



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Desenvolvimento de equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica

MARCELO KOBAYOSHI

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

**Orientador:
Prof. Dr. Michelangelo Durazzo**

**São Paulo
2023**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Desenvolvimento de equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

MARCELO KOBAYOSHI

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

**Orientador:
Prof. Dr. Michelangelo Durazzo**

**São Paulo
2023**

Fonte de Financiamento: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

KOBAYOSHI, M. ***Desenvolvimento de equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica.***

2023. 265 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN,
com os dados fornecidos pelo autor.

Kobayoshi, Marcelo

Desenvolvimento de equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica / Marcelo Kobayoshi; orientador Michelangelo Durazzo. -- São Paulo, 2023.
265 f.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

1. Combustível nuclear. 2. Placa combustível. 3. Medição automatizada. 4. Confiabilidade metrológica. 5. Incerteza de medição. I. Durazzo, Michelangelo, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Marcelo Kobayoshi

Título: Desenvolvimento de equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Data: 19 / 06 / 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr: Michelangelo Durazzo – Presidente

Instituição: IPEN / Universidade de São Paulo

Prof. Dr: Guilherme Duarte de Barros - Titular

Instituição: Universidade Anhembi Morumbi - Julgamento: Aprovado

Prof. Dr: Ricardo Mendes Leal Neto - Titular

Instituição: IPEN / Universidade de São Paulo - Julgamento: Aprovado

Prof. Dr: Thomaz Augusto Guisard Restivo - Titular

Instituição: Universidade de Sorocaba - Julgamento: Aprovado

Aos meus Amores Michele, Livia e
Luiz Augusto, razões da minha vida.
Aos meus Pais Sônia e Naguato por
seu amor incondicional e eterna
presença ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Michelangelo Durazzo, por aceitar o desafio deste projeto e por todo seu apoio, dedicação e principalmente paciência ao me conduzir através do árduo caminho da ciência e da pesquisa.

À USP / IPEN / CNEN - Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e Comissão Nacional de Energia Nuclear - na figura de seus ilustres gestores e funcionários, pela oportunidade de participar deste tão reconhecido Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear.

Ao SENAI-SP - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - Departamento Regional de São Paulo - na figura do Prof. Ricardo Figueiredo Terra, pela oportunidade de participar deste convênio e pelas condições institucionais providas que viabilizaram a execução deste programa.

À FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – na figura de seus ilustres gestores e funcionários, pelo financiamento às atividades de pesquisa deste Projeto de número 2021/14331-5.

À Prof.^a Dr^a Elita Fontenele Urano de Carvalho, por sua presença constante, seu suporte e sua confiança na busca e liberação de recursos para a concretização deste trabalho.

Ao MSc. Felipe Bonito Jaldin Ferrufino, por seu apoio técnico e tecnológico e contínua disponibilidade em auxiliar-me nos experimentos e nas atividades diurnas e noturnas realizadas no laboratório do CECON-IPEN.

À Sra. Cristina Oscrovani Leandro, por apoiar os trabalhos administrativos e estar sempre presente e disposta a oferecer seu auxílio e palavras de incentivo

À Srta. Bruna Roque da Silva, por seu excelente trabalho na secretaria de ensino do programa e por sua disponibilidade e paciência nas orientações e atividades.

Ao Eng^o. Henrique Honda, pela nossa parceria desenvolvida e pelos valiosos conhecimentos agregados durante a fase de construção do equipamento.

Ao Eng^o Eriki Masahiko Takara, por sua colaboração no desenvolvimento do projeto pneumático do sistema e seu auxílio na construção do suporte dos padrões.

Ao Prof. Jose Edson da Fonseca, pelo trabalho realizado e por seu apoio nas revisões e adequações do projeto do equipamento.

EPÍGRAFE

“Não cometeis injustiça no juízo, nem na vara, nem no peso, nem na medida. Balanças justas, pesos justos, efa justo e justo him tereis: Eu sou o Senhor, vosso Deus, que vos tirei da terra do Egito.”

A Bíblia Sagrada, Levítico 19:35,36

RESUMO

KOBAYOSHI, Marcelo. **Desenvolvimento de equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica.** 2023. 265 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Atualmente, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), as dimensões de espessura das placas de combustíveis são controladas em 21 pontos pré-estabelecidos, por meio da utilização de micrômetros externos manuais com arco profundo, fusos não rotativos e batentes de medição chanfrados. Esse procedimento acarreta a inclusão do fator humano no processo de medição, o que pode impactar negativamente na confiabilidade dos resultados obtidos e na garantia da integridade superficial das placas. No presente trabalho é proposto um método de controle de espessura das placas combustíveis, que motivou o desenvolvimento de um sistema de medição, materializado pela construção de um novo equipamento, composto por mecanismos automatizados de movimentação, captura, transcrição e processamento dos dados. Por meio dos resultados obtidos, evidenciou-se a adequabilidade do sistema de medição desenvolvido e da concepção e qualidade estrutural do equipamento construído, comprovando seu potencial para o aumento da confiabilidade metrológica nos processos de controle dimensional das placas combustíveis.

Palavras-chave: combustível nuclear, placa combustível, medição automatizada, confiabilidade metrológica, incerteza de medição.

ABSTRACT

KOBAYOSHI, Marcelo. **Development of equipment for the automated measurement of fuel plates using sensors based on linear photoelectric transmission encoders.** 2023. 265 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Currently, at the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), the thickness dimensions of the fuel plates are controlled at 21 pre-established points, using manual external micrometers with a deep throat, non-rotating spindles, and chamfered measuring tips. This procedure includes the human factor in the measurement process, which may negatively impact the reliability of the results and the guarantee of the surface integrity of the plates. In this research, a method for controlling the thickness of fuel plates is proposed, which motivated the development of a measurement system materialized by the construction of a new equipment, composed of automated mechanisms for moving, capturing, transcribing, and processing data. The results evidenced the adequacy of the measurement system developed, and the conception and structural quality of the equipment built, testifying its potential to add metrological reliability to the processes of dimensional control of the fuel plates.

Key words: nuclear fuel, fuel plate, automated measurement, metrological reliability, measurement uncertainty.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 01 - Reatores de potência no mundo..... | 22 |
| Tabela 02 - Situações operacionais dos reatores de pesquisa no mundo..... | 25 |
| Tabela 03 - Características dos sensores de medição..... | 96 |
| Tabela 04 - Dados de medição da placa Si 1099..... | 121 |
| Tabela 05 - Avaliação das contribuições de incerteza..... | 133 |
| Tabela 06 - Séries de medições de espessura realizadas..... | 140 |
| Tabela 07 - Resultados das séries de medições de espessura..... | 144 |
| Tabela 08 - Dados dos cálculos de incerteza das medições..... | 158 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 01 - Tipos dos reatores de pesquisa no mundo..... | 24 |
| Figura 02 - Elemento combustível nuclear composto por placas..... | 28 |
| Figura 03 - Conjunto de montagem núcleo-moldura-revestimento..... | 29 |
| Figura 04 - Vista explodida da placa combustível após a laminação..... | 30 |
| Figura 05 - Sequência de fabricação das placas combustíveis no IPEN..... | 31 |
| Figura 06 - Especificações dimensionais das placas combustíveis..... | 33 |
| Figura 07 - Princípio de funcionamento dos sensores ultrassônicos..... | 38 |
| Figura 08 - Aplicações dos sensores pneumáticos..... | 39 |
| Figura 09 - Configurações de sensores pneumáticos..... | 40 |
| Figura 10 - Princípio de funcionamento dos sensores magnéticos..... | 41 |
| Figura 11 - Princípio de funcionamento dos sensores indutivos..... | 42 |
| Figura 12 - Princípio de funcionamento dos sensores capacitivos..... | 43 |
| Figura 13 - Princípio de funcionamento de um sistema fotoelétrico analógico..... | 44 |
| Figura 14 - Princípio de funcionamento de um autocolimador..... | 45 |
| Figura 15 - Princípio de funcionamento de um interferômetro laser..... | 46 |
| Figura 16 - Princípio de funcionamento de um cabeçote por triangulação laser..... | 47 |
| Figura 17 - Sensores por contato do tipo pneumático..... | 48 |
| Figura 18 - Sensor por contato do tipo strain gauge..... | 49 |
| Figura 19 - Sensores por contato do tipo potenciométrico..... | 50 |
| Figura 20 - Sensores por contato do tipo magnetostrictivo..... | 51 |
| Figura 21 - Sensores por contato do tipo indutivo..... | 52 |
| Figura 22 - Sensores por contato do tipo capacitivo..... | 53 |
| Figura 23 - Sensores por contato do tipo incrementais por transmissão..... | 54 |
| Figura 24 - Sensor por contato do tipo incrementais por reflexão..... | 55 |
| Figura 25 - Sensor por contato do tipo de rede de Bragg..... | 57 |
| Figura 26 - Estrutura hierárquica de rastreabilidade..... | 67 |
| Figura 27 - Componentes da incerteza de medição..... | 69 |
| Figura 28 - Determinação dos limites de aceitação da conformidade..... | 78 |
| Figura 29 - Medição da espessura das placas combustíveis no CECON-IPEN..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| Figura 30 - Formulário padronizado de registro dos resultados das medições..... | 81 |
| Figura 31 - Concepção inicial do equipamento..... | 100 |
| Figura 32 - Detalhes dos subconjuntos e componentes do equipamento..... | 105 |
| Figura 33 - Detalhes do subconjunto do arco de medição..... | 107 |
| Figura 34 - Construção da base do equipamento..... | 110 |
| Figura 35 - Processo de usinagem dos componentes..... | 111 |
| Figura 36 - Processo de montagem dos componentes..... | 112 |
| Figura 37 - Processo de integração dos sistemas..... | 115 |
| Figura 38 - Diagrama de integração dos sinais..... | 116 |
| Figura 39 - Equipamento instalado no laboratório do CECON-IPEN..... | 117 |
| Figura 40 - Sequência de medição em uma matriz 3 x 7 com 21 pontos..... | 138 |
| Figura 41 - Matrizes de medição da placa Si 1097 com 21 / 39 / 75 pontos..... | 143 |
| Figura 42 - Relatório de medição da placa Si 1097 – 01 / 02..... | 146 |
| Figura 43 - Relatório de medição da placa Si 1097 – 02 / 02..... | 147 |
| Figura 44 - Relatório de medição da placa Si 1099 – 01 / 02..... | 148 |
| Figura 45 - Relatório de medição da placa Si 1099 – 01 / 02..... | 149 |
| Figura 46 - Relatório de medição da placa IPMB 007 – 01 / 02..... | 150 |
| Figura 47 - Relatório de medição da placa IPMB 007 – 02 / 02..... | 151 |
| Figura 48 - Relatório de medição da placa IPMB 010 – 01 / 02..... | 152 |
| Figura 49 - Relatório de medição da placa IPMB 010 – 02 / 02..... | 153 |
| Figura 50 - Curvas de resposta da variação de espessura da placa Si 1097..... | 154 |
| Figura 51 - Curvas de resposta da variação de espessura da placa Si 1097..... | 155 |
| Figura 52 - Curvas de resposta da variação de espessura da placa IPMB 007..... | 156 |
| Figura 53 - Curvas de resposta da variação de espessura da placa IPMB 010..... | 157 |
| Figura 54 - Análise do efeito da amostragem nas incertezas dos resultados..... | 161 |
| Figura 55 - Análise do efeito da amostragem no tempo das medições..... | 162 |
| Figura 56 - Comparativo entre as curvas de resposta da placa Si 1097 avaliadas com 21 e 39 pontos..... | 164 |
| Figura 57 - Comparativo entre as curvas de resposta da placa Si 1097 avaliadas com 39 e 75 pontos..... | 165 |
| Figura 58 - Análise do efeito do número de pontos no tempo das medições..... | 166 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 19 |
| 2.1 | Tecnologia Nuclear | 19 |
| 2.2 | Reatores Nucleares de Fissão | 19 |
| 2.2.1 | Breve Histórico dos Reatores Nucleares..... | 20 |
| 2.2.2 | Tipos de Reatores Nucleares | 21 |
| 2.2.3 | Reatores Nucleares de Pesquisa | 23 |
| 2.3 | Elementos Combustíveis | 25 |
| 2.3.1 | Tipos de Elementos Combustíveis | 26 |
| 2.4 | Elementos Combustíveis no IPEN | 27 |
| 2.4.1 | Processo de Fabricação das Placas Combustíveis no CECON – IPEN | 29 |
| 2.4.2 | Importância do Controle Dimensional das Placas Combustíveis | 32 |
| 2.4.3 | Especificações Dimensionais das Placas Combustíveis | 32 |
| 2.4.4 | Métodos de Controle e Análise dos Elementos Combustíveis | 33 |
| 2.4.5 | Estado da Técnica no Controle Dimensional das Placas Combustíveis | 35 |
| 2.5 | Medição de Chapas Metálicas | 36 |
| 2.6 | Sensores de Medição | 37 |
| 2.7 | Princípios de Medição de Deslocamento Sem Contato Mecânico | 37 |
| 2.7.1 | Sensores Ultrassônicos..... | 38 |
| 2.7.2 | Sensores Pneumáticos..... | 38 |
| 2.7.3 | Sensores Magnéticos | 40 |
| 2.7.4 | Sensores Indutivos..... | 41 |
| 2.7.5 | Sensores Capacitivos | 43 |
| 2.7.6 | Sensores Ópticos | 44 |
| 2.8 | Princípios de Medição de Deslocamento Com Contato Mecânico | 47 |
| 2.8.1 | Sensores Pneumáticos..... | 47 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.8.2 | Sensores Resistivos – Tipo Strain Gauge..... | 48 |
| 2.8.3 | Sensores Magnéticos – Tipo Magneto Resistivos | 49 |
| 2.8.4 | Sensores Magnéticos – Tipo Magnetostrictivo | 50 |
| 2.8.5 | Sensores Indutivos..... | 51 |
| 2.8.6 | Sensores Capacitivos | 53 |
| 2.8.7 | Sensores Ópticos | 54 |
| 2.9 | Confiabilidade Metrológica dos Resultados..... | 57 |
| 2.9.1 | A Metrologia | 57 |
| 2.9.2 | Áreas da Metrologia | 58 |
| 2.9.3 | Terminologias e Definições..... | 60 |
| 2.9.4 | Comprovação Metrológica | 61 |
| 2.9.5 | Fatores de Influência | 61 |
| 2.9.6 | Erros de Medição | 65 |
| 2.9.7 | Rastreabilidade Metrológica | 66 |
| 2.9.8 | Incerteza de Medição..... | 68 |
| 2.9.9 | Metodologia de Avaliação da Incerteza de Medição | 70 |
| 2.9.10 | Avaliação da Conformidade..... | 77 |
| 2.9.11 | Índice de Capacidade de Medição | 79 |
| 2.10 | Método e Instrumentos Atuais | 80 |
| 2.11 | Análise e Proposições de Melhorias no Método | 82 |
| 2.11.1 | Melhorar a Confiabilidade Metrológica..... | 82 |
| 2.11.2 | Expressar a Incerteza de Medições | 83 |
| 2.11.3 | Garantir Integridade Superficial das Placas..... | 84 |
| 2.11.4 | Aumentar o Número de Pontos da Análise | 85 |
| 2.11.5 | Aumentar as Possibilidades de Análise..... | 86 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 87 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 88 |
| 4.1 | Definições Iniciais..... | 88 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.1.1 | Definição dos Requisitos de Medição | 88 |
| 4.1.2 | Características dos Sensores de Medição | 90 |
| 4.1.3 | Definição do Sensor de Medição | 95 |
| 4.2 | Desenvolvimento Experimental | 99 |
| 4.2.1 | Concepção do Equipamento | 99 |
| 4.2.2 | Projeto do Equipamento | 100 |
| 4.2.3 | Seleção dos Componentes e Materiais | 101 |
| 4.2.4 | Descrição Estrutural do Equipamento | 105 |
| 4.2.5 | Descrição do Modo de Operação | 107 |
| 4.2.6 | Manufatura do Equipamento | 110 |
| 4.2.7 | Integração dos Sistemas | 114 |
| 4.2.8 | Testes Funcionais | 117 |
| 4.3 | Tratamento dos Dados | 118 |
| 4.3.1 | Modelagem Matemática | 118 |
| 4.3.2 | Cálculo dos Resultados da Medição | 120 |
| 4.3.3 | Avaliação das Incertezas Padrão | 121 |
| 4.3.4 | Determinação dos Coeficientes de Sensibilidade | 128 |
| 4.3.5 | Avaliação das Contribuições de Incerteza | 133 |
| 4.3.6 | Avaliação das Covariâncias Associadas | 134 |
| 4.3.7 | Determinação da Incerteza Padrão Combinada | 134 |
| 4.3.8 | Cálculo da Incerteza Expandida | 135 |
| 4.3.9 | Relato do Resultado da Medição | 136 |
| 4.4 | Realização das Medições | 136 |
| 4.4.1 | Descrição da Medição | 137 |
| 4.4.2 | Medições de Espessura | 139 |
| 4.4.3 | Medições de Largura e Comprimento | 141 |
| 5 | RESULTADOS | 142 |
| 5.1 | Resultados das Medições | 142 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.2 | Relatórios de Medição | 145 |
| 5.3 | Curvas de Resposta da Variação da Espessura..... | 145 |
| 6 | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 158 |
| 6.1 | Discussão dos Resultados Obtidos..... | 158 |
| 6.2 | Índices de Capacidade de Medição do Equipamento | 159 |
| 6.3 | Efeito do Tamanho da Amostra no Resultado das Medições | 160 |
| 6.4 | Efeito do Número de Pontos na Avaliação das Placas..... | 162 |
| 7 | CONCLUSÕES | 167 |
| 8 | SUGESTÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS | 169 |
| 8.1 | Redução da Incerteza Obtida nos Resultados das Medições | 169 |
| 8.2 | Incremento de Medições de Largura e Comprimento | 169 |
| 8.3 | Realização de Medições de Espessura Sem Contato | 170 |
| 9 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 171 |
| 10 | GLOSSÁRIO..... | 185 |
| 11 | APÊNDICES | 192 |
| 12 | ANEXOS..... | 248 |

1 INTRODUÇÃO

Durante a operação dos reatores nucleares, o processo de fissão libera grandes quantidades de energia e, neste íterim, seu elemento combustível deve resistir a intensos ambientes de radiação. Assim, elementos combustíveis devem ser fabricados de maneira robusta para resistir à corrosão química e às altas temperaturas operacionais, além de serem capazes de suportar grandes cargas estáticas e vibrações produzidas por impactos mecânicos e pelo alto fluxo de fluidos de refrigeração do núcleo.

Deste modo, as diversas estruturas que compõem o elemento combustível necessitam manter sua forma e integridade física durante longos períodos de utilização, garantindo que não ocorram vazamentos de produtos de fissão, que poderiam contaminar o fluido refrigerante do reator.

