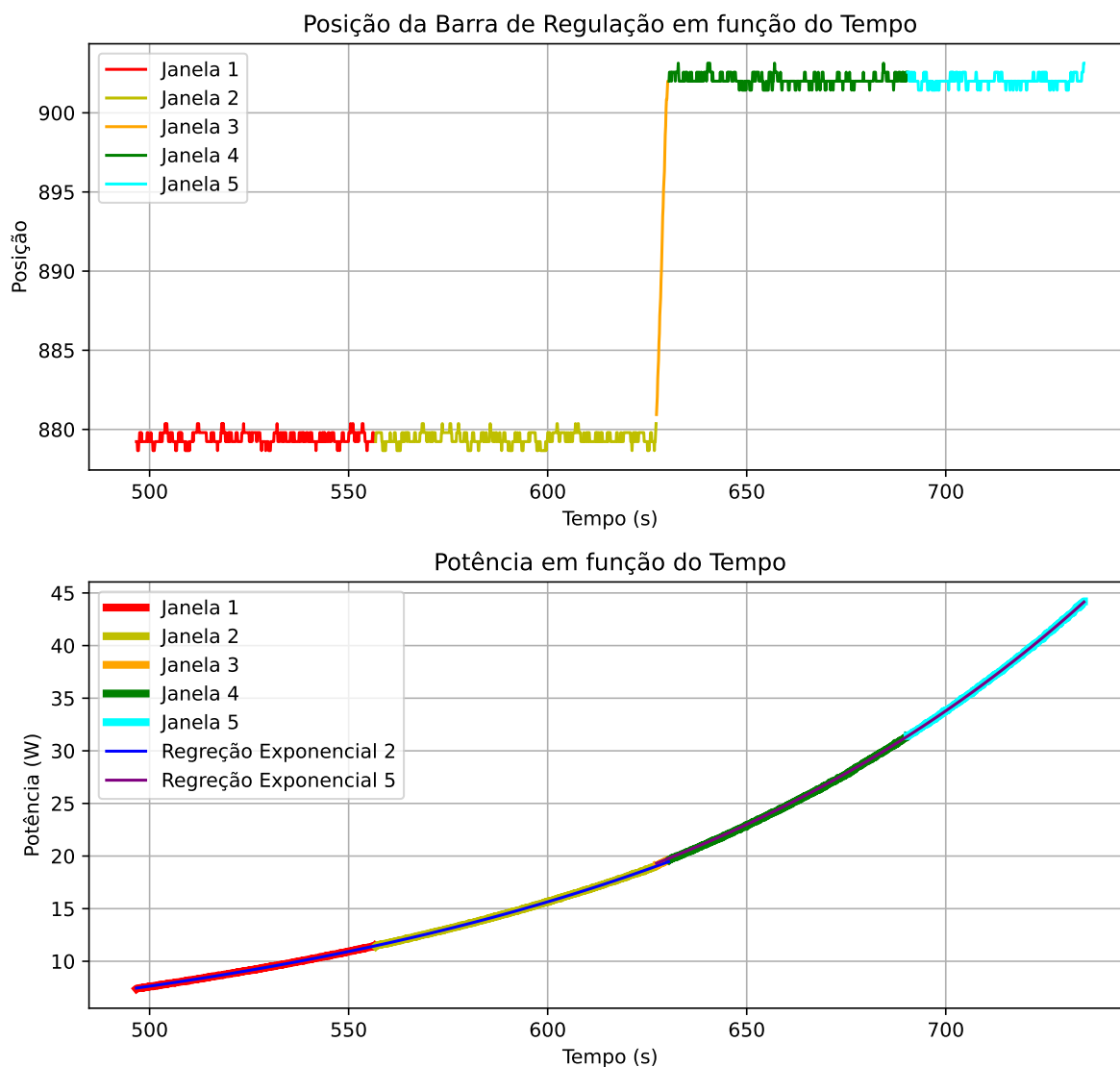


Figura 63 - Página 12 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório n° 12 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	902.03
Posição Final da Barra de Regulação:	922.79
Delta da Posição da Barra de Regulação:	20.76
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	64.51630355819103
Reatividade Final Encontrada (PCM):	66.81643644896364
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	2.300132890772616
Período Inicial Encontrado (s):	129.92
Período Final Encontrado (s):	124.44
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[31.386002148152773, 0.007697201463924702]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[74.00835899650126, 0.00803588502208386]
Janela de tempo 1 (s):	[630.38 , 690.30]
Janela de tempo 2 (s):	[690.40 , 734.72]
Janela de tempo 3 (s):	[734.83 , 737.50]
Janela de tempo 4 (s):	[737.60 , 797.47]
Janela de tempo 5 (s):	[797.57 , 835.02]