Especificamente nos reatores nucleares de pesquisa do tipo piscina, também denominados reatores do tipo MTR (reatores para teste de materiais), os elementos combustíveis são formados por um conjunto de placas agrupadas, sendo o revestimento de cada uma delas fabricada em alumínio e seu núcleo constituído por um composto de urânio na forma de partículas dispersas em uma matriz de alumínio, geralmente U_3Si_2 .

Durante o processo de fissão, a ocorrência de corrosão nas placas combustíveis pode ser influenciada por muitos fatores e, considerando-se a criticidade dos eventos que podem ser causados por uma eventual liberação do material radioativo, torna-se essencial o controle da variação dimensional da espessura da placa, pois esta característica tem correlação direta com a espessura do revestimento que contém o material físsil.

Projetadas com tolerâncias dimensionais apropriadas ao projeto, estas estruturas devem ser rigorosamente controladas e, por esta razão, as placas combustíveis nucleares são caracterizadas dimensionalmente, mediante a obtenção de dados exatos e confiáveis de sua espessura, comprimento e largura.

Os métodos atualmente desenvolvidos para o controle dimensional dos elementos combustíveis fabricados no Centro do Combustível Nuclear (CECON) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) preveem a utilização de

instrumentos de medição manuais e de aplicação universal, tais como paquímetros e micrômetros (DURAZZO et al., 2017b; DURAZZO et al., 2015).

Nestes métodos, a ação direta e o trabalho manual dos inspetores na realização das medições possibilitam a ocorrência de danos nas superfícies de acabamento das placas combustíveis, decorrentes do mal posicionamento dos batentes dos instrumentos nas superfícies onde são executadas as medições.

Verifica-se também nos atuais métodos, as dificuldades em se efetivar um aumento significativo do número de pontos medidos, o que possibilitaria a realização de análises mais detalhadas sobre os fenômenos ocorridos durante os processos de fabricação como, por exemplo, as influências nos resultados das características finais das placas devidos a alterações realizadas nos parâmetros de laminação ou de mudanças dos materiais utilizados na sua composição.

Além dos fatores anteriormente citados, salienta-se que a mesma ação direta e manual dos inspetores nos processos de medição pode converter-se em uma importante fonte de erros sistemáticos, aleatórios e, principalmente, de erros grosseiros (VUOLO, 1996) que, obviamente, produzirão efeitos negativos na qualidade dos dados obtidos e, por consequência, na confiabilidade dos resultados das medições (LIRA, 2015).

Outra importante característica observada nos métodos atuais, é a inexistência de qualquer tratamento matemático dos dados coletados, o que impede a caracterização quantitativa da qualidade dos resultados obtidos. Em outras palavras, atualmente não se encontram meios procedimentais para avaliar e expressar a incerteza dos resultados das medições realizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tecnologia Nuclear

Ao longo da história, poucos eventos isolados conseguiram alterar significativamente o curso da civilização e, um destes, foi a conclusão e operação bem-sucedida do primeiro reator nuclear, uma conquista que pode ser comparada com a invenção da máquina a vapor, ou à fabricação do primeiro automóvel, se considerados o seu impacto no futuro e seu significado para uma mudança social.

A criação do primeiro reator nuclear tornou possível libertar e utilizar as enormes forças armazenadas no núcleo dos átomos e empregar pela primeira vez esta energia no desenvolvimento de bombas atômicas (ALLARDICE et al., 1968).

Ao longo dos anos, outros reatores, tecnologicamente mais sofisticados, mais engenhosos e mais potentes foram construídos e empregados para canalizar a energia do núcleo atômico em atividades pacíficas, como a geração de eletricidade, a cura de doenças, a busca de conhecimento, a caracterização de materiais, a propulsão de navios e foguetes e muitos outros (ALLARDICE et al., 1968).

2.2 Reatores Nucleares de Fissão

O reator nuclear é um dispositivo no qual os nêutrons da fissão de um núcleo pesado são utilizados para produzir fissão em um segundo núcleo (WALKER, 1967). Assim, quando um átomo é fissionado, são liberados nêutrons que bombardeiam outros átomos, causando sua divisão e, assim, criando uma reação em cadeia. Para que esta cadeia seja mantida, existe uma velocidade, ou nível de energia ideal que, para ser alcançado, é necessário fazer com que os nêutrons viagem através de determinados materiais também presentes no núcleo do reator. (COWAN, 1990).

Embora uma média de 2,5 a 3,0 nêutrons sejam liberados em cada fissão, seu escape do equipamento e sua absorção que não os levem a produzir a fissão são fatores que fazem com que sua contenção seja importante. Portanto, o projeto de um reator nuclear para geração de energia ou para fins de pesquisa deve ser cuidadosamente elaborado (WALKER, 1967).

2.2.1 Breve Histórico dos Reatores Nucleares

No final da tarde de 2 de dezembro de 1942, debaixo da ala oeste das arquibancadas do estádio atlético da Universidade de Chicago, um pequeno grupo de cientistas testemunhou o advento de uma nova era na ciência. Pela primeira vez na história, era iniciada e controlada uma reação em cadeia nuclear autossustentável. Precisamente às 15h25, horário de Chicago, o cientista George Well retirou a haste de controle revestida de cádmio e, com esta ação, o homem liberou e controlou a energia do átomo. Os que testemunharam o experimento obtiveram consciência do que havia acontecido, sorrisos se espalharam por seus rostos e uma onda de aplausos foi ouvida (ALLARDICE et al., 1968).

Após doze anos, em 26 de junho de 1954, na cidade de Obninsk, perto de Moscou, na antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), a primeira usina nuclear foi conectada a uma rede de transmissão para fornecer energia elétrica e produziu cerca de 5 MW. Já em 1955, foi lançado o USS Nautilus, o primeiro submarino de propulsão nuclear equipado com um reator de água pressurizada (DUARTE et al., 2013).

Em breve, a corrida pela tecnologia nuclear abrangeu vários países e novos reatores comerciais, que posteriormente denominados reatores nucleares de primeira geração, foram construídos nos Estados Unidos da América, tais como o Shippingport, um reator de água pressurizada de 60 MW, operado de 1957 à 1982, o Dresden, um reator de água fervente, operado de 1960 à 1978, o Fermi I, um reator de nêutrons rápidos, operado de 1957 à 1972 e, no Reino Unido, o Magnox, um reator refrigerado com dióxido de carbono e moderado com grafite, que utilizava urânio natural (DUARTE et al., 2013).

Alguns anos após o desenvolvimento destes primeiros projetos, vários conceitos de segurança nuclear foram desenvolvidos e implementados nos sistemas nucleares chamados de segunda geração, que consistem em muitos dos reatores atualmente em operação, como os PWR (Pressurized Water Reactor), CANDU (Canadian Deuterium Uranium Reactor), BWR (Boiling Reator de Água), GCR (Gas-Cooled Reactor) e o VVER (Water-Water Power Reactor), o último desenvolvido pela antiga União Soviética (DUARTE et al., 2013).

2.2.2 Tipos de Reatores Nucleares

Atualmente existem vários tipos de reatores nucleares que, normalmente, são classificados de acordo com os seguintes critérios:

- a) Energia dos nêutrons em que ocorre a maior parte das fissões classificados como reatores de altas, intermediárias ou baixas energias;
- b) Material físsil presente no combustível nuclear, podendo ser o Urânio Natural, o Urânio-235, o Urânio-233 ou o Plutônio-239;
- c) Configuração do conjunto combustível nuclear e moderador, podendo ser do tipo homogêneo ou heterogêneo;
- d) Tipo de moderador, podendo ser moderado a grafite (C), água (H_2O), água pesada (D_2O), berílio (Be) ou óxido de berílio (BeO);
- e) Tipo de refrigerante, podendo ser gás (ar, CO_2 ou He), água (H_2O), água pesada (D_2O) ou metal líquido;
- f) Finalidade a que se destinam, podendo ser de potência, projetados com a finalidade de gerar energia elétrica, ou de pesquisa, projetados para gerar nêutrons.

Alguns exemplos são comentados por Cowan (1990):

- a) Em um reator de água leve (Light Water Reactor - LWR), tanto o líquido de arrefecimento como o moderador são de água (H_2O);
- b) Em um reator de água pesada (Heavy Water Reactor - HWR), tanto o líquido de arrefecimento como o moderador são de óxido de deutério (D_2O);
- c) Em um reator de grafite a gás (Gas Cooled Reactor - GCR), o líquido de arrefecimento é um gás, geralmente Hélio (He) ou Dióxido de carbono (CO_2) e o moderador é grafite.

Embora não sejam as únicas tecnologias usadas ou possíveis, estes reatores foram os mais amplamente desenvolvidos no mercado de reatores nucleares (COWAN, 1990).

Na Tabela 01 são apresentados dados sobre os reatores nucleares de potência no mundo, distribuídos segundo suas respectivas características construtivas e situação operacional.

Tabela 01 – Reatores de potência no mundo

| Tipo | Descrição | Em Construção | Em Operação | Desligado |
|-------|--|---------------|-------------|-----------|
| BWR | Reator refrigerado e moderado a água fervente | 1 | 61 | 52 |
| FBR | Reator rápido | 3 | 3 | 8 |
| GCR | Reator refrigerado a gás e moderado a grafite | - | 11 | 41 |
| HTGR | Reator refrigerado a gás de alta temperatura | - | 1 | 4 |
| HWGCR | Reator refrigerado com dióxido de carbono e moderado a água pesada | - | - | 3 |
| HWLWR | Reator refrigerado a água leve fervente e moderado a água pesada | - | - | 2 |
| LWGR | Reator refrigerado a água leve e moderado a grafite | - | 11 | 13 |
| PHWR | Reator refrigerado e moderado a água pesada pressurizada | 3 | 47 | 11 |
| PWR | Reator de água pressurizada, | 48 | 303 | 63 |
| SGHWR | Reator gerador de vapor moderado a água pesada | - | - | 1 |
| --- | Outros | - | - | 2 |
| Total | | 56 | 437 | 200 |

Fonte: IAEA (2022b)

2.2.3 Reatores Nucleares de Pesquisa

Os reatores nucleares de pesquisa são poderosas ferramentas que contribuem para o progresso científico e tecnológico no mundo todo, sendo utilizados para pesquisa e desenvolvimento em vários campos da ciência e da tecnologia nuclear.

Estes equipamentos são utilizados para produzir radioisótopos cruciais para a medicina e para aplicações industriais. E tem as atribuições de apoiar o desenvolvimento da infraestrutura nuclear dos países e de serem instrumentos para outras pesquisas e aplicações industriais em benefício da humanidade (IAEA, 2022a).

Existem diferentes tipos de reatores de pesquisa, e sua denominação varia de acordo com o propósito a que se destina o fluxo de nêutrons deles proveniente.

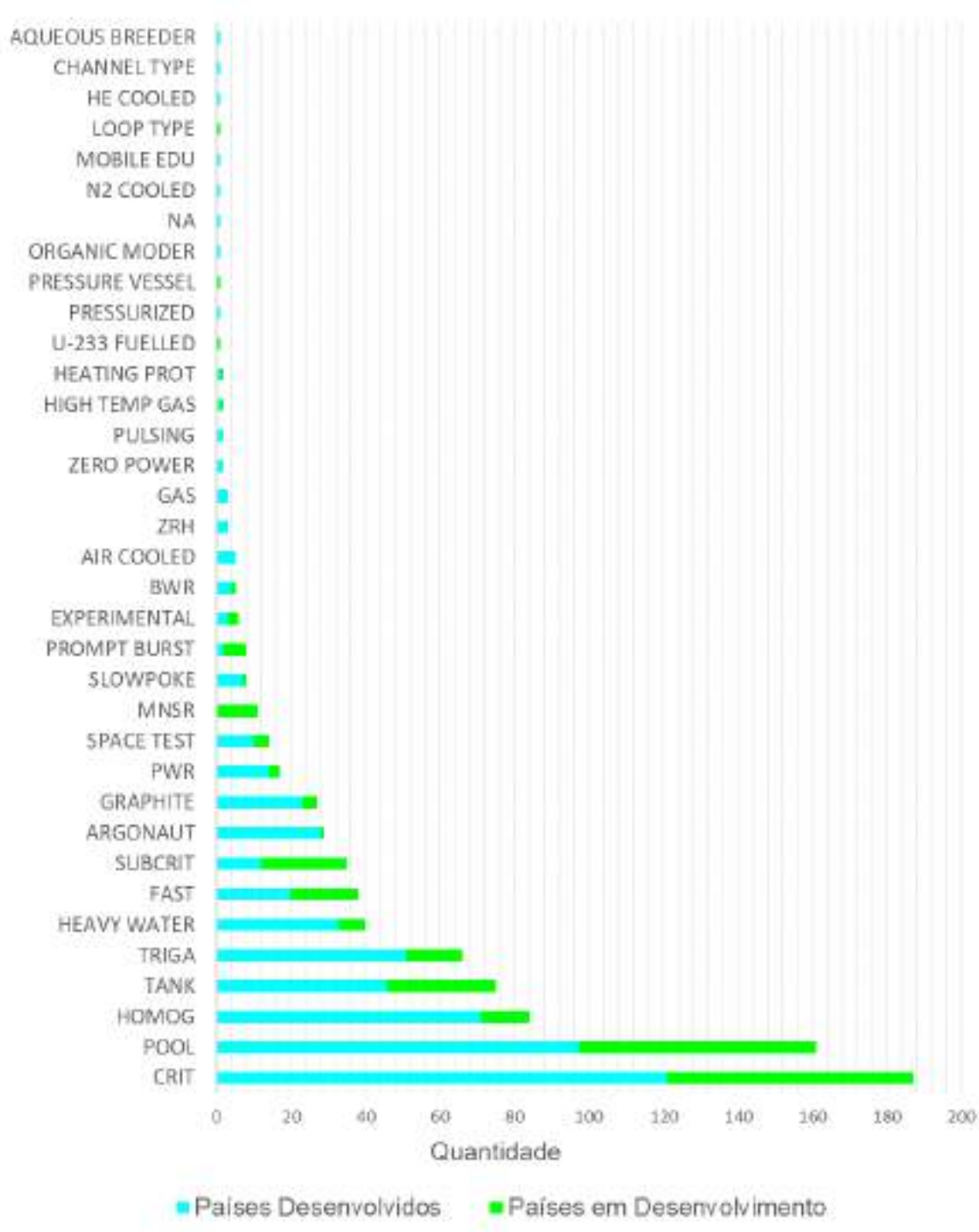
A seguir são citados os principais tipos de reatores de pesquisas:

- a) Reatores para teste de materiais: Fornecem um fluxo alto de nêutrons rápidos, permitindo estudar o comportamento sob irradiação apresentado por materiais utilizados em reatores nucleares;
- b) Reatores para produção de radioisótopos: Destinam-se à produção de isótopos radioativos utilizados em atividades medicinais, industriais e agrícolas;
- c) Reatores de potência zero: Utilizados principalmente para estudar as propriedades neutrônicas de um arranjo físsil de baixa potência ($P < 1$ kW), também são chamados conjuntos críticos ou unidades críticas;
- d) Reatores protótipo: São reatores de baixa potência que servem como protótipo para reatores de potência elevada.

Convém destacar que esta classificação não é absoluta, pois, muitas características de um tipo de reator se confundem com as de outro, de maneira que, normalmente, um tipo de reator se caracteriza por detalhes de seu projeto e suas instalações experimentais.

Na Figura 01 são apresentados os tipos de reatores de pesquisa e suas respectivas quantidades existentes no mundo.

Figura 01 – Tipos dos reatores de pesquisa no mundo



Fonte: IAEA (2023)

Na Tabela 02 são apresentadas as situações operacionais dos reatores de pesquisa existentes no mundo.

Tabela 02 - Situações operacionais dos reatores de pesquisa no mundo

| Situação | Países Desenvolvidos | Países em Desenvolvimento | Total |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|------------|
| Planejado | 2 | 12 | 14 |
| Em construção | 4 | 5 | 9 |
| Operacional | 133 | 87 | 220 |
| Desligamento temporário | 11 | 4 | 15 |
| Desligamento prolongado | 5 | 8 | 13 |
| Desligamento permanente | 46 | 14 | 60 |
| Em descomissionamento | 63 | 3 | 66 |
| Descomissionado | 413 | 31 | 444 |
| Cancelado | 12 | 4 | 16 |
| Total | 689 | 168 | 857 |

Fonte: IAEA (2023)

2.3 Elementos Combustíveis

Os elementos combustíveis são parte essencial para o funcionamento dos reatores nucleares de fissão, e neles está o isótopo físsil e/ou fértil, como por exemplo, o Urânio-235, o Urânio-238, o Plutônio-239, o Tório-232, ou ainda a misturas destes, como o MOX, uma mistura de óxidos de urânio e plutônio. São

estes isótopos que permitem a liberação de grandes quantidades de energia, além da emissão de nêutrons que possibilitam manter o processo de reação em cadeia.

O combustível nuclear além de ser físsil, deve apresentar elevada condutividade térmica, boa resistência à corrosão, boa resistência mecânica em altas temperaturas e temperatura máxima de operação elevada, sendo esta última, um dos fatores mais importantes no projeto térmico de um reator. O material físsil pode estar na forma metálica pura, na forma de um composto, em geral um óxido, ou na forma de uma liga com outro metal, em geral alumínio ou zircônio.

O revestimento que envolve o combustível nuclear deve possuir baixa seção de choque para captura radiativa de nêutrons, elevada condutividade térmica, boa resistência mecânica em altas temperaturas e inércia química em relação ao combustível nuclear e ao refrigerante. Os materiais mais utilizados no revestimento de combustíveis nucleares são alumínio, aço inoxidável e ligas de zircônio, denominadas Zircaloy, além das ligas de magnésio, denominadas Magnox, que, atualmente, estão em desuso.

2.3.1 Tipos de Elementos Combustíveis

Existem diversas formas de configuração de elementos combustíveis, e estas, variam de acordo com o projeto e a configuração dos reatores nos quais serão utilizados. São citados a seguir dois exemplos.

Nos reatores de potência do tipo PWR (refrigerado e moderado a água pressurizada), cujo objetivo é a geração de energia elétrica e que são atualmente em maior quantidade em operação e construção no mundo, são utilizados combustíveis na forma de pastilhas de material cerâmico. Estas pastilhas ficam no interior de tubos (varetas) de revestimento. Estas varetas, por sua vez, são montadas em arranjos regulares denominados elementos combustíveis, que são constituídos por outros componentes mecânicos metálicos como o bocal, molas e grades espaçadoras (WNA, 2018).