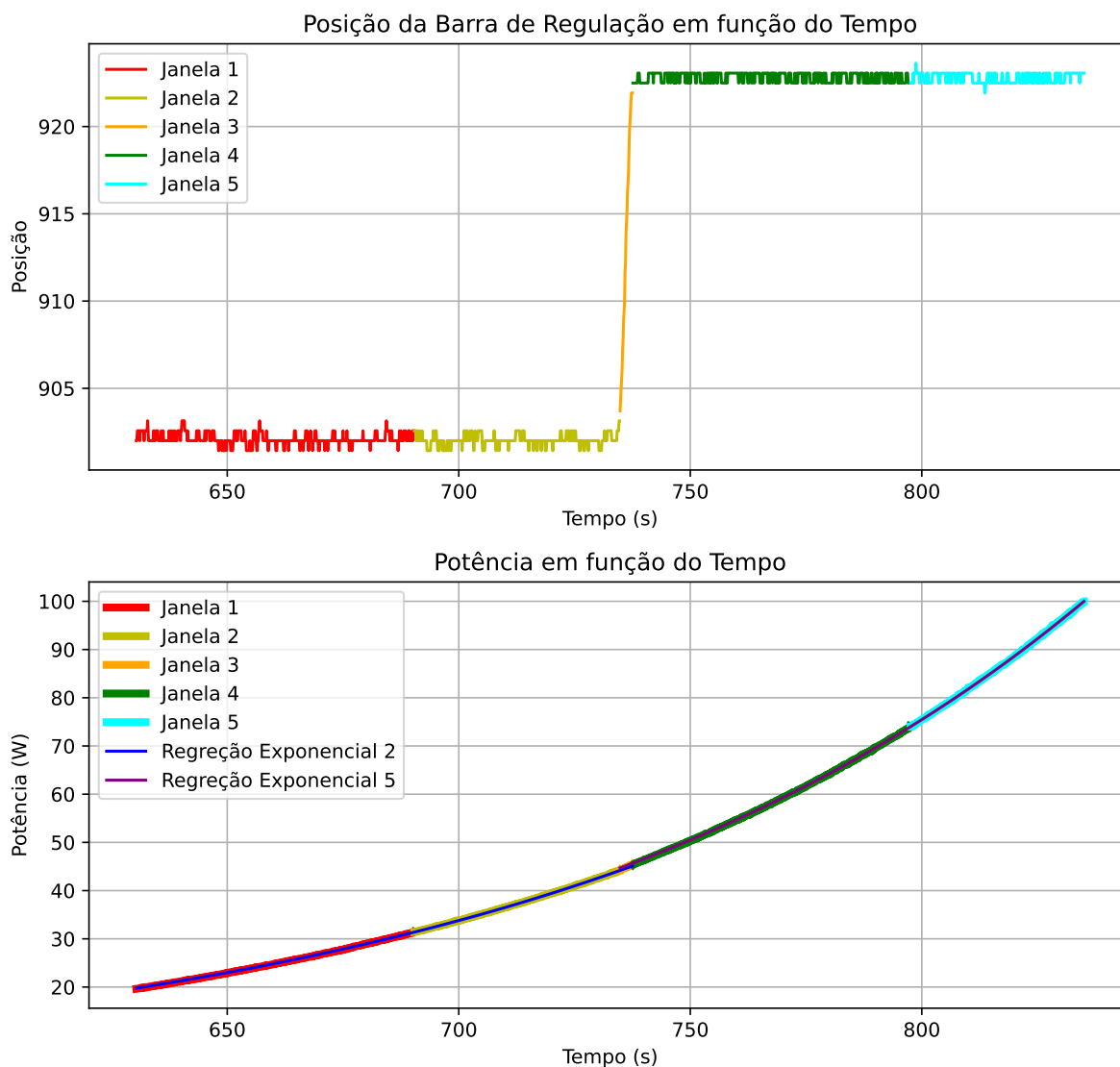


Figura 64 - Página 13 do relatório de calibração de barra gerado.

Relatório n° 13 de Inserção de Reatividade (BarraReg)

Descrição	Valor
Posição Inicial da Barra de Regulação:	922.79
Posição Final da Barra de Regulação:	939.48
Delta da Posição da Barra de Regulação:	16.70
Reatividade Inicial Encontrada (PCM):	66.81643644896364
Reatividade Final Encontrada (PCM):	65.68499519153451
Delta de Reatividade Encontrado (PCM):	-1.131441257429131
Período Inicial Encontrado (s):	124.44
Período Final Encontrado (s):	127.09
Coefficientes da exponencial ajustada 2 [a, b]:	[74.00835899650126, 0.00803588502208386]
Coefficientes da exponencial ajustada 5 [a, b]:	[168.83672094075587, 0.007868661372848758]
Janela de tempo 1 (s):	[737.50 , 797.47]
Janela de tempo 2 (s):	[797.57 , 835.02]
Janela de tempo 3 (s):	[835.13 , 837.44]
Janela de tempo 4 (s):	[837.55 , 897.37]
Janela de tempo 5 (s):	[897.48 , 998.57]

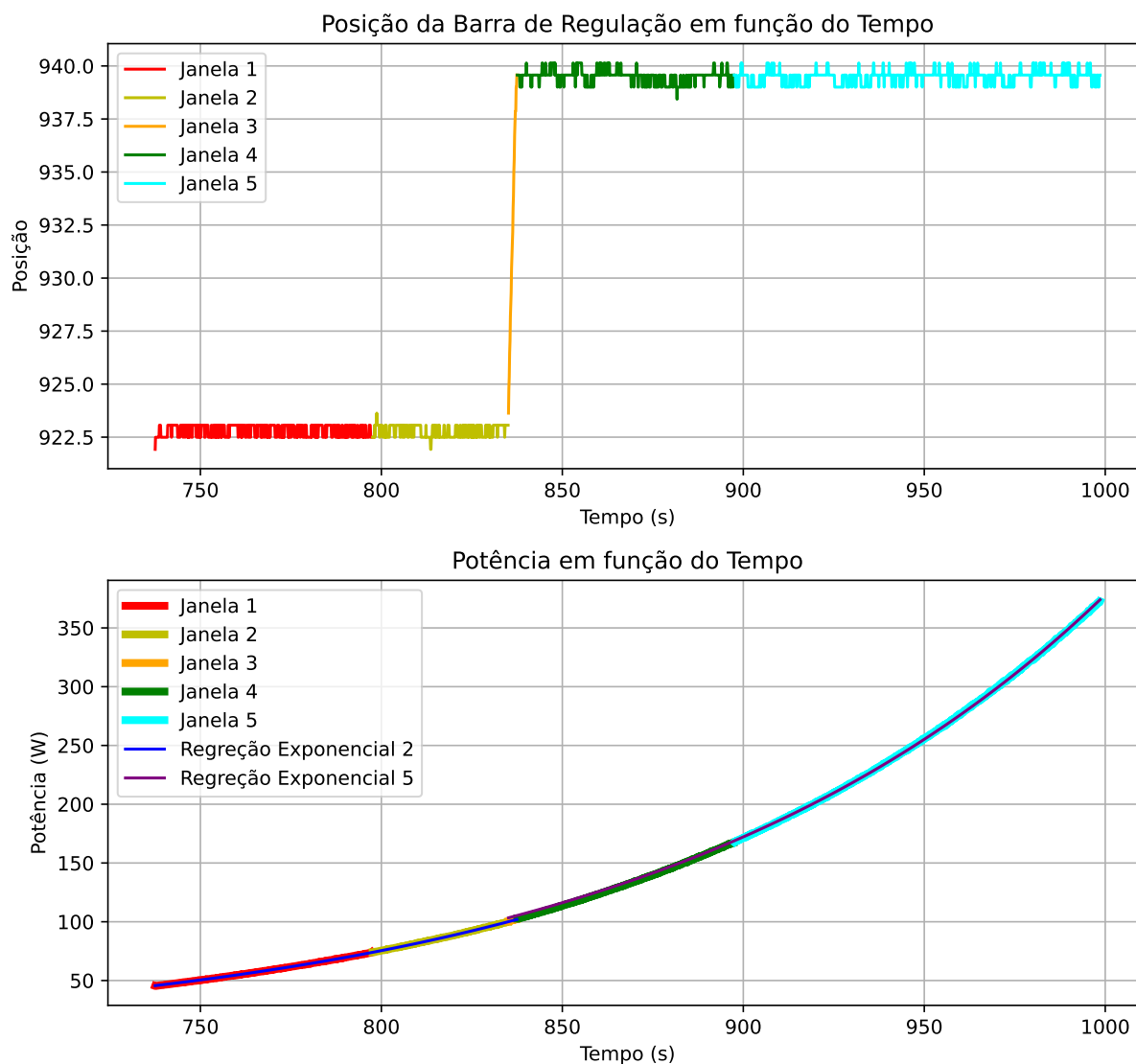


Figura 65 - Página 14 do relatório de calibração de barra gerado.