Dentre os reatores de pesquisa, o reator denominado “tipo piscina” destaca-se como o mais utilizado em todo mundo, sendo também frequentemente denominado reator do tipo MTR (reatores para teste de materiais). Nestes reatores, o combustível nuclear é formado por placas agrupadas em elementos combustíveis, sendo o revestimento de cada placa feito de alumínio, em cujo núcleo

fica localizado o material combustível propriamente dito, constituído por um composto de urânio, geralmente o U_3Si_2 , na forma de partículas dispersas em uma matriz de alumínio.

2.4 Elementos Combustíveis no IPEN

Nas dependências do IPEN, na Cidade Universitária em São Paulo, fica localizado o reator IEA-R1 de propriedade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Trata-se de um reator termonuclear de pesquisa, do tipo piscina aberta, que utiliza água leve como blindagem, moderador e fluído refrigerante e cuja finalidade é o estudo de física de reatores, efeitos da radiação em materiais e produção de radioisótopos, com aplicação na medicina, indústria e nas pesquisas biológicas, assim como no treinamento de pessoal para a operação de reatores (DURAZZO, 1985).

Destaca-se que o uso de radioisótopos na medicina é, certamente, uma das mais importantes aplicações sociais da energia nuclear, tendo o IPEN tem um papel especial na história da medicina nuclear no Brasil, pois sua produção representa aproximadamente 98% do total produzido no País (Durazzo, 2008).

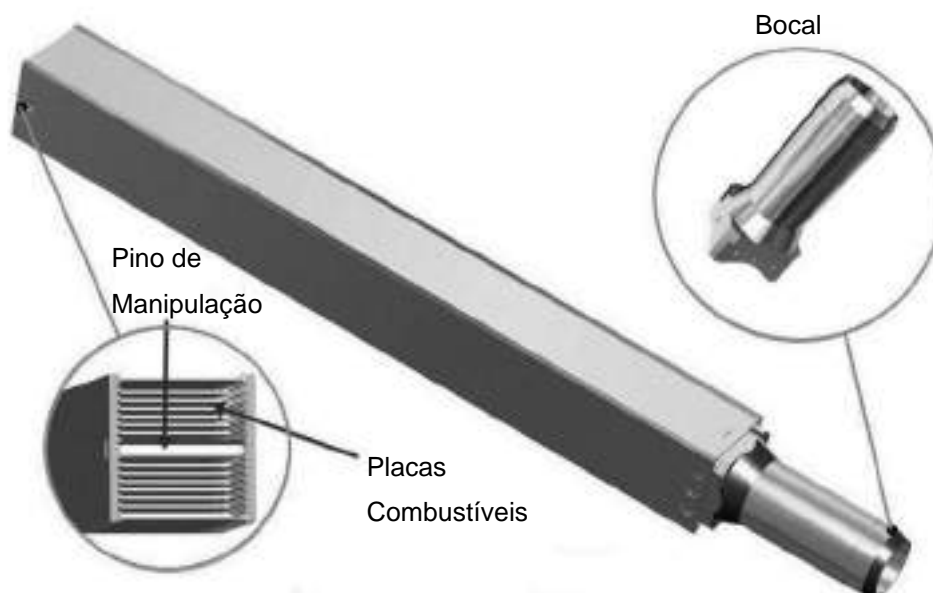
O núcleo do reator IEA-R1 é montado em uma matriz 5×5 formada por 20 elementos combustíveis, 4 elementos de controle de combustível e um dispositivo de irradiação central (DURAZZO et al., 2019). Esta matriz é sustentada por uma treliça de alumínio, fixada em uma plataforma rolante que fica localizada acima da superfície da piscina, podendo ser movimentada ao longo de todo o seu comprimento (Durazzo, 1985).

Cada um destes elementos combustíveis, denominados elementos combustíveis padrão, são compostos por 18 placas combustíveis planas e paralelas, montadas mecanicamente em dois suportes laterais de alumínio com ranhuras (DURAZZO et al., 2019), conforme apresentado na Figura 02.

Essas placas combustíveis espaçadas permitem a passagem de um fluxo de água que serve como refrigerante e moderador, sendo que, cada uma das placas internas possui um núcleo contendo o material físsil.

Atualmente, o reator utiliza placas combustíveis de dispersão U_3Si_2 -Al com carga de urânio de $3,0 \text{ gU/cm}^3$.

Figura 02 – Elemento combustível nuclear composto por placas



Fonte: Durazzo et al. (2019)

Além do reator IEA-R1, também está localizado no IPEN o reator IPEN/MB-01, que é um reator nuclear de potência zero, projetado para operar a uma potência máxima de 100 watts e cujo núcleo original foi composto de 680 varetas combustíveis. Em agosto de 2019 este reator recebeu um novo núcleo, projetado para operar com 19 elementos combustíveis do tipo placa e com o objetivo de simular a física de nêutrons do núcleo do futuro Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) (IPEN, 2020).

O projeto do RMB prevê a construção de um reator do tipo piscina aberta com potência máxima de 30 MW, que terá como referência o Reator Nuclear OPAL de 20 MW construído na Austrália, e está sendo projetado pela empresa argentina INVAP, que também participou do projeto básico do reator e dos sistemas complementares (IPEN, 2016).

O projeto conceitual dos sistemas nucleares e convencionais do RMB e as instalações nucleares e radiativas associadas estão sendo desenvolvidos pelo

pessoal técnico dos Institutos de Pesquisas do CNEN, liderados pelo IPEN, que agrega experiência nacional em projeto nuclear (Reator Nuclear IPEN/MB-01), operação e reforma de reator de pesquisa (Reator Nuclear IEA-R1 de 5 MW), desenvolvimento e fabricação de elementos combustíveis (CECON) e a liderança nacional na produção e distribuição de radioisótopos (IPEN, 2016).

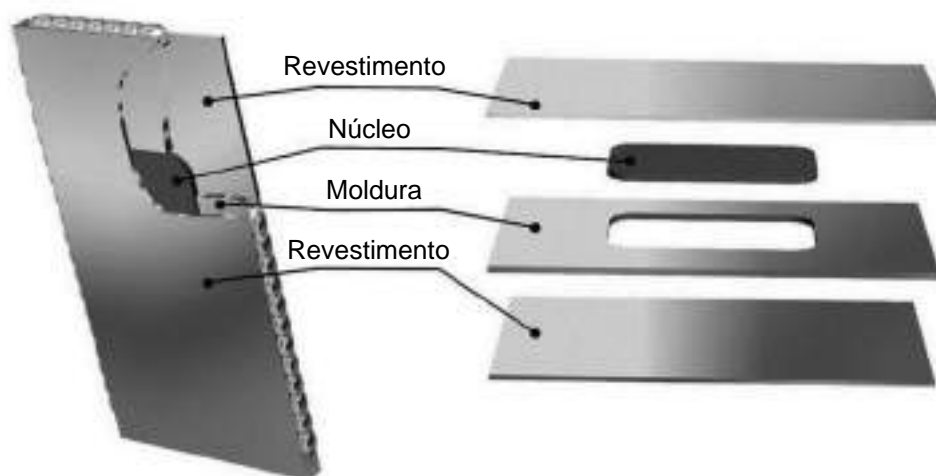
2.4.1 Processo de Fabricação das Placas Combustíveis no CECON – IPEN

Um dos principais programas do IPEN, realizado por intermédio do CECON, é o de fabricar o combustível necessário para suprir o seu reator nuclear de pesquisas IEA-R1 e desenvolver a fabricação dos novos combustíveis tipo placa para o reator nuclear IPEN/MB-01.

Nestas placas combustíveis, o núcleo é fabricado de acordo com técnicas tradicionais de metalurgia do pó e as placas de revestimento e moldura são fabricadas com a utilização da liga de alumínio ASTM 6061.

Este conjunto composto pelo núcleo e placas de revestimento são preparados de acordo com a técnica de montagem núcleo-moldura-revestimentos ou “picture frame technique” (DURAZZO et al., 2015), conforme Figura 03.

Figura 03 – Conjunto de montagem núcleo-moldura-revestimento



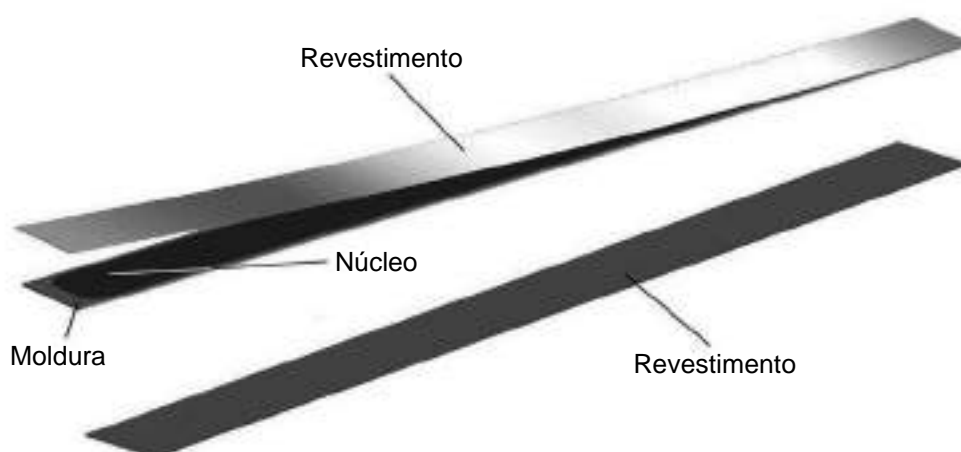
Em seguida inicia-se a etapa da laminação, que compreende uma sequência de laminações a quente e a frio, este método é amplamente utilizado para a produção de elementos combustíveis tipo placa para muitos reatores de pesquisa em todo o mundo (DURAZZO et al., 2015).

Após o processo de laminação obtém-se uma placa contendo no seu interior o núcleo combustível totalmente isolado do meio ambiente, isto graças ao processo de perfeito caldeamento entre o núcleo e a moldura com as placas de revestimento.

Em seguida as placas combustíveis são pré-cortadas para facilitação do manuseio durante as operações subsequentes de aplainamento, radiografias, traçagem e corte final (DURAZZO et al., 2015).

Ao final do processo de fabricação, as placas combustíveis apresentam um núcleo onde está localizado o combustível nuclear propriamente dito, revestido por duas camadas de alumínio, conforme apresentado na Figura 04.

Figura 04 – Vista explodida da placa combustível após a laminação

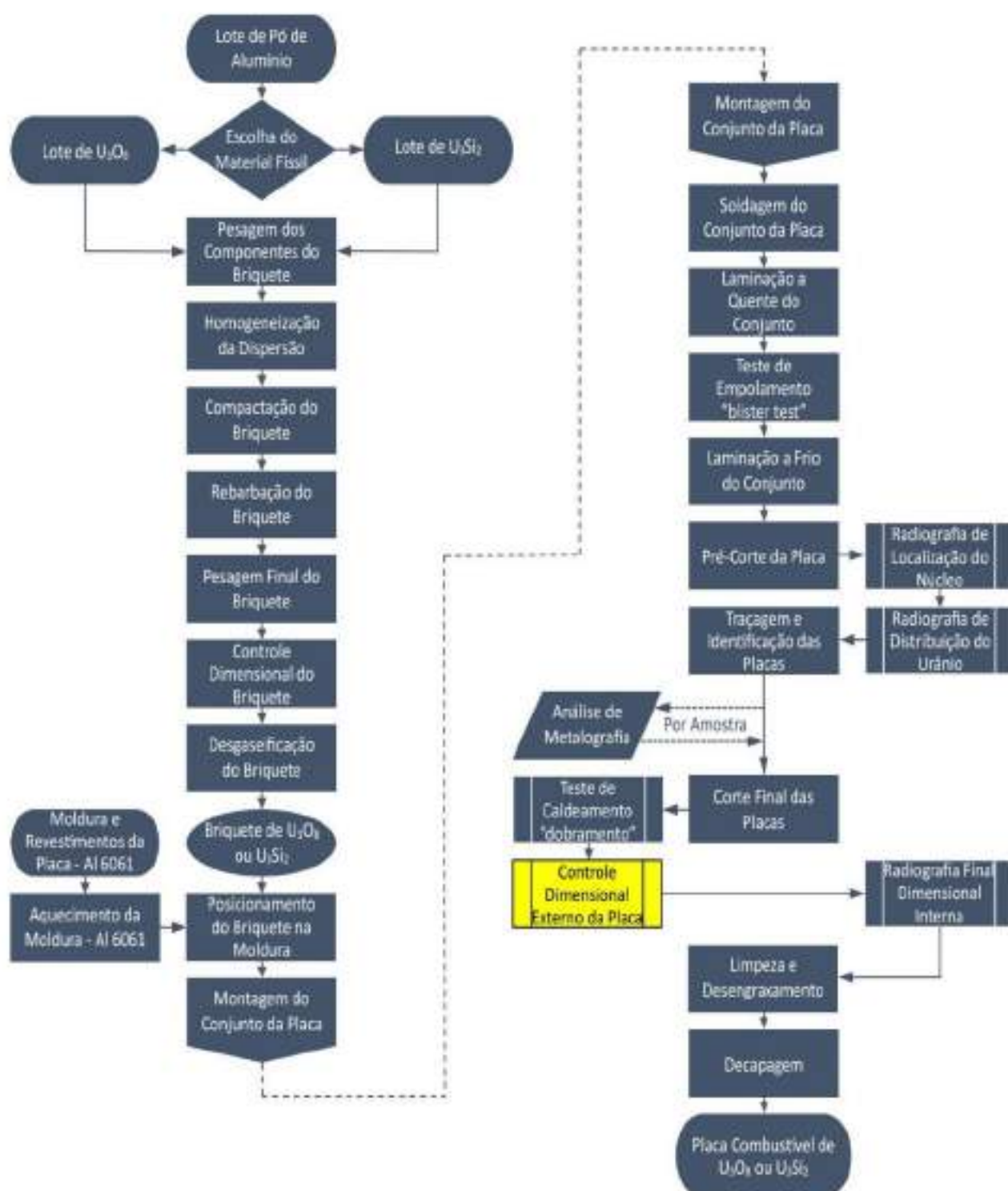


Fonte: Durazzo et al. (2019)

O IPEN atualmente pode fabricar núcleos combustíveis a base de dispersões U_3O_8 -Al (DURAZZO et al., 2017a) e U_3Si_2 -Al (DURAZZO et al., 2017b).

Apresenta-se na Figura 05 uma visão simplificada, ainda assim abrangente, da sequência de fabricação das placas combustíveis no CECON-IPEN, a partir da entrada dos lotes dos materiais componentes.

Figura 05 – Sequência de fabricação das placas combustíveis no IPEN



Fonte: Adaptado de Ferrufino (2011)

Para mais informações e um estudo mais detalhado sobre os procedimentos gerais para fabricação de placas de combustível de dispersão sugere-se a consulta na literatura disponível (DURAZZO et al., 2015; BEAVER et al., 1964; KAUFMANN, 1962).

2.4.2 Importância do Controle Dimensional das Placas Combustíveis

As corrosões nas placas combustíveis durante os processos de fissão realizados dentro do reator, podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como: o material do revestimento, o tratamento da superfície, as impurezas presentes no meio, a temperatura, o pH, a condutividade e a qualidade da água e as demais condições gerais de operação ao longo dos anos, podendo estes fatores estarem correlacionados ou não (IAEA, 1988).

Considerando-se que uma eventual liberação do produto de fissão das placas combustíveis certamente acarretará muitos problemas, torna-se claro que qualquer possibilidade da ocorrência de corrosão deve ser minimizada e, também, que a espessura mínima do revestimento da placa combustível necessita ser cuidadosamente controlada e conhecida (IAEA, 1988).

É importante notar que, um desvio dimensional que esteja além dos limites de especificação da espessura da placa poderá afetar a espessura mínima do revestimento devendo, portanto, ser rigorosamente controlado.

De maneira semelhante, caso as variações de espessura da placa ultrapassem os limites especificados, o encaixe de montagem do elemento combustível poderá não ser possível, considerando-se a precisão existente na largura dos canais do suporte lateral onde as placas combustíveis serão encaixadas e posteriormente cravadas (DURAZZO et al., 2015).

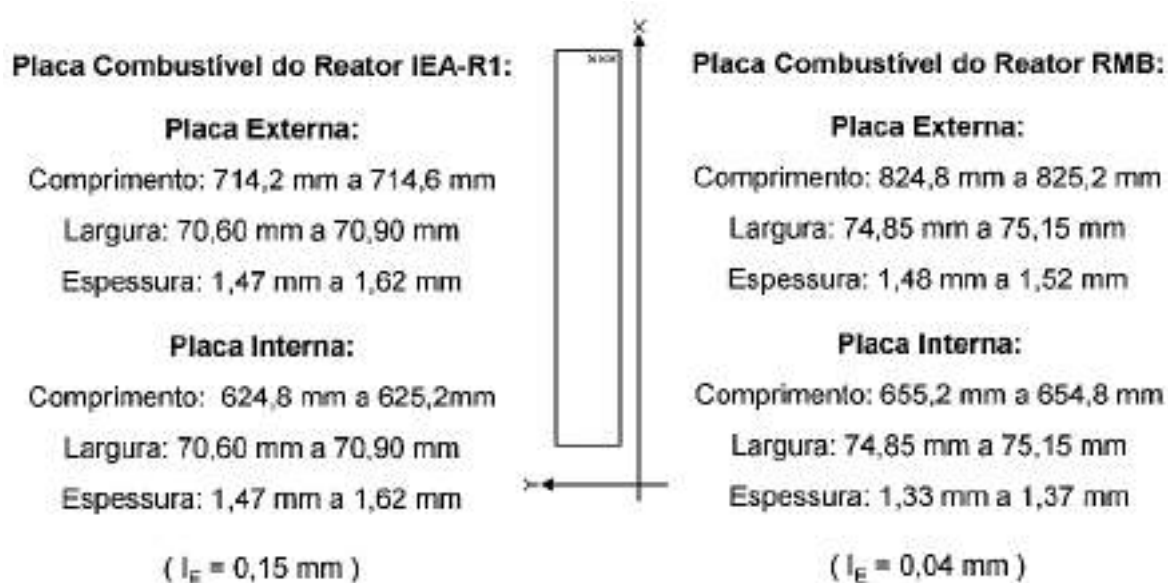
Conclui-se assim, que a tolerância da espessura da placa dependerá da medida de espessura mínima admissível para o revestimento e das tolerâncias existentes no espaçamento entre os canais de encaixe do suporte lateral.

2.4.3 Especificações Dimensionais das Placas Combustíveis

Como mencionado em anteriormente, cada tipo de elemento combustível é especificado e produzido de acordo as características do reator em que será empregado e deve atender, além dos requisitos de fabricação, os requisitos de inspeção, e aos seus critérios de aceitação (DURAZZO et al., 2015).

Atualmente no CECON são fabricadas as placas combustíveis que compõem os elementos combustíveis dos reatores de pesquisa IEA-R1 e IPEN/MB-01, cujas especificações dimensionais são apresentadas na Figura 06

Figura 06 – Especificações dimensionais das placas combustíveis



Fonte: Adaptado de IPEN (2014a; 2014b; 2017a; 2017b)

Um elemento de destaque nas especificações das placas fabricadas é a significativa diferença encontrada nos Intervalos de Especificação (I_E) de espessura existentes nos projetos das placas dos elementos combustíveis dos reatores IEA-R1 e RMB tendo, as placas do RMB tolerâncias de espessura aproximadamente 73,3% menores, se comparadas às tolerâncias das placas do IEA-R1.

2.4.4 Métodos de Controle e Análise dos Elementos Combustíveis

Existem várias literaturas que discorrem sobre o emprego de diferentes sistemas para o controle e medição das diversas características dos elementos combustíveis. A seguir são relatados alguns dos estudos realizados.

Para estudar as modificações estruturais ocorridas “in situ” nas placas combustíveis, devido ao processo de irradiação dentro de um reator de alto fluxo, Zaz et al. (2018) desenvolveram um dispositivo de dupla face ultrassônico de alta resolução, com o objetivo de medir a variação da distância entre as placas dos

elementos combustíveis. Este dispositivo foi composto por transdutores integrados em ambos os lados de uma lâmina com espessura total de 1 mm, associados a um conjunto de instrumentos de aquisição e excitados por disparos com uma frequência central de 120 MHz pois nesta faixa de frequência, a estrutura em camadas dos dispositivos é sensível ao comprimento de onda ultrassônico gerado. Os sensores foram modelados utilizando-se um protocolo de pulso-eco, permitindo inferir estimativas de distância, por intermédio da gravação do tempo de voo (ToF), dos sinais refletidos pelas superfícies das placas combustíveis atingindo, segundo os dados experimentais, um erro total na estimativa da distância global entre placas inferior a $\pm 0,02$ mm.

Em um estudo sobre as mudanças de espessura ocasionados em placas combustíveis de dispersão U-Mo em uma matriz Al-Si, após irradiação em altas densidades de fissão, Keiser Jr et al. (2017) fizeram uso de um aparato de medição remoto, que aplicava dois transdutores do tipo transformador diferencial variável linear (LVDT) de marca Sony. O aparato contava com um programa de medição automatizado para posicionamento e coleta de dados em posições previamente definidas sobre a placa, sendo que, seus valores de calibração e zeragem permaneceram dentro do valor de variação máxima de $\pm 0,01$ mm.

Fabert et al. (2014) utilizaram em seus estudos um instrumento óptico baseado na técnica de interferometria de speckle, que foi desenvolvido para detectar e quantificar as deformações da superfície de revestimento em varetas combustíveis, submetidas a condições de degradação próprias de ambientes nucleares. O aparato mostrou-se capaz de fornecer medições não destrutivas em superfícies de espalhamento, como os revestimentos da haste do combustível nuclear. Os experimentos mostraram que, a partir do registro de imagens antes e depois da deformação da superfície do revestimento, era possível quantificar e reconstruir com exatidão micrométrica essa deformação.

Em outro estudo, com objetivo de visualizar os defeitos internos em uma amostra de combustível nuclear tipo placa, Park et al. (2013) desenvolveram uma técnica de imagem utilizando-se um interferômetro óptico, onde uma onda térmica com um padrão de intensidade senoidal induzia uma variação de tensão periódica na placa. A imagem de tensão variável era captada por intermédio de um

interferômetro de laser óptico e, assim, a distribuição da deformação produzida por defeitos internos era convertida em uma imagem de deformação.

Em uma patente depositada em 26 de julho de 2011 sob o número 10.083.768 no Escritório Americano de Marcas e Patentes (USPTO), Agência do Departamento de Comércio Norte-americano, Tournant et al. (2013) descreveram um método e um aparato projetado para controlar as posições de vários conjuntos de combustível nuclear em relação a placa superior em um núcleo do reator. Este aparato era composto por elementos para verificar se os conjuntos de combustível nuclear estavam corretamente posicionados, com a utilização de um dispositivo de captura de imagem e um computador.

Fundamentando-se nos estudos realizados, observa-se que, embora existam vários projetos de pesquisa voltados para o controle, medição e análise dos combustíveis nucleares, a maioria destes não se relaciona diretamente aos processos de controle da fabricação dos elementos combustíveis. Ao contrário, distingue-se que os estudos são, na sua maioria, voltados para a verificação e medição das variações dimensionais e de outras características funcionais ocorridas nos elementos durante ou após a sua aplicação no reator nuclear.

2.4.5 Estado da Técnica no Controle Dimensional das Placas Combustíveis

Em uma patente depositada em 11 de dezembro de 2007 sob o número CN 101.169.319 no Escritório de Patentes da China, antiga "State Intellectual Property Office" (SIPO) ou atual "National Intellectual Property Administration" (CNIPA), Mingfei et al. (2010) apresentam o desenvolvimento de um "Dispositivo de Detecção Automática de Espessura da Placa Combustível Nuclear", cujo objetivo é "tornar o processo de controle da espessura de placas combustíveis mais prático, rápido e confiável".

Esta patente se refere a um dispositivo que adota uma estrutura tipo de módulo, composto por uma cabeça de medição, uma base, um controlador numérico do eixo X, um controlador numérico do eixo Y, um transdutor indutivo e uma mesa de controle.

Segundo informações apresentadas, o dispositivo ainda possui funções automáticas de detecção de erros, de posicionamento e de alarme e sua operação pode ser realizada à distância.

Na referida patente consta uma declaração de que o erro máximo de medição a ser obtido é de 0,005mm. Todavia, observa-se que este dado não é completado por nenhuma outra informação adicional, não ficando claro se a declaração deste erro se refere à incerteza de medição instrumental, ou ao erro máximo admissível obtido do dispositivo, ou ainda, a alguma outra característica metrológica detectada, como a precisão de medição, a resolução, a tendência ou ainda a estabilidade do dispositivo.

O texto da patente também não descreve nenhuma análise das fontes de erros ou dos fatores de influência existentes no processo de medição, sejam eles de origem sistemáticas ou aleatórias, tais como vibrações, contaminações do ambiente, desvios de temperatura, possíveis erros geométricos e desvios de posicionamento do objeto da medição etc.

Concluiu-se, deste modo, que este controle da espessura de placas combustíveis de forma automatizada e sem a intervenção de inspetores no processo, descrita nesta patente de número CN 101.169.319, apresenta-se, até o momento, como o estado da técnica no controle dimensional realizado durante o processo de fabricação de placas combustíveis nucleares.

2.5 Medição de Chapas Metálicas

Na área industrial são encontrados diversos métodos consagrados para a medição de espessura de chapas metálicas, desde medições estacionárias, executadas mediante o contato mecânico entre o medidor e a chapa (FARAGO et al., 1994), com a aplicação de micrômetros externos e paquímetros universais, até sistemas de medição dinâmicos com ou sem o contato mecânico entre o medidor e as chapas, com a aplicação de sistemas mecânicos, eletromagnéticos e ópticos (NOLL et al, 2008) (EC, 2003).

Além destas, diversas novas propostas vêm sendo desenvolvidas, como por exemplo, a medição de espessura de placas de aço por transmissão de ultrassom acoplados a ar (WAAG et al., 2015), ou a medição de espessura de chapa de aço com elevação utilizando campo magnético pulsado (YOSHIOKA et al., 2017), ou ainda a medição de espessura de placas de aço não magnéticos com a aplicação de um novo sensor planar de bobina tripla (LU et al., 2019).

2.6 Sensores de Medição

Como consequência da busca pela competitividade e da necessidade da indústria no incremento de sua eficiência e da qualidade de seus produtos, a metrologia industrial tem evoluído dos métodos de inspeção tradicionais, representados pelas habilidades de inspetores no final das linhas de produção, para a implantação de novos sistemas de inspeção automática, sejam estes sistemas off-line ou on-line, onde são utilizadas tecnologias de microeletrônica, processamento (hardware e software) e novas técnicas ópticas. Neste aspecto, as tecnologias de sensoriamento, detecção e transdução são elementos essenciais neste desenvolvimento (JONES, 1987).

Sensores de medição são usados em todas as áreas da ciência e da indústria, sendo suas especificações, recursos, requisitos e custos altamente dependentes do setor de mercado a que se propõem atender. Estima-se que existem cerca de 2.000 tipos básicos de sensores e cerca de 60.000 comercialmente disponíveis para medições de processos on-line, movimentando no mercado mundial bilhões de dólares anuais (MEDLOCK, 1987).

Na área industrial, sensores de deslocamento são amplamente utilizados na medição de movimentação de partes móveis de máquinas, no monitoramento do desgaste de ferramentas e no controle das dimensões de peças fabricadas em sistemas de usinagem. São aplicados também sensores em robôs de sistemas flexíveis de manufatura, sensores para seleção de peças em processos de montagem seletivos, garantindo intercambialidade, e sensores para inspeção e testes de conjuntos ou subconjuntos montados (JONES, 1987).

Existem diversas formas de se classificar os sensores de deslocamento existentes. Neste trabalho optou-se por relacioná-los por meio dos princípios de funcionamento mais utilizados, dividindo-os em sensores que atuam sem e com o contato mecânico sobre o objeto da medição.

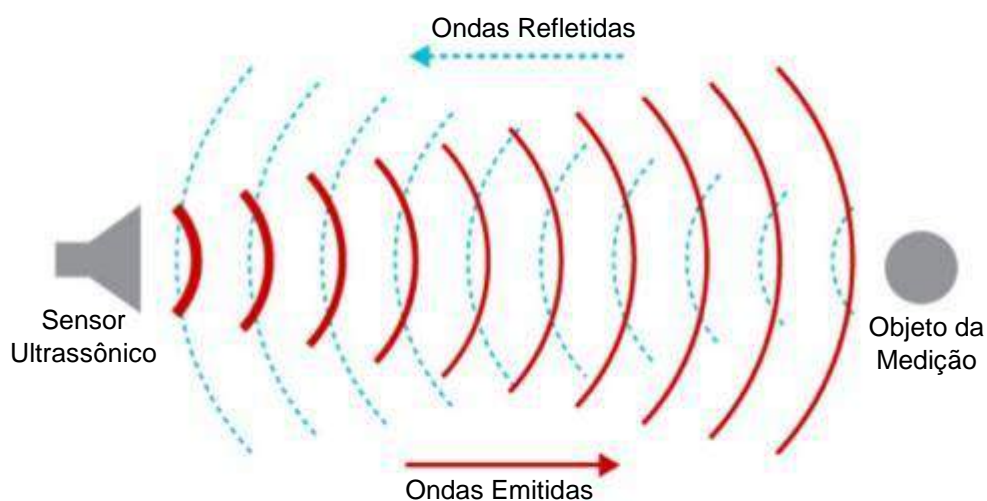
2.7 Princípios de Medição de Deslocamento Sem Contato Mecânico

Diferentes tipos de sensores são utilizados em medições onde não é possível ou desejável o contato entre o medidor e o objeto da medição. Os princípios de funcionamento mais comuns destes sensores são apresentados a seguir.

2.7.1 Sensores Ultrassônicos

Nos sensores ultrassônicos uma onda acústica é periodicamente emitida em direção ao objeto alvo da medição, que produz a sua reflexão, lançando-a de volta ao elemento sensor (Figura 07). O tempo ocorrido entre a emissão e recepção desta onda (ToF) é correlacionada à distância do alvo (HATZFELD et al, 2014).

Figura 07 – Princípio de funcionamento dos sensores ultrassônicos



Fonte: Texas Instruments Incorporated (2021)

O elemento detector deste tipo de sensor normalmente é composto por um material piezo-cerâmico, localizado junto a face de medição do sensor, que funciona simultaneamente como elemento emissor e receptor (AZINHEIRA, 2002).

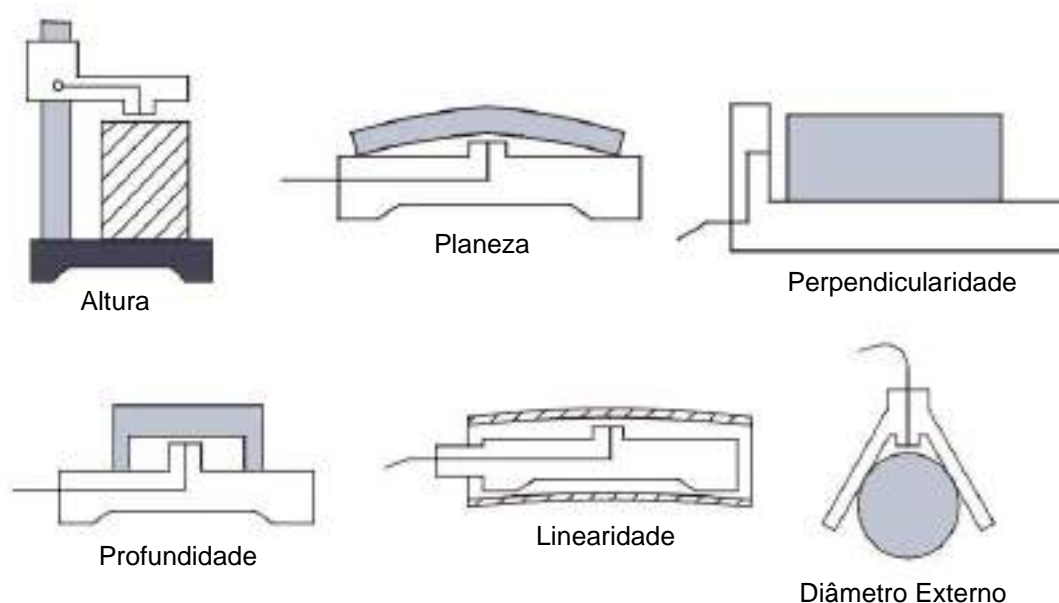
2.7.2 Sensores Pneumáticos

A medição pneumática é um dos meios mais utilizados para inspeção industrial, compreendendo elementos relativamente simples, como filtros de ar, colunas de vidro, diafragmas, tubos manométricos e de Bourdon (RAGHAVENDRA et al, 2013).

O princípio de medição dos sensores pneumáticos consiste em correlacionar a posição relativa entre o elemento sensor e o objeto da medição às variações decorrentes de pressão de um fluxo calibrado de ar (CAVACO, 2002).

Os sensores pneumáticos podem ser adaptados para medir diversas características dimensionais (RAGHAVENDRA et al, 2013), conforme apresentado na Figura 08.

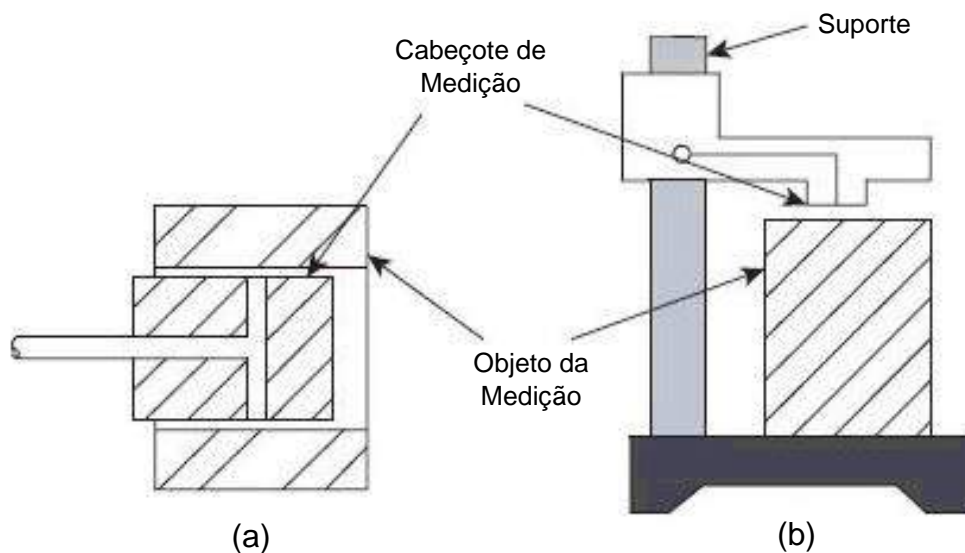
Figura 08 – Aplicações dos sensores pneumáticos



Fonte: Raghavendra et al (2013)

Quanto à sua configuração, os sensores pneumáticos que atuam sem contato mecânico com o objeto da medição podem ser classificados em dois tipos, sendo: (a) por aproximação direta, onde o elemento medido é o bocal de saída do elemento medidor (indicado apenas para medições internas), e (b) por estrangulamento, onde o fluxo do ar é o próprio elemento de medição. Na Figura 09 são apresentados exemplos destes dois tipos de configuração (RAGHAVENDRA et al, 2013).

Figura 09 – Configurações de sensores pneumáticos



Fonte: Raghavendra et al (2013)

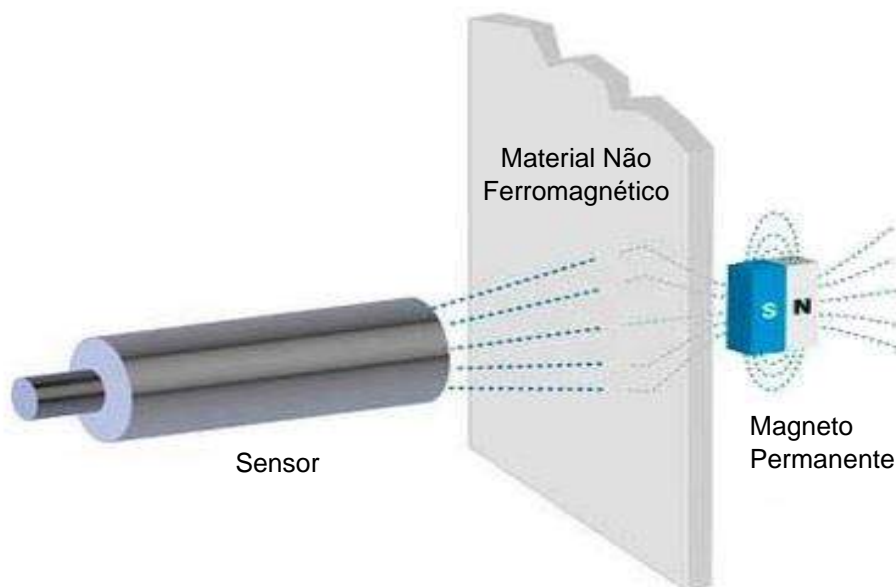
Nestes sensores, a taxa de variação depende da seção transversal do bico injetor e a folga entre o bico e a superfície do objeto da medição (RAGHAVENDRA et al, 2013).

2.7.3 Sensores Magnéticos

Os sensores magnéticos se utilizam de campos magnéticos estáticos, placas magnéticas ou resistores magnéticos (MDR), e tem por princípio de funcionamento materiais portadores de carga, que são deslocados pela força de Lorentz ao cruzar um campo magnético, designado por efeito de Gauss (HATZFELD et al, 2014).

Nestes sensores a alteração da distância entre o sensor e o objeto da medição produz um aumento da resistência ôhmica do material (Figura 10), contudo, é importante considerar que este aumento da resistência não possui é linear e possui uma curva semelhante à de um diodo ou de um transistor, o que leva a necessidade de uma correção desta tendência para a garantir uma linearidade do sinal de resposta (HATZFELD et al, 2014).

Figura 10 – Princípio de funcionamento dos sensores magnéticos



Fonte: Baumer do Brasil Ltda (2022)

Os sensores de efeito Hall também são baseados na lei de Gauss, entretanto, ao contrário dos resistores magnéticos, eles não medem o aumento da resistência à corrente elétrica dentro do semicondutor, mas sim, a tensão ortogonal à corrente (HATZFELD et al, 2014).

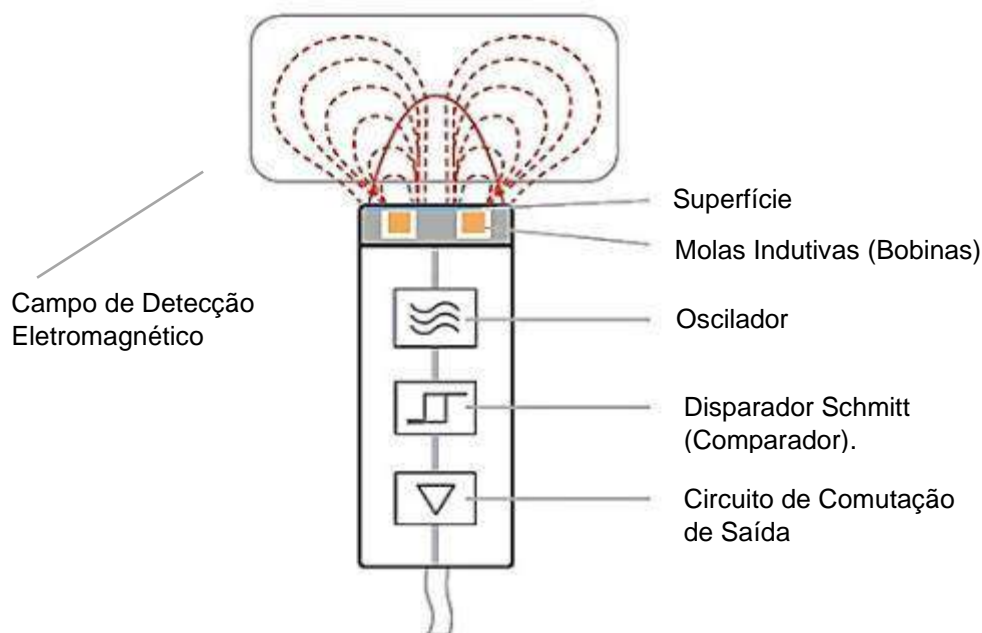
2.7.4 Sensores Indutivos

Os sensores indutivos são baseados nos princípios dos circuitos eletromagnéticos (Figura 11) e podem ser classificados como sensores autogeradores ou sensores passivos (EREN, 2017).

Nos sensores de autogeração, um movimento relativo entre o condutor e o campo magnético induzem uma tensão no condutor ou, em outros casos, um campo magnético variável ligado a um condutor estacionário produz a tensão no condutor (EREN, 2017).

Nos sensores passivos é necessária uma fonte externa de energia e, nestes casos, a ação do transdutor é simplesmente a de modulação do sinal de excitação (EREN, 2017).

Figura 11 – Princípio de funcionamento dos sensores indutivos



Fonte: Surya (2021)

Os sensores indutivos sem contato permitem a medição de deslocamentos, com a vantagem de não provocarem retroação sobre o processo devido a inexistência de uma força de medição (CAVACO, 2002).

No entanto, deve-se considerar a necessidade de efetuar uma calibração para cada montagem específica, uma vez que o comportamento do sistema montado depende do posicionamento espacial entre os elementos envolvidos, bem como das características geométricas e do material do objeto sobre a qual se está sendo medido o deslocamento (CAVACO, 2002).

Além disso, a indutância destes sistemas depende de muitos parâmetros como, por exemplo, a permeabilidade magnética do material em uma bobina, a geometria ou a saturação do circuito magnético (HATZFELD et al, 2014).

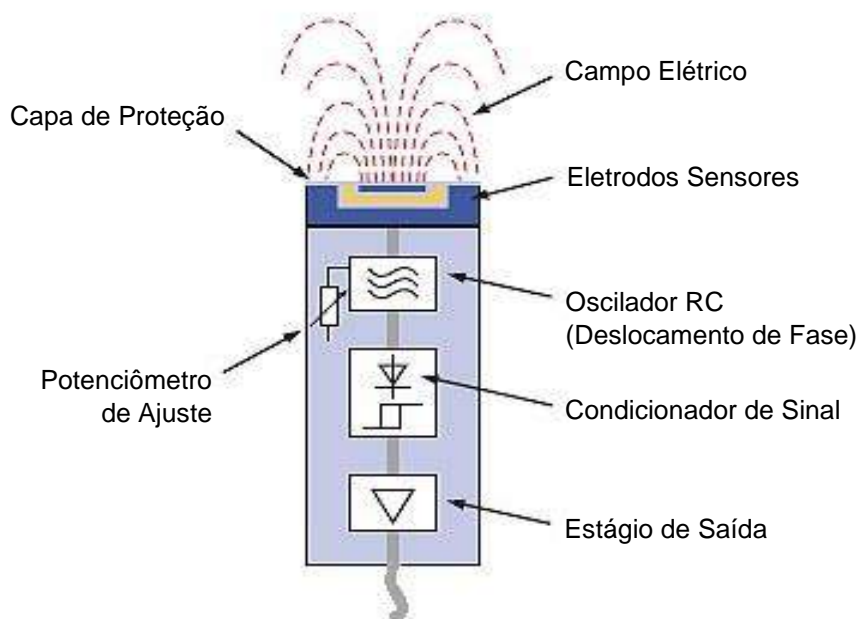
Uma variação destes sensores é a que se utiliza do efeito de correntes parasitas (denominadas correntes de Foucault), que surgem quando um material condutor de eletricidade é submetido a um campo magnético. Nestes casos, uma parte do campo magnético de alta frequência (1 MHz) é dissipado no interior do objeto, e esta variação depende, entre outros fatores, da distância entre o objeto e a bobina (CAVACO, 2002).

2.7.5 Sensores Capacitivos

O princípio de funcionamento destes sensores é baseado na medição da variação da capacitância, que ocorre em função da alteração da distância transversal entre duas placas condutoras, conectadas a potenciais elétricos distintos (Figura 12).

A mudança da capacitância irá produzir um desbalanceamento do circuito, produzindo uma alteração da tensão de saída, que poderá ser amplificada eletronicamente e exibida em formato analógico ou digital (RAGHAVENDRA et al, 2013)., sendo a montagem diferencial de dois capacitadores utilizada para se obter linearidade e alta sensibilidade na medição de pequenos deslocamentos (AZINHEIRA, 2002).

Figura 12 – Princípio de funcionamento dos sensores capacitivos



Fonte: INAMEQ (2022)

Uma vez que a variação da capacitância é extremamente dependente da permissividade do meio entre as placas, a qual pode ser fortemente influenciada por contaminantes como óleo ou umidade e, considerando que a interferência de campos gerados externamente podem ser significantes em relação às variações medidas, por este motivo, este tipo de sensor é mais indicado para aplicações em

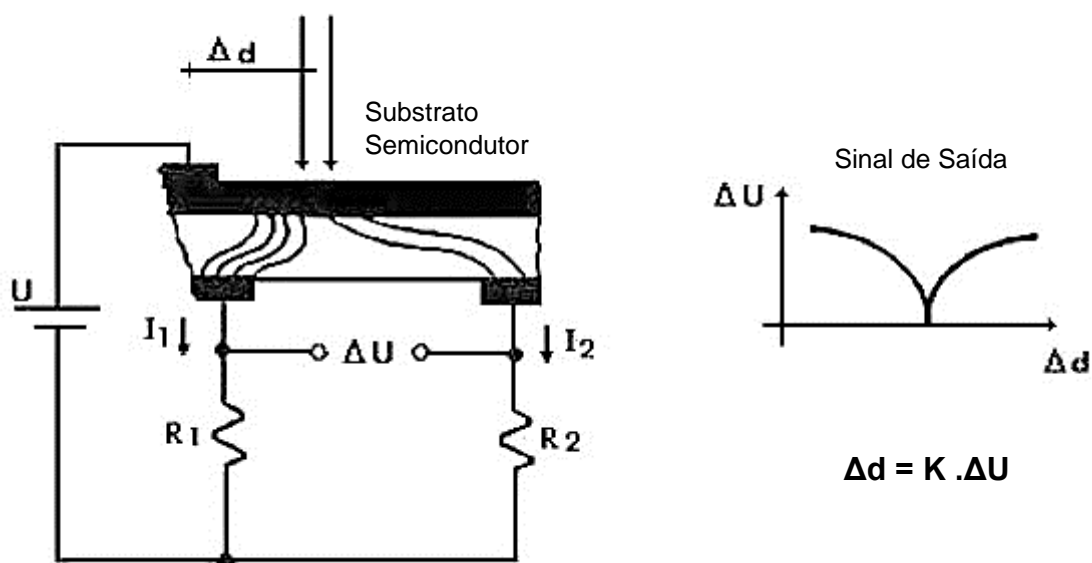
locais bem protegidos. atuadores não suscetíveis ou outros locais bem alojados (HATZFELD et al, 2014).

2.7.6 Sensores Ópticos

São vários sistemas que podem ser utilizados em medições que se utilizam de princípio ópticos, mas em termos gerais, os sensores ópticos de deslocamento se destacam pela sua robustez mecânica e boas relações sinal-ruído, além de fornecerem um meio simples, fácil, preciso e confiável de realizar inspeções e medições (RAGHAVENDRA et al, 2013). Cita-se alguns exemplos.

Os sistemas fotoelétricos analógicos (Figura 13), são formados por um substrato semicondutor e um circuito elétrico complementar (CAVACO, 2002).

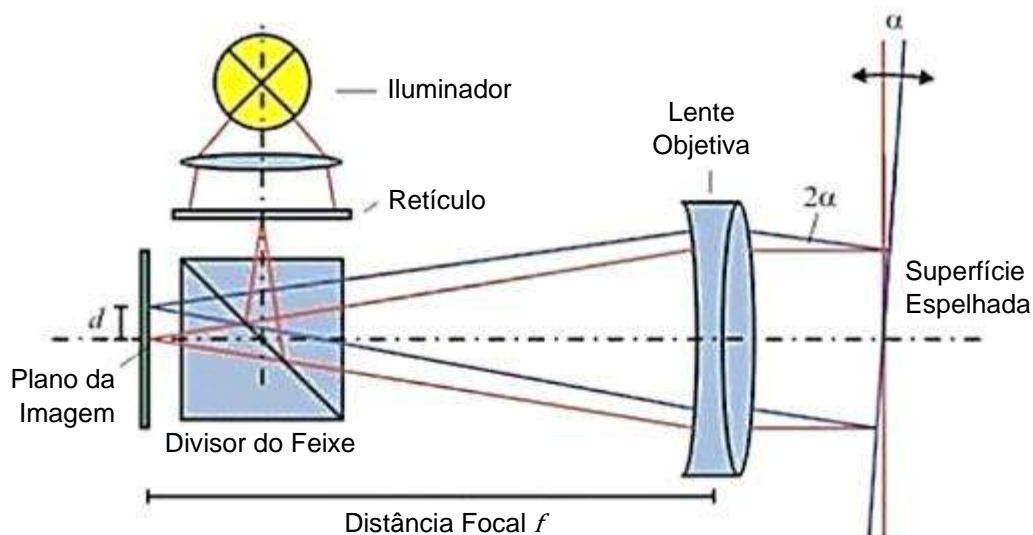
Figura 13 – Princípio de funcionamento de um sistema fotoelétrico analógico



Fonte: CAVACO (2002)

Além destes sistemas fotoelétricos analógicos, existem ainda vários outros sistemas que se utilizam de fonte de luz comum em seu princípio de funcionamento, como por exemplo, os sistemas de microscopia e de projeção, os sistemas de alinhamento, como os autocolimadores (Figura 14), os sistemas de câmeras com matrizes, os sistemas com fibra óptica e os sistemas confocais.

Figura 14 – Princípio de funcionamento de um autocolimador



Fonte: Trioptics GmbH (2022)

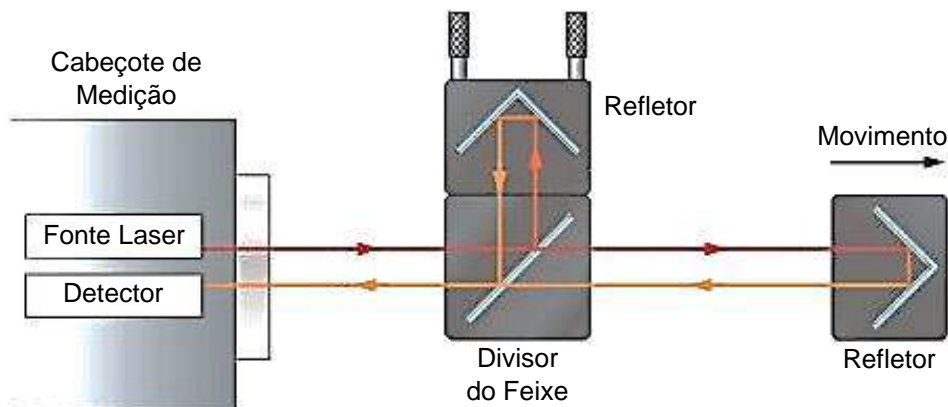
Além destes, existem também os sistemas de medição ópticos sem contato baseados na emissão laser, que apresentam vantagens sobre os sistemas que empregavam luz comum, por disporem de propriedades favoráveis nas aplicações de controle dimensional, tais como monocromaticidade, colimação, coerência, intensidade e radiância (SILFVAST, 2008).

Na realidade, existe uma grande variedade de sistemas ópticos baseados na emissão laser sendo que, fundamentalmente, estes sistemas podem ser divididos em duas grandes categorias (LUXON et al, 1985).

A primeira categoria é composta por sistemas ópticos mais complexos, cujos princípios de funcionamento são fundamentados na natureza coerente do laser e, por isto, normalmente necessitam de um ambiente laboratorial controlado para operar de maneira confiável.

Nesta categoria enquadram-se os sistemas baseados em interferometria laser (Figura 15) como os interferômetros Michelson, os interferômetros Fizeau e os interferômetros de duas frequências, além dos sistemas de interferometria holográfica (LUXON et al, 1985).

Figura 15 – Princípio de funcionamento de um interferômetro laser



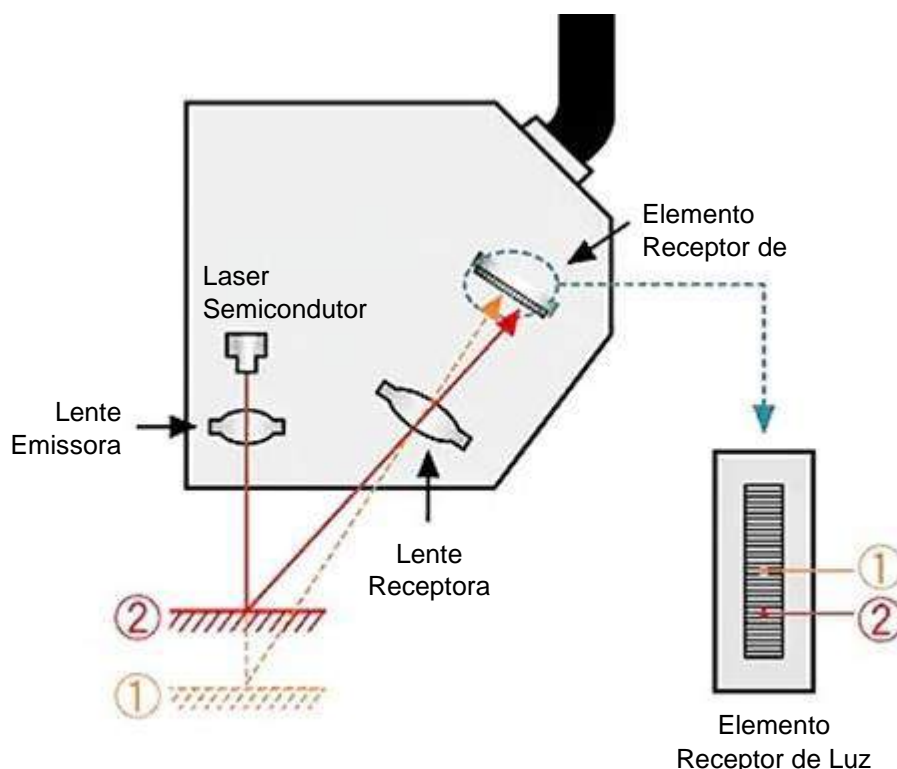
Fonte: Renishaw Plc (2022)

Já a segunda categoria é composta por sistemas ópticos de natureza mais simples, cujos princípios de funcionamento, apesar de se utilizarem de uma fonte laser, não se utilizam da natureza coerente desta luz e, normalmente, são projetados para operar em ambientes que não necessitam de controles ambientais mais rígidos.

Nesta categoria se enquadram os sistemas baseados em varreduras, como os de projeção de sombras e de inspeção de superfícies, os sistemas de alinhamento, os sistemas de câmeras com matrizes de diodos e os sistemas baseados em triangulação (Figura 16), conhecidos como LTS (Laser Triangulation Sensors).

Nos sistemas LTS, usualmente são empregados como elementos receptores da luz dispositivos de detecção de posição a base de fotodiodos (PSD) ou elementos semicondutores de óxido metálico complementar (CMOS) ou ainda dispositivos de carga acoplada (CCD).

Figura 16 – Princípio de funcionamento de um cabeçote por triangulação laser



Fonte: Keyence UK Ltd (2022)

2.8 Princípios de Medição de Deslocamento Com Contato Mecânico

Do mesmo modo que existem diferentes tipos sensores que atuam sem realizar o contato com o objeto da medição, verifica-se também diferentes sensores que operam por meio do contato mecânico. Os princípios de funcionamento mais frequentemente aplicado nestes sensores são apresentados a seguir.

2.8.1 Sensores Pneumáticos

Apesar de seu princípio de funcionamento também ser baseado na variação da pressão do ar, diferentemente dos sensores discorridos no item 2.7.2, nesta configuração, conhecida como aproximação indireta, o orifício é substituído por um obturador em forma de válvula e a saída de ar se efetua pelo espaço existente entre o obturador e seu encosto. Neste caso, o obturador é acionado por um apalpador mecânico, existindo assim o contato entre o objeto da medição e o sensor (CAVACO, 2002).

Esta configuração é indicada para executar inspeções por atributo do tipo passa / não passa, pois incorpora uma válvula que altera o fluxo de ar de maneira proporcional ao deslocamento. Nestes casos, o cabeçote pneumático pode ter um ou mais orifícios de medição (RAGHAVENDRA et al, 2013).

Na Figura 17 são apresentados sensores pneumáticos por contato para diferentes diâmetros internos comercialmente disponíveis.

Figura 17 – Sensores por contato do tipo pneumático



Fonte: Marposs S.P.A. (2022)

2.8.2 Sensores Resistivos – Tipo Strain Gauge

Os sensores resistivos conhecidos como Strain Gauge, também chamados de extensômetros em algumas aplicações específicas, são compostos por um elemento resistivo que produz mudanças na sua resistência elétrica em função de uma deformação mecânica, produzindo assim, pequenas variações de sinal elétrico que, normalmente, são tratados em um circuito denominado ponte de Wheatstone, cuja função é a realização de medidas precisas de resistência elétrica (KESTER et al., 2005).

Na Figura 18 é ilustrado um sensor por contato tipo strain gauge comercialmente disponível.

Figura 18 – Sensor por contato do tipo strain gauge



Fonte: HBK - Hottinger Brüel & Kjaer (2022)

Os sensores resistivos podem ser fabricados por meio de diferentes tecnologias, tais como os de multicamadas (foil-strain gages Cu-Ni), de filme espesso ($\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ ou PEDOT:PSS), de filme fino (TiON ou Poly-Si), os cerâmicos semicondutores ou piezoresistivos (Si homogêneo ou não homogêneo) e os de fibra de carbono (HATZFELD et al, 2014).

2.8.3 Sensores Magnéticos – Tipo Magneto Resistivos

Conforme discorrido no item 2.7.3, os sensores que se utilizam de resistores magnéticos (MDR), conhecidos como sensores potenciométricos, funcionam à base da variação da resistência elétrica, que ocorre devido à alteração dimensional de um núcleo resistor (HATZFELD et al, 2014).

Estes sensores possuem frequente aplicação na indústria em função do seu baixo custo, sendo apropriados para o controle de deslocamentos lineares e angulares. Contudo, deve-se considerar que com ao seu uso acentuado, estes podem apresentar como desvantagem a alteração de suas características de resposta, devido ao seu desgaste mecânico (CAVACO, 2002).

Na Figura 19 são exibidos sensores por contato tipo potenciométrico comercialmente disponíveis.

Figura 19 – Sensores por contato do tipo potenciométrico



Fonte: Megatron Elektronik GmbH & Co (2022a)

2.8.4 Sensores Magnéticos – Tipo Magnetostrictivo

O princípio de funcionamento dos sensores magnetostrictivos é baseado na geração de um estímulo na forma de pulso de corrente elétrica em um condutor de material magnetostrictivo, que se propaga, gerando um campo magnético radial (PUHLMANN, 2014).

Quando este campo magnético gerado encontra o campo magnético de um ímã permanente, é criado um pulso de torção física que se propaga nas duas direções longitudinais do condutor (PUHLMANN, 2014).

Então, um sensor capta essa propagação de torção e gera um sinal elétrico para o medidor que realiza a medição do tempo de propagação entre o estímulo e a captação da torção do fio, medindo a distância linear do ímã em relação ao sensor de torção (PUHLMANN, 2014).

Na Figura 20 são exemplificados sensores do tipo magnetostrictivo por contato comercialmente disponíveis.

Figura 20 – Sensores por contato do tipo magnetostrictivo



Fonte: Balluff Controles Elétricos Ltda (2023)

2.8.5 Sensores Indutivos

Conforme discutido no item 2.7.4, os sensores indutivos utilizam-se da variação da indutância em função da posição do núcleo em uma bobina. Baseando-se nos seus sistemas de variação da indutância, Cavaco (2002) classifica quatro tipos os sensores indutivos, identificando-os como:

- a) Sensores de indutância própria: nestes sensores, ao gerarmos uma corrente elétrica variável em uma bobina de resistência elétrica desprezível é criada uma diferença de potencial sobre esta bobina. A constante de proporcionalidade entre a tensão e o oposto da derivada da corrente em relação ao tempo é a chamada indutância do sistema (CAVACO, 2002);
- b) Sensores de indutância mútua: nestes sensores utiliza-se a propriedade de um indutor percorrido por uma corrente elétrica com amplitude variável para induzir uma tensão elétrica em outro indutor próximo. Neste sentido, interessante notar que um transformador de tensão nada mais é que um conjunto formado por dois indutores acoplados magneticamente de forma eficaz, ou seja, por meio de um núcleo de alta permeabilidade magnética (CAVACO, 2002);

- c) Sensores diferenciais de indutância própria: Considerando-se que sensores indutivos de variação da indutância própria constituído de um só indutor possuem como característica uma resposta altamente não linear, para compensar esta característica, é possível utilizar uma ligação diferencial, fazendo com que ocorra uma variação da indutância em dois indutores, uma aumentando e outra diminuindo de valor simultaneamente, conseguindo-se assim, uma resposta de maior sensibilidade e linearidade (CAVACO, 2002);
- d) Sensores diferenciais de indutância mútua: Comercialmente conhecidos como LVDT (Linear Variable Differential Transformer) estes sensores baseiam-se no princípio de variação da indutância mútua entre dois indutores e é formado por três indutores, sendo que o primário é excitado com uma tensão de amplitude e frequência fixas e os outros dois secundários são ligados de forma diferencial. A tensão nestes dois enrolamentos é proporcional ao fator de acoplamento entre o enrolamento primário e secundário o qual varia de acordo com a posição do núcleo (CAVACO, 2002).

Na Figura 21 são apresentados sensores por contato do tipo indutivo comercialmente disponíveis.

Figura 21 – Sensores por contato do tipo indutivo



Fonte: Megatron Elektronik GmbH & Co (2022b)

2.8.6 Sensores Capacitivos

Conforme discorrido no item 2.7.5, nos sensores capacitivos, a variação da capacitância obtida com efeito linear do deslocamento transversal entre duas placas paralelas carregadas, pode ser utilizada para medições de deslocamento (HATZFELD et al, 2014).

Tal característica é especialmente interessante, caso existam componentes no projeto estrutural mecânico que se movam em relação a outros (HATZFELD et al, 2014).

Assim, os sensores capacitivos por contato apresentam-se como excelentes opções, apresentando atributos metrológicos positivos, como baixa histerese, boa linearidade e repetibilidade (RAGHAVENDRA et al, 2013).

Na Figura 22 são ilustrados sensores por contato do tipo capacitivo comercialmente disponíveis.

Figura 22 – Sensores por contato do tipo capacitivo



Fonte: Elastisense Aps (2022)

2.8.7 Sensores Ópticos

Além dos sensores discutidos no item 2.7.6, existem também sensores de contato que se utilizam de princípios ópticos para o controle de deslocamento, entre os quais aqui se destacam:

- a) Sensores ópticos baseados em sistemas de codificadores lineares incrementais por transmissão fotoelétrica (Figura 23): são sensores de contato do tipo OLE (Optical Linear Encoder) baseados na transmissão de uma radiação óptica que é interrompida em eventos discretos. A escala óptica fica localizada próximo ao elemento receptor, que pode ser um fotodiodo ou um fototransistor, e é normalmente fabricada por processos de estampagem ou de impressão em substrato transparente (vidro ou material plástico), utilizando-se de tecnologia de filme espesso ou de impressão a laser. Já em aplicações de alta resolução, as escalas ópticas são manufaturadas em metais ou substratos onde as aberturas são geradas por um processo de gravação fotolitográfica (HATZFELD et al, 2014);

Figura 23 – Sensores por contato do tipo incrementais por transmissão



Fonte: Dr. Johannes Heidenhain GmbH (2021)

- b) Sensores ópticos baseados em sistemas de codificadores lineares incrementais por reflexão fotoelétrica (Figura 24): são sensores de contato do tipo OLE bastante similares aos sensores por transmissão, porém estes sensores são baseados na reflexão de uma radiação óptica que também é interrompida (HATZFELD et al, 2014). A diferença fundamental é que nesta tecnologia a escala óptica é normalmente constituída por uma superfície polida onde são realizadas gravações de traços opacos que permitirão a geração de eventos discretos. Na reflexão, o sinal óptico que é emitido na direção a um fotodetector libera um sinal elétrico proporcional à intensidade luminosa incidente (CAVACO, 2002);

Figura 24 – Sensor por contato do tipo incrementais por reflexão



Fonte: Dr. Johannes Heidenhain GmbH (2021)

- c) Sensores ópticos baseados em sistemas de codificadores lineares absolutos por transmissão fotoelétrica: são sensores de contato do tipo OLE similares aos sensores ópticos incrementais com transdutores por transmissão e são baseados na transmissão de uma radiação óptica que é interrompida em eventos discretos (HATZFELD et al, 2014). No entanto, neste caso, a escala óptica utilizada possui uma codificação de posição gravada na sua superfície, baseada em regiões que transmitem ou não o feixe

luminoso de uma fonte até um conjunto de fotodetectores que captam, a cada posição da escala, os sinais de passagem ou não do feixe nas diversas regiões codificadas, determinando-se assim, a posição da escala pela combinação lógica destes sinais (CAVACO, 2002);

- d) Sensores ópticos baseados em sistemas de codificadores lineares absolutos por reflexão fotoelétrica: são sensores de contato do tipo OLE similares aos sensores ópticos incrementais com transdutores por reflexão e são baseados na reflexão de uma radiação óptica que é interrompida em eventos discretos. Analogamente ao sistema absoluto por transmissão, neste caso, a reflexão da radiação varia dependendo do ângulo ou posição de um código gravado na superfície e essa amplitude da reflexão fornece informações da posição absoluta da escala (HATZFELD et al, 2014);
- e) Sensores ópticos de redes de Bragg (FBG) (Figura 25): são sensores de contato baseados na rede de Bragg gravada em uma fibra óptica, a qual é formada por uma modulação local e periódica do índice de refração do núcleo da fibra que faz com que, quando uma radiação óptica é orientada ao longo do núcleo da fibra e encontra o plano da rede, o comprimento de onda da luz que coincide com um valor proporcional do período de Bragg é refletido de volta. (PACHECO, 2011). Esta característica pode ser aplicada para a medição de deslocamento, pois, quando a fibra é esticada ou comprimida, o sensor FBG poderá medir este deslocamento por intermédio da variação da constante fotoelástica da fibra e da mudança no período da microestrutura, o que resultará numa variação do comprimento de onda de Bragg (Bragg Wavelength). Assim, o monitoramento da variação do comprimento de onda do sinal que retorna da rede de Bragg pode ser relacionada ao deslocamento que se deseja medir (HBM, 2022).

Figura 25 – Sensor por contato do tipo de rede de Bragg



Fonte: HBM (2022)

2.9 Confiabilidade Metrológica dos Resultados

“Quando você pode medir aquilo de que está falando e expressá-lo em números, você sabe algo sobre isso, mas quando não pode mensurá-lo, quando não pode expressá-lo em números, seu conhecimento é escasso e insatisfatório; pode ser o início do conhecimento, mas em seus pensamentos você mal avançou para o estágio da ciência, qualquer que seja o assunto.”

Sir William Thomson - Lorde Kelvin (Apud. AAAS, 1880)

2.9.1 A Metrologia

O progresso humano é acompanhado pela sua capacidade de medir e as medições são verdadeiramente uma linguagem universal, enquanto todas as outras comunicações devem ser traduzidas. Não há como um pesquisador repetir o trabalho de outro sem medições específicas. Isso é uma verdade em todos os ramos da ciência, da astronomia à biologia (BUSCH, 1989).

A capacidade de um engenheiro, físico, químico ou biólogo de testar ideias depende de uma compreensão da medição, assim, os princípios básicos da metrologia são fascinantes e práticos, e resumem o método científico que

caracteriza mais nossa época do que qualquer outra. Esses princípios se apoiam na lógica e refletem a filosofia, ganhando vida sempre que buscamos conhecimento científico ou produzimos bens (BUSCH, 1989).

A metrologia estabelece-se assim, como a ciência da medição e suas aplicações, englobando todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a sua incerteza de medição e o seu campo de aplicação (INMETRO, 2012c), fundamentando-se em pesquisas relativas às unidades de base ou derivadas e não podendo ser considerada apenas uma disciplina particular da física (KOVALEVSKY, 1997).

2.9.2 Áreas da Metrologia

Existem diversas formas de identificar as diferentes áreas da metrologia, como pela sua aplicação (Ex.: metrologia científica, metrologia industrial, metrologia legal), pela área do conhecimento em que é estudada, pela grandeza de trabalho ou ainda pela combinação de grandezas afins, assim, pode-se considerar a metrologia como área transversal às demais áreas do conhecimento.

Apresenta-se a seguir, exemplos retirados do INMETRO (2012b) de áreas da metrologia baseados na divisão existente no Laboratório Nacional de Metrologia – LNM, órgão vinculado ao INMETRO e responsável no Brasil pela guarda dos padrões nacionais e pela realização de disseminação das unidades do Sistema Internacional de Unidades – SI (FROTA et al., 1999).

Metrologia Mecânica

Abrangendo os laboratórios de Metrologia Dimensional, de Massa, de Força e de Pressão.

Metrologia Elétrica

Abrangendo os laboratórios de Alta Tensão, de Magnetismo e Campo Elétrico e Magnético, de Energia Elétrica, de Padronização Elétrica e de Elétrica Quântica.

Metrologia Acústica e Vibrações

Abrangendo os laboratórios de Ensaios Acústicos, de Eletroacústica, de Vibrações e de Ultrassom.

Metrologia Óptica

Abrangendo os laboratórios de Radiometria e Fotometria, de Aplicações Ópticas e de Interferometria.

Metrologia Química

Abrangendo os laboratórios de Análise de Gases, de Eletroquímica, de Análise Inorgânica, de Análise Orgânica e de Motores e Combustíveis.

Metrologia Térmica

Abrangendo os laboratórios de Termometria de Contato, de Radiação e de Umidade.

Metrologia de Materiais

Abrangendo os laboratórios de Biomateriais e Tribologia, de Microscopia, de Difração e Espectroscopia, de Fenômenos de Superfície, de Análises Térmicas e Materiais Particulados, de Dispositivos Orgânicos e de Nano Metrologia Teórica.

Metrologia Dinâmica de Fluidos

Abrangendo os laboratórios de Caracterização da Dinâmica de Escoamento de Fluidos, de Vazão de Líquidos, de Fluidos e de Vazão de Gás.

Metrologia de Telecomunicações

Abrangendo futuramente os laboratórios de Telecomunicações, de Comunicações Ópticas e de Informática.

Metrologia Aplicada às Ciências da Vida

Abrangendo os laboratórios de Bioengenharia Tecidual, de Macromoléculas, de Microbiologia, de Microscopia Aplicada às Ciências da Vida e de Química Biológica.

Além dos laboratórios apresentados acima, o INMETRO conta ainda com dois laboratórios metrológicos que operam por delegação supervisionada, que são:

Tempo e Frequência

Sendo o laboratório de referência da Divisão Serviço da Hora do Observatório Nacional (ON) vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT).

Radiações Ionizantes

Abrangendo os laboratórios de Dosimetria das radiações, de Metrologia de Radionuclídeos e o de Fluência de Nêutrons, que integram o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) vinculado ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

É importante salientar que as áreas acima apresentadas são baseadas na estrutura organizacional do INMETRO, o que não configura um padrão a ser adotado na classificação das áreas metrológicas, sendo, ainda assim, um importante referencial para o reconhecimento da amplitude da aplicação da ciência das medições.

Assim, com o objetivo de delimitar os conceitos e referências futuras no desenvolvimento deste trabalho, estabelece-se que as considerações doravante desenvolvidas neste trabalho estarão totalmente alinhadas aos conceitos e fundamentos físicos relativos à metrologia mecânica dimensional.

2.9.3 Terminologias e Definições

A busca por uma harmonização internacional das terminologias e definições utilizadas nos campos da metrologia e da instrumentação, impulsionada pela evolução e a dinâmica do processo de globalização das sociedades tecnológicas, ensejou no ano de 1984 o lançamento da primeira edição em francês e inglês do Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, conhecido pelo acrônimo VIM (INMETRO, 2012c).

Esta obra foi inicialmente publicada pela International Organization for Standardization - ISO e organizada por uma comissão que incluía além de seus representantes, membros do Bureau International de Poids et Mesures – BIPM, International Electrotechnical Commission - IEC e da International Organization of Legal Metrology - OIML (INMETRO, 2012c).

Deste modo, as definições dos termos metrológicos empregados neste trabalho seguem, sempre que disponíveis, a versão Luso-Brasileira do VIM publicado pelo INMETRO em 2012. Ademais, com o objetivo de facilitar a compreensão do vocabulário utilizado, relacionam-se os principais termos de interesse no Glossário localizado nos elementos pós-textuais deste trabalho.

2.9.4 Comprovação Metrológica

A norma ABNT NBR ISO 10.012:2004, intitulada “Sistemas de Gestão de Medição - Requisitos para os Processos de Medição e Equipamentos de Medição” (ABNT, 2004) descreve a comprovação metrológica como um conjunto de operações necessárias para assegurar que um sistema de medição atenda aos requisitos metrológicos do processo de medição.

Esta norma apresenta dois fatores fundamentais no processo da comprovação metrológica dos sistemas de medição: a estimativa da incerteza dos resultados obtidos em cada processo de medição, e a comprovação de que todos os resultados de medição sejam rastreáveis às unidades padrões de medida, estes dois importantes conceitos serão melhor discutidos adiante.

Outros fatores necessários para o estabelecimento da comprovação metrológica são as características metrológicas do próprio sistema de medição e demais fatores de influência do processo, os quais são apresentados a seguir.

2.9.5 Fatores de Influência

Toda realização de uma medição estará sujeita a muitas perturbações que, de maneira direta ou indireta, irão influenciar no seu resultado (LINK, 2000).

Estas fontes de perturbação¹, também conhecidas como fatores de influência, podem ser originárias de diferentes fontes, podendo estar associadas diretamente aos sistemas de medição ou a causas externas a estes.

¹ Considera-se que destas fontes de perturbação poderão derivar grandezas de influência que irão afetar o resultado de uma medição.

Deste modo, no planejamento, implantação e avaliação das medições, deve-se considerar as condições que podem afetar sua execução ou resultados, merecendo também atenção as práticas desenvolvidas para garantir maior eficiência e maior confiabilidade no processo de medição (FARAGO et al., 1994).

Relaciona-se a seguir alguns destes fatores, considerados importantes sob o ponto de vista da metrologia mecânica dimensional (LIRA, 2015); (LINK, 2000); (SCHOELER et al., 1999); (GONZÁLES et al., 1998):

Meio Ambiente

- Vibrações
- Fluxo do ar
- Densidade do ar
- Força da gravidade
- Iluminação ambiental
- Pressão atmosférica
- Umidade relativa do ar
- Transiente da rede elétrica

Meio Ambiente (continuação)

- Contaminações ambientais
- Interferências eletromagnéticas
- Temperatura (absoluta/gradiente temporal/gradiente espacial)

Processo da Medição

- Alinhamentos
- Pontos de apoio
- Forma de fixação
- Padrões adotados
- Tempo de medição
- Número de medições
- Princípio de medição
- Estratégia de medição
- Sequência da medição
- Verificação de histerese

Processo da Medição (continuação)

- Definição do metrologista
- Locação do objeto da medição
- Número de pontos de medição
- Definição do sistema de medição

Sistema de Medição

- Deriva
- Tendência
- Zona morta
- Estabilidade
- Sensibilidade
- Força de Medição
- Expansão térmica
- Rigidez do sistema
- Erro de linearidade
- Desgaste dos contatos
- Erro máximo admissível
- Resolução dos sensores
- Imperfeições geométricas

Objeto da Medição

- Peso
- Forma
- Rigidez
- Tamanho
- Refletância
- Magnetismo
- Condutividade
- Ponto de fusão
- Tolerâncias aplicadas
- Materiais constituintes
- Características higroscópicas

Objeto da Medição (continuação)

- Coeficiente de expansão térmica
- Desvios macro geométricos (forma)
- Coeficiente de Poisson (elasticidade)
- Desvios micro geométricos (rugosidade)

Montagem da Medição

- Aquecimento
- Erros de Abbe
- Erros de paralaxe
- Sistema de fixação
- Formas de contato
- Graus de liberdade
- Rigidez da montagem
- Sistemas de referência
- Erros de seno e cosseno

Metrologista - Fator Humano

- Atitudes
- Cansaço
- Motivação
- Formação
- Experiência
- Habilidades
- Treinamento
- Honestidade
- Discernimento
- Conhecimento
- Profissionalismo
- Acuidade visual
- Alterações emocionais

Método de Cálculo e Apresentação dos Resultados

- Filtros aplicados
- Arredondamento
- Constantes físicas
- Erros de transcrição
- Seleção da amostragem
- Implantação do algoritmo
- Formulação do algoritmo
- Tamanho da amostragem
- Transformação de unidades
- Interpolações e extrapolações
- Previsão e tratamento de erros
- Definição de algarismos significativos
- Formas de apresentação dos resultados

2.9.6 Erros de Medição

É possível afirmar que somente seria possível se executar uma medição sem erros, ou seja, uma medição perfeita, caso fosse possível dispor-se de um sistema de medição igualmente perfeito o que, obviamente, não existe.

Aspectos tecnológicos limitantes de construção e de manutenção dos sistemas, princípios físicos não perfeitamente lineares, objetos da medição não geometricamente ideais e estáveis e fatores de influência de influência, como os relacionados em 2.9.5, fazem com que o sistema de medição não possa fornecer resultados perfeitos (SCHOELER et al., 1999).

Segundo definição encontrada no VIM, o erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência, sendo que, o mesmo documento complementa a informação declarando que este valor de referência somente poderá ser conhecido caso ele seja um valor atribuído por um acordo, para um determinado propósito.

Embora não declarado de forma direta, as definições constantes no VIM revelam que o erro de medição é o resultado da soma das parcelas de erro sistemático com as parcelas de erros aleatórios que o compõem.

O erro sistemático é o componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível, sendo que as causas para ocorrência deste erro podem ser conhecidas ou desconhecidas. No caso das causas conhecidas, pode-se aplicar uma correção para compensá-lo (INMETRO, 2012c).

Já o erro aleatório é o componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira não previsível, sendo que o valor de referência para este erro é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas do mesmo mensurando (INMETRO, 2012c).

Lira (2015) ainda considera um terceiro tipo de erro de medição, denominado erro grosseiro², ou erro ilegítimo, que tem sua origem normalmente atribuída a fatores humanos como a falta de cuidado, de habilidade ou de treinamento do metrologista, decorrentes, por exemplo, da execução de leitura errônea, ou de ajustes incorretos ou ainda manipulação indevida dos instrumentos de medição ou também da transcrição errada dos valores obtidos na medição. É importante notar que este tipo de erro não pode ser tratado matematicamente devido a sua total imprevisibilidade de ocorrência. (LIRA, 2015).

2.9.7 Rastreabilidade Metrológica

A rastreabilidade metrológica é definida como a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência por intermédio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações (Figura 26), cada uma contribuindo para a incerteza de medição. Portanto, a rastreabilidade metrológica requer uma hierarquia de calibração estabelecida (INMETRO, 2012c).

Segundo o Sistema Internacional de Unidades, conhecido pelo acrônimo SI, a atual unidade da grandeza de base comprimento denominada metro foi definida, em 20 de outubro de 1983, pela Resolução nº 1 emitida pela 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM)

² É importante salientar que na abordagem do VIM, o erro grosseiro é tratado como um erro de produção, ou um erro humano. Portanto, este não deve ser confundido com um erro de medição e nem faz parte de um de seus componentes.

Figura 26 – Estrutura hierárquica de rastreabilidade



Fonte: INMETRO (2012a)

Segundo o SI, a definição da unidade metro é: o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1 / 299.792.458$ do segundo, onde o segundo é definido em termos da frequência do Césio $\Delta\nu_{Cs}$ (BIPM, 2006).

Atualmente a realização prática desta unidade de medida possibilita atingir erros relativos na ordem de 10^{-10} , equivalentes a aproximadamente 0,1 nm, sendo este o estado da arte na reprodução desta grandeza (CARDARELLI, 2003) (SCHÖDEL; et al., 2021).

Para dados mais aprofundados e estudos sobre este assunto recomenda-se consultar o apêndice “Mise en Pratique for the Définition of the Mètre in the SI” elaborado pelo Comité Consultatif des Longueurs do Comité International des Poids et Mesures, conhecido pelo acrônimo CIPM (CCL, 2019).

2.9.8 Incerteza de Medição

“... A avaliação de incerteza não é uma tarefa de rotina nem uma tarefa puramente matemática; ela depende de conhecimento detalhado da natureza do mensurando e da medição. A qualidade e utilidade da incerteza indicada para o resultado de uma medição dependem, portanto, em suma, da compreensão, análise crítica e integridade de todos aqueles que contribuem para o estabelecimento de seu valor.”

O GUM (JCGM 100:2008).

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física deve-se sempre dar alguma indicação quantitativa da qualidade deste resultado, de forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade, pois, sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou numa norma. É, portanto, necessário que exista um procedimento para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, ou seja, para avaliar e expressar sua incerteza (JCGM, 2008).

A incerteza de medição é definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas, podendo ser expressa, por exemplo, como um desvio-padrão denominado incerteza padrão, ou um de seus múltiplos, ou ainda como a metade da amplitude de um intervalo, tendo este uma probabilidade de abrangência determinada (INMETRO, 2012c).

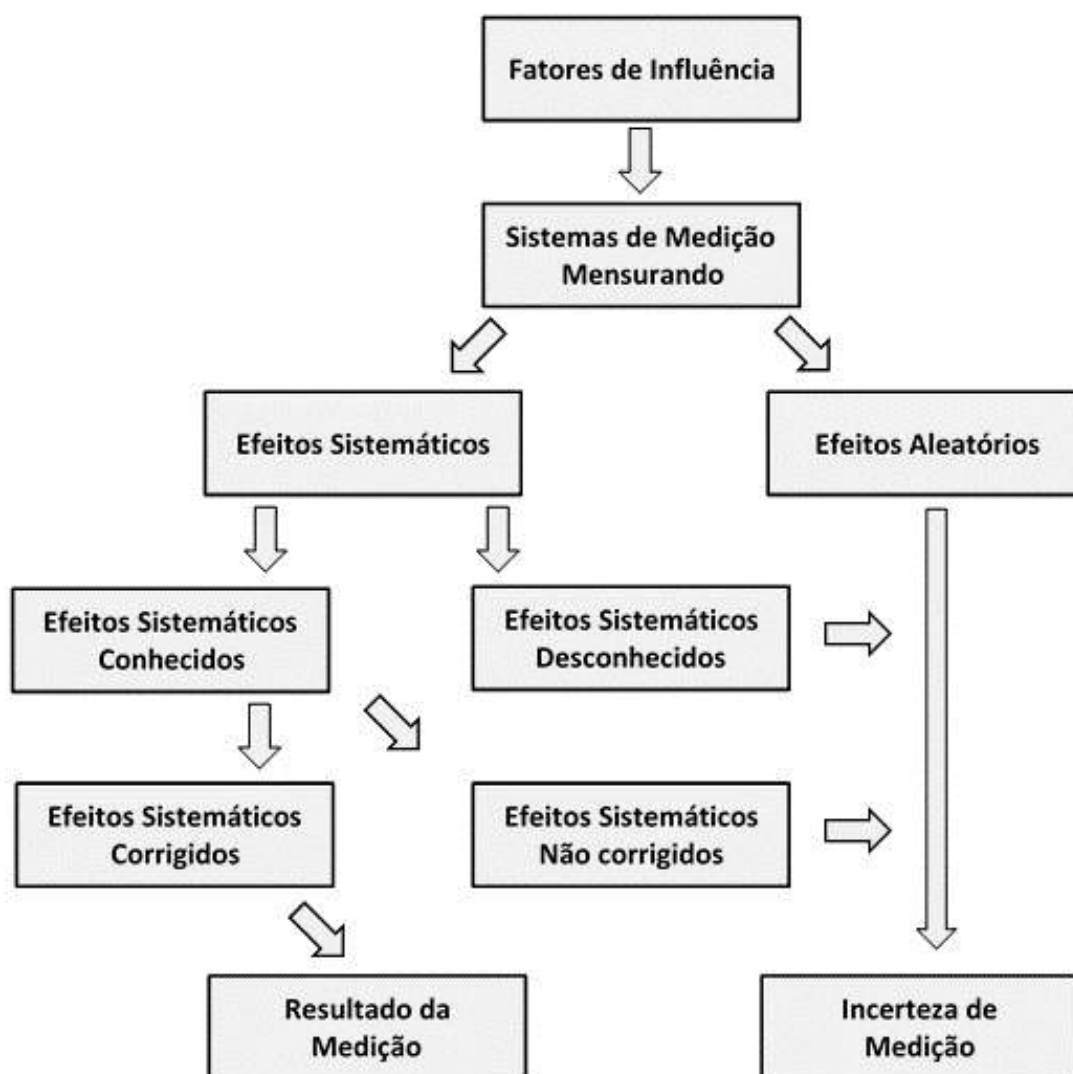
A incerteza de medição geralmente engloba muitos componentes derivados de efeitos aleatórios, alguns deles que podem ser estimados a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de uma série de medições. Outros componentes podem ser estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações, sendo também caracterizados por desvios-padrão estimados (INMETRO, 2012c).

Porém, a incerteza de medição inclui, ou pode incluir, componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associados a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional.

Algumas vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados e, em vez disso, são incorporados aos componentes de incerteza de medição associados (INMETRO, 2012c).

Na Figura 27 é apresentada de forma esquemática essas relações.

Figura 27 – Componentes da incerteza de medição



Fonte: Adaptado de SCHOELER (2002)

Observa-se que, apesar de sua importância, a incerteza de medições e seus parâmetros são frequentemente negligenciados por profissionais em projetos de sistemas, mesmo que estes sistemas tenham aplicações críticas de segurança, e isto possa ocasionar aumento de custos e de riscos (ZANGL et al., 2017).

Embora os conceitos de erro e análise de erro façam parte há muito tempo da prática da ciência da medição, o conceito de incerteza como atributo quantificável é relativamente novo na história da medição (JCGM, 2008). Uma das dificuldades encontradas na implantação e na expressão da incerteza de medições foram as divergências encontradas tanto nas nomenclaturas, quanto nas regras básicas relativas ao cálculo (VUOLO, 1996).

No contexto da globalização, ficou claro ser imperativa a definição e padronização de uma metodologia para avaliar e expressar incerteza de medições, que pudesse ser uniforme em todo o mundo, de forma tal que as medições realizadas em diferentes países pudessem ser facilmente comparadas. Desta necessidade sobreveio o documento denominado JCGM 100:2008 - Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, este documento ficou conhecido pelo acrônimo GUM (JCGM, 2008).

2.9.9 Metodologia de Avaliação da Incerteza de Medição

Algumas premissas fundamentaram a elaboração da metodologia proposta pelo GUM, sendo que a primeira foi a proposição de esta fosse universal, ou seja, que pudesse ser aplicável a todas as espécies de medição e a todos os tipos de dados de entrada usados nas medições (JCGM, 2008).

Além disso, a grandeza real final usada para expressar a incerteza deveria ser internamente consistente. Em outras palavras, que fosse diretamente derivável dos componentes que para ela contribuem, assim como ser independente também de como estes componentes estejam agrupados, ou da decomposição de componentes em subcomponentes (JCGM, 2008).

Uma terceira proposição é a de que a grandeza real final fosse também transferível, permitindo que seja possível de ser utilizada diretamente como um componente na avaliação da incerteza de outra medição na qual o primeiro resultado é utilizado (JCGM, 2008).

Apresentam-se a seguir, de forma sucinta, os principais passos na avaliação e expressão da incerteza do resultado de uma medição na metodologia descrita pelo GUM.

Para informações mais detalhadas e estudos sobre a metodologia do GUM recomenda-se consulta às referências (JCGM, 2008); (INMETRO, 2008); (ILAC, 2013); (A2LA, 2019); (NIST,1994); (EA, 2013); (UKAS, 2019); (VUOLO, 1996); (LINK, 2000).

Modelagem Matemática:

O primeiro passo descrito na metodologia é geração do modelo matemático, ou seja, expressar matematicamente a relação entre o mensurando Y e as grandezas de entrada X_i das quais Y possua uma relação funcional f , na forma:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (01)$$

Note-se que a função f deve conter todas as grandezas, incluindo todas as correções e fatores de correção, que possam contribuir com um componente significativo de incerteza para o resultado de medição.

Determinação das Grandezas de Entrada (x_i):

Em seguida, deve-se determinar o valor estimado da grandeza de entrada X_i , que pode ser diretamente determinada na medição em curso, como por exemplo, extraídos de uma única observação, de observações repetidas, ou de julgamento baseado na experiência, e podem envolver a determinação de correções em leituras de instrumentos e correções por conta de grandezas de influência, tais como: temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade.

Ou ainda de grandezas cujos valores e incertezas são incorporados à medição a partir de fontes externas, como grandezas associadas a padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados e dados de referência obtidos de manuais e demais literaturas técnicas.

Avaliação das Incertezas Padrão $u(x_i)$:

Avalia-se, então, a incerteza padrão $u(x_i)$ de cada estimativa de entrada x_i , onde a metodologia prevê dois meios de execução: o primeiro fundamentado em distribuições de frequência, denominado avaliações do Tipo A dos componentes da incerteza-padrão e o segundo fundamentado em distribuições estabelecidas a priori, denominadas avaliações do Tipo B.

Assim, a avaliação Tipo A da incerteza-padrão é intrínseca ao processo de medição e é realizada por meio de tratamento estatístico do conjunto de repetições das observações de x_i .

Quando são executadas repetições das medições da grandeza de entrada x_i sob condições de repetitividade, uma das avaliações Tipo A da incerteza padrão é:

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (02)$$

onde:

$s(x_i)$ = desvio-padrão dos valores individuais do conjunto de repetições;

n = número de repetições do conjunto.

Quando a avaliação da incerteza da fonte de entrada é realizada por um meio diferente do estatístico, a avaliação da incerteza-padrão é denominada do Tipo B.

Uma das estimativas da incerteza-padrão Tipo B, $u(x_i)$, é realizada quando os valores de $u(x_i)$ têm uma determinada distribuição assumida e um intervalo de dispersão.

As distribuições normalmente enfocadas na metodologia são a retangular, a triangular, a tipo "U", a normal etc. (INMETRO, 2008). Deve-se reconhecer que em ambos os casos as distribuições são modelos utilizados para representar o atual estágio de nosso conhecimento.

Avaliação das Covariâncias Associadas:

Em seguida devem-se avaliar as covariâncias associadas entre as estimativas de entrada que sejam correlacionadas, por meio da expressão apropriada para a variância combinada $u_c^2(y)$ associada com o resultado de uma medição, que é:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (03)$$

que pode ser reescrita como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (04)$$

onde:

x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j ;

$u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada associada com x_i e x_j

O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado dado por:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (05)$$

onde:

$r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$;

$-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$

Assim, quando não existe correlação ou quando se admite que esta é desprezível, ou seja, $r(x_i, x_j) \cong 0$, a Equação (04) pode ser reduzida para:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right] u^2(x_i) \quad (06)$$

Analogamente, quando existe correlação entre todas as estimativas de entrada, ou seja, $r(x_i, x_j) = +1$, a Equação (04) pode ser reduzida para:

$$u_c^2(y) = \left[\sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 \quad (07)$$

Uma forma qualitativa de se identificar a correlação entre duas variáveis pode ser realizada com a aplicação de um diagrama de dispersão, onde as representações das dispersões são elaboradas a partir de pares ordenados (x_i, y_i) , onde x_i é o valor observado de uma variável e y_i é o seu correspondente da outra variável.

Já a aplicação do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson permite avaliar de forma quantitativa a intensidade da correlação ($r_{x,y}$) entre duas variáveis x e y , por meio da seguinte equação (INMETRO, 2008):

$$r_{x,y} = \frac{n_t \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n_t \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n_t \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (08)$$

onde:

x_i e y_i são os pares dos valores que definem os pontos no diagrama de dispersão,

n_t = número total de pares dos valores

Cálculo dos Coeficientes de Sensibilidade (c_i):

Os coeficientes de sensibilidade, aqui representados pelas derivadas parciais $\partial f/\partial x$, descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Então, o coeficiente de sensibilidade c_i do mensurando (y) em relação a cada fonte de entrada (x_i) pode ser definido como:

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad u_i(y) \equiv |c_i|u(x_i) \quad (09)$$

Assim a Equação (07) pode ser rescrita como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \quad (10)$$

Na prática ocorre que muitas vezes os coeficientes de sensibilidade $\partial f/\partial x$ são determinados experimentalmente, no lugar de serem calculados pela função f . Nestes casos, costuma-se medir a variação em Y causada por uma variação em um dado X_i , enquanto se mantêm constantes as grandezas de entrada restantes.

Cálculo dos Resultados da Medição:

Com os dados obtidos anteriormente, calcula-se então o resultado da medição, isto é, a estimativa y do mensurando Y , a partir da relação funcional f , utilizando-se para as grandezas de entrada X_i as estimativas x_i obtidas.

Determinação da Incerteza Padrão Combinada $u_c(y)$:

Segue-se o desenvolvimento com a determinação da incerteza padrão combinada $u_c(y)$ do resultado da medição y a partir das incertezas-padrão e covariâncias associadas com as estimativas de entrada. Se a medição determina, simultaneamente, mais de uma grandeza de saída, será necessário que se verifique e calcule suas covariâncias.

Cálculo da Incerteza Expandida (U):

O propósito de se calcular a incerteza expandida U é prover um intervalo de $y - U$ a $y + U$ com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando Y . Para isto multiplica-se a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , tipicamente no intervalo de 2 a 3, para obter $U = k u_c(y)$, sendo este fator de abrangência k definido com base no nível da confiança requerido para o intervalo.

Supondo-se que a distribuição dos dados obtidos se aproxima de uma curva Normal, a utilização do fator de abrangência de $k = 2$ para calcular uma incerteza expandida associará esse valor a um nível de confiança p de aproximadamente 95%.

Porém, na prática, podem situações em que a contribuição dos efeitos aleatórios para a incerteza apresenta-se relativamente grande quando comparada com outras contribuições associadas e, se o número repetições for pequeno, é possível de que a distribuição de probabilidade não se aproxime de uma curva Normal, fazendo com que o valor de $k = 2$ se associe um nível de confiança p menor do que os 95% esperados. Nessas circunstâncias um novo valor do fator de abrangência k_p , para que se mantenha o nível de confiança desejado, deve ser obtido, baseando-se agora em uma distribuição de Student em lugar de uma distribuição Normal.

Para se calcular este valor, a metodologia sugere a utilização da equação de Welch-Satterthwaite, que possibilita o cálculo do valor dos graus de liberdade efetivos ν_{eff} , baseado nos graus de liberdade ν_i das contribuições individuais de incerteza $u_i(y)$, conforme segue:

$$\frac{u_c^4(y)}{\nu_{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i} \quad (11)$$

que pode ser reescrita como:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (12)$$

A incerteza expandida $U_p = k_p u_c(y) = t_p(\nu_{eff}) \cdot u_c(y)$ fornece então um intervalo $Y = y \pm U_p$ tendo um nível da confiança aproximado p .

Relato do Resultado da Medição:

Como última etapa da metodologia, deve-se relatar o resultado da medição y juntamente com sua incerteza-padrão $u_c(y)$ ou incerteza

expandida U_p , buscando-se sempre descrever claramente os meios e modelos utilizados para calcular o resultado da medição e sua incerteza a partir de observações experimentais e dados de entrada.

Portanto, deve-se listar todos os componentes da incerteza e documentar amplamente como foram avaliados, apresentar a análise dos dados de tal forma que cada um dos passos importantes possa ser prontamente reproduzido e que os cálculos do resultado relatado possam ser independentemente repetidos.

Se utilizadas, devem ser apresentadas todas as correções e constantes utilizadas na análise e suas fontes.

2.9.10 Avaliação da Conformidade

A avaliação da conformidade é uma atividade cotidiana e usualmente realizada em medições, ensaios, inspeções e calibrações, sendo necessária para garantir a adequação de produtos, materiais, serviços e sistemas aos requisitos definidos por normas, regulamentos e marcos legais (RIBEIRO et al, 2017).

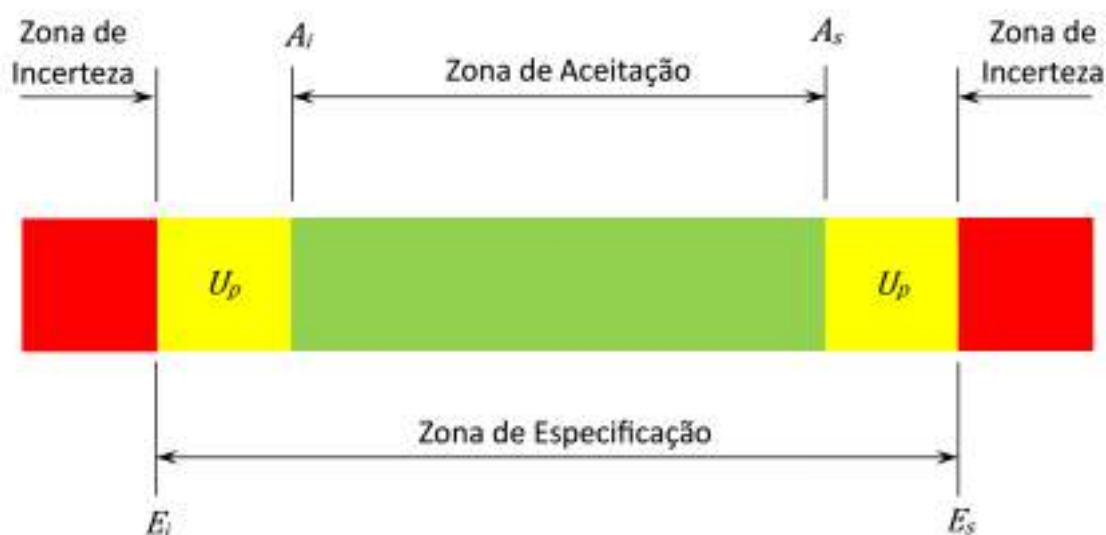
Seu objetivo é promover confiança para os consumidores e para a segurança e qualidade de vida. Não obstante, a avaliação de conformidade tem um grande impacto na economia global, pois implica na aceitação e rejeição de itens manufaturados, com resultados diretos na análise de riscos, decisões de negócios, custos reputacionais e financeiros. (RIBEIRO et al, 2017).

O desenvolvimento de uma abordagem introduzindo a incerteza de medição, abordado no item 2.9.8, como parâmetro para expressar a variabilidade da medição, teve um impacto significativo no processo de decisão, pois implica na necessidade de considerar a comparação por meio de uma visão probabilística (RIBEIRO et al, 2017).

Assim, ao se estabelecer procedimentos para a avaliação da conformidade, são necessários definir critérios objetivos nas chamadas “regras de decisão”, que visam definir os limites da zona de aceitação da conformidade, por meio da relação entre a zona de especificação e a zona da incerteza obtida na medição realizada.

Na Figura 28 é apresentada esta relação, entre os limites inferior e superior de especificação (E_i e E_s), a incerteza de medição (U_p) e os limites inferior e superior de aceitação (A_i e A_s) do objeto da medição.

Figura 28 – Determinação dos limites de aceitação da conformidade



Fonte: Adaptado de UKAS (2022)

Complementando o argumento apresentado em 2.9.6, tem-se que, caso fosse possível desenvolver um sistema de medição perfeitamente exato, todas as decisões de conformidade de um produto medido por este sistema seriam corretas, e assim, todos os riscos oriundos destas decisões seriam zero.

Deste modo, pode-se afirmar que um aumento na incerteza de uma medição é proporcional ao aumento da probabilidade de uma decisão incorreta e, esta probabilidade cresce na medida em que os valores obtidos estão próximos dos limites de especificação (JCGM, 2012).

As normas ISO 14253-1:2017, UKAS LAB-48:2022 e ASME B89.7.3.1:2001 estabelecem regras para verificar a conformidade ou não de uma determinada tolerância de um objeto da medição (ou de uma população de objetos), em relação a uma característica metrológica que defina um sistema de medição, levando-se em consideração a incerteza de medição obtida nos resultados fornecidos por este sistema (ISO, 2017) (UKAS, 2022) (ASME, 2001).

2.9.11 Índice de Capacidade de Medição

Ainda, sobre a avaliação da conformidade, o documento orientador JCGM 106:2012, também denominado Suplemento 6 ao GUM, apresenta uma abrangente normalização de procedimentos a serem usados para verificação da conformidade de itens com requisitos especificados, e aborda de maneira bem completa o uso dos resultados de uma medição, para decidir pela aceitação ou pela rejeição de um objeto de interesse ao atendimento de um requisito especificado (JCGM, 2012).

Assim, com base nas incertezas obtidas de medições realizadas, o documento orientador JCGM 106:2012 propõe um modelo matemático para a determinação do índice de capacidade de medição de um sistema C_m , por meio da seguinte equação^{3,4}.

$$C_m = \frac{E_s - E_i}{4u_c} = \frac{I_E}{2U_{95}} \quad (13)$$

Onde:

E_s = Limite de especificação superior

E_i = Limite de especificação inferior

u_c = Incerteza de medição combinada

I_E = Intervalo de especificação

U_{95} = Incerteza expandida ($k = 2,0$)

Para um estudo mais aprofundado a respeito deste assunto, sugere-se consultar Salsbury (2022), que desenvolve em seu trabalho uma profunda reflexão sobre a aplicação e como a incerteza de uma medição deve ser contabilizada na avaliação da conformidade dos sistemas de medição.

³ Neste modelo proposto assume-se que a distribuição dos valores obtidos apresenta uma função densidade de probabilidade representada por uma curva normal, onde a probabilidade de abrangência para tal intervalo é aproximadamente 95 %.

⁴ Salienta-se que o fator 4 na Equação (13) é arbitrário; essa escolha em particular, é motivada pelo amplo uso do intervalo de abrangência $[\bar{y} \pm 2 * u_c]$ no relato do resultado de uma medição.

2.10 Método e Instrumentos Atuais

Atualmente, no CECON-IPEN, as dimensões finais de fabricação das placas combustíveis são determinadas pela medição do comprimento, largura e espessura (DURAZZO et al., 2015), sendo que estes controles são devidamente realizados e documentados conforme procedimentos operacionais e instruções de trabalho padronizados e previamente autorizados.

Com relação ao controle da espessura das placas combustíveis, as instruções de trabalho preveem a realização da medição em 21 pontos pré-estabelecidos e identificados por meio de coordenadas relativas às faces de referência da placa (DURAZZO et al., 2017a), conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Medição da espessura das placas combustíveis no CECON-IPEN



Fonte: IPEN (2020)

Na realização das medições de espessura são utilizados micrômetros⁵ externos de arco profundo, com fusos não rotativos e batentes de medição chanfrados (DURAZZO et al., 2017a), sendo o posicionamento dos batentes do instrumento em relação às coordenadas da placa auxiliado por meio de um gabarito fabricado em acrílico (polimetilmetacrilato).

Após a leitura das escalas dos instrumentos realizadas pelos operadores, os valores dos resultados da medição da espessura são registrados de maneira manual em formulários padronizados do CECON-IPEN, similares ao apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Formulário padronizado de registro dos resultados das medições

| | | | | | |
|----------|--|--|--|--|--------|
| | | | | <p style="text-align: center;">DIMENSÕES</p> | |
| | | | | LARGURA | |
| | | | | MIN. | MÁX. |
| ESPECIF. | | | | 70,80 | 70,90 |
| MEDIDO | | | | | |
| | | | | COMPRIMENTO | |
| | | | | MIN. | MÁX. |
| ESPECIF. | | | | 714,20 | 714,60 |
| MEDIDO | | | | | |
| | | | | ESPESSURA | |
| | | | | MIN. | MÁX. |
| ESPECIF. | | | | 1,47 | 1,62 |
| MEDIDO | | | | | |
| | | | | Observações: | |
| | | | | | |

Fonte: Adaptado de IPEN (2018)

⁵ Ressalta-se que a utilização de micrômetros externos para a realização da medição da espessura é alinhada à recomendação fornecida pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1992).

O tempo médio de um operador, treinado para a execução de um ciclo de medição nos 21 pontos pré-estabelecidos da placa, e o subsequente registro de forma manual, dos valores lidos na escala do instrumento, nos formulários padronizados é de 20 minutos.

2.11 Análise e Proposições de Melhorias no Método

Para a consecução dos objetivos deste trabalho, foram realizadas análise e elaboradas proposições de melhoria no método atual de medição da espessura das placas combustíveis, que são apresentadas a seguir.

2.11.1 Melhorar a Confiabilidade Metrológica

Como discutido no item 2.9.6, sob o ponto de vista da teoria dos erros, os chamados erros grosseiros, também denominados por erros ilegítimos, não podem ser realmente considerados como erros (VUOLO, 1996) pois, sob ótica dos processos, a ocorrência do chamado erro grosseiro se caracteriza como um evento fora de controle ocorrido no processo de medição.

Contudo, na prática, os erros de medição grosseiros ocorrem, e não são passíveis de tratamentos matemáticos (LIRA, 2015). Assim, os erros grosseiros cometidos durante a leitura do instrumento, no registro e na análise de dados podem introduzir um elemento desconhecido e bastante significativo no resultado de uma medição.

No GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) há uma importante consideração sobre este assunto, que destaca que erros grosseiros significativos geralmente podem ser identificados por uma revisão⁶ apropriada dos dados. Já os erros grosseiros menores podem ser mascarados por variações aleatórias ou, até mesmo, assemelhar-se a tais (JCGM 100:2008).

Especificamente, no método atual, a utilização de instrumentos universais e, portanto, de aplicação manual, resultará inevitavelmente na inclusão do fator humano no processo de medição.

⁶ Para que exista uma garantia de que isto ocorra, é necessário que uma revisão dos dados seja devidamente implantada nos procedimentos operacionais de inspeção dos laboratórios.

A inclusão deste fator poderá resultar em uma fonte de erros derivados, por exemplo, da manipulação e do posicionamento inadequado do instrumento na placa combustível, da execução errônea da leitura na escala / mostrador do medidor, ou ainda na transcrição manual incorreta do valor medido, todos impactando diretamente na confiabilidade dos dados obtidos.

A partir desta consideração, foi proposto que o desenvolvimento do novo sistema de medição deveria se materializar mediante a aplicação de recursos tecnológicos de automação para a execução das medições, possibilitando a obtenção, transcrição e o tratamento de dados obtidos com a menor interferência possível do operador, mitigando assim, a possibilidade da ocorrência de erros grosseiros.

2.11.2 Expressar a Incerteza de Medições

Uma grandeza física experimental deve ser determinada a partir de uma medição, e seu resultado sempre será uma aproximação do valor verdadeiro da grandeza (VUOLO, 1996), sendo que, a confiabilidade do resultado desta medição estará intrinsicamente ligada a uma indicação clara e quantitativa da qualidade deste resultado, expresso na forma do valor de sua incerteza.

Atualmente, não está prevista a realização desta análise qualitativa dos resultados coletados e, uma análise mais detalhada do método revela que a utilização de operações manuais de execução das medições e de transcrição dos resultados dificulta a adoção desta prática. Percebe-se que a necessidade da execução de repetições das medições para a criação de uma base estatística de cálculo tornaria o processo ainda mais moroso, aumentando consideravelmente os seus custos de execução.

Diante desta constatação, definiu-se que deveria ser previsto no desenvolvimento do novo sistema de medição a utilização de um sistema para o suporte de processamento que possibilitasse a análise e o tratamento dos dados obtidos. Além disso deveria ser desenvolvida uma modelagem matemática própria, que permitisse proceder a determinação dos componentes derivados de efeitos aleatórios e sistemáticos do processo de medição, fornecendo a expressão dos resultados obtidos com suas respectivas incertezas e evidenciando e quantificando a qualidade dos resultados apresentados.

2.11.3 Garantir Integridade Superficial das Placas

Um dos aspectos importantes a ser observado durante o processo de manufatura das placas combustíveis é a garantia da integridade de sua superfície, uma vez que resultados experimentais sugerem que pontos de corrosão iniciados em locais que apresentaram defeitos na superfície podem levar a perfuração do revestimento e provocar a exposição do núcleo, o que irá provocar a liberação de produtos de fissão dentro do reator e ocasionar graves problemas operacionais e de segurança (DURAZZO et al., 2015).

Apesar de amplamente aplicado em atividades laboratoriais de controle dimensional, a utilização de instrumentos de medição que se utilizam do contato mecânico com o objeto da medição, como o micrômetro externo, pode causar danos na superfície das placas combustíveis, caso sejam manipulados de maneira incorreta.

Especificamente na medição de placas combustíveis, existe um fator agravante, considerando-se que as superfícies de medição dos instrumentos de aplicação universal são, geralmente, manufaturados com materiais de elevada dureza de modo a garantir uma maior durabilidade destes medidores.

No caso dos micrômetros externos, seus batentes normalmente são compostos de carboneto de tungstênio, com durezas especificadas entre 88 e 93 HRa, equivalente a aproximadamente 1.100 HV⁷ (GTP, 2008).

Apesar de raros, existem alguns micrômetros mais antigos, cujas faces de medição são construídas com aço inoxidável Classe 440C, com durezas próximas a 60 HRc, equivalente a aproximadamente 700 HV⁷ (ATLAS STEELS, 2008).

De qualquer modo, estes valores de dureza podem ser considerados extremamente elevados, se comparados ao material de composição das placas combustíveis, o alumínio Classe 6061-T4, cuja dureza é por volta de 65 HB, equivalente a aproximadamente 70 HV⁷ (MATWEB, 1999).

⁷ Atenta-se ao fato de que, os valores informados na escala Vickers (HV) são colocados no texto apenas com o objetivo facilitar a comparação entre as grandezas envolvidas em uma mesma escala de dureza e são resultados da conversão teórica das diferentes escalas utilizadas, ainda que possa não ser possível a execução prática do ensaio nesta escala.

A partir destas considerações, definiu-se que o desenvolvimento do novo sistema de medição também deveria prever recursos automatizados para o monitoramento do contato mecânico existente entre o sensor de medição e a placa combustível, utilizando-se para isso, um sistema com possibilidades de ajustes e controle da força aplicada durante a medição.

2.11.4 Aumentar o Número de Pontos da Análise

Aumentar o número de pontos de medição em chapas possibilita a obtenção de mais dados sobre as condições da superfície e da espessura, possibilitando assim, o estudo mais detalhado sobre os fatores de influência que estão presentes no processo produtivo (EC, 2002); (EC, 2003).

Como mencionado, o atual método de controle da placa combustível está descrito em um procedimento institucional, que determina que a medição da espessura da placa combustível seja executada em pontos pré-estabelecidos e onde, um operador treinado, é capaz de executar um ciclo de medição, nos 21 pontos da placa e o respectivo registro dos valores obtidos, em um tempo médio de 20 minutos.

Diante destes fatos, definiu-se que deveriam ser consideradas no novo sistema de medição, a agilidade e a flexibilidade para execução do controle da espessura das placas em múltiplos pontos, com a redução do tempo de medição e com possibilidades da determinação e geração da malha de controle na superfície, alterando assim a definição da análise, de acordo com cada necessidade apresentada.

Adicionalmente, deveriam ser previstas saídas de dados para a emissão de relatório de medição com gráficos para análises e da geração de curvas de resposta, criadas a partir dos desvios de espessura da placa, possibilitando uma rápida análise visual de suas variações.

Por fim, considerando