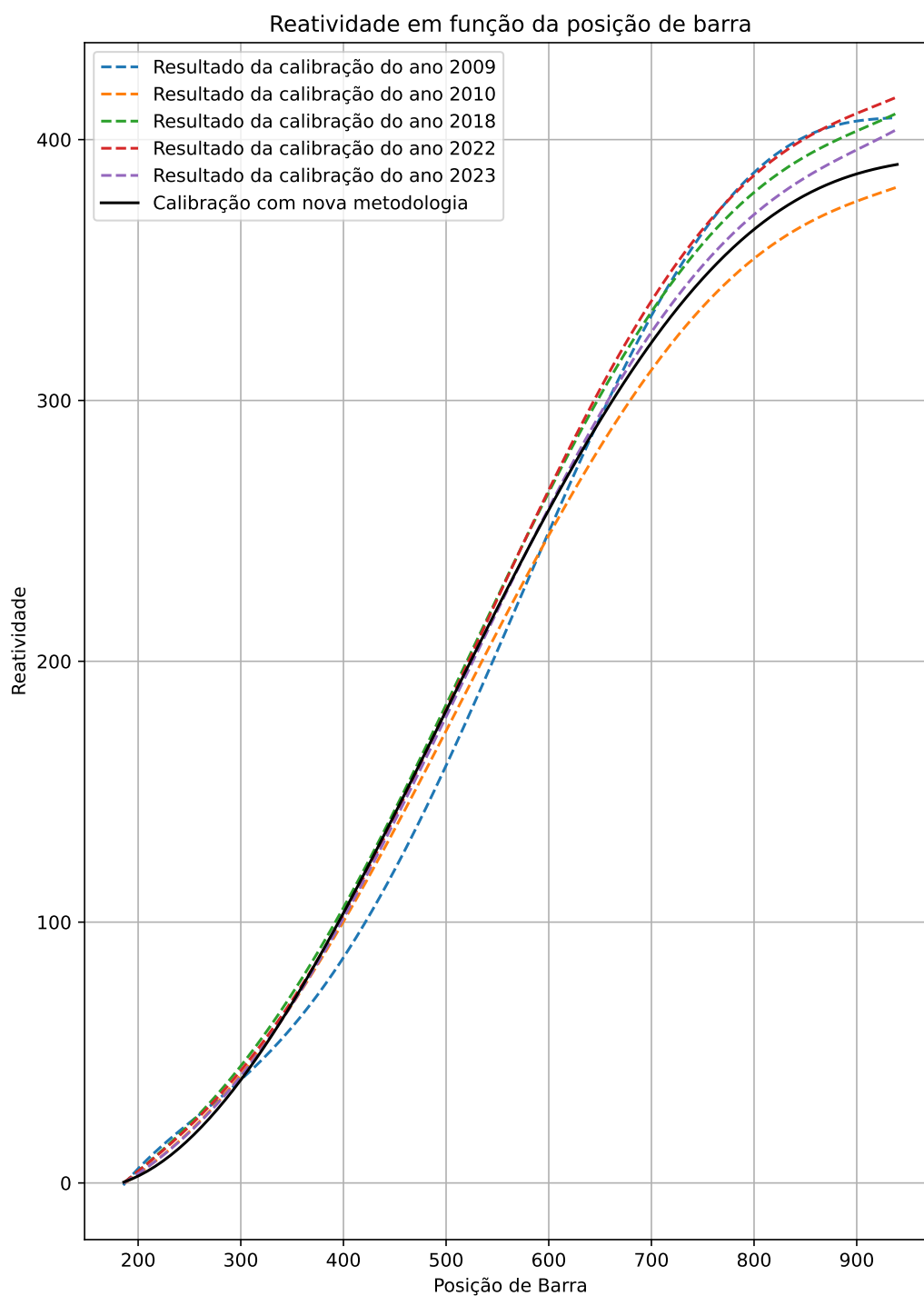


Figura 66 - Página 15 do relatório de calibração de barra gerado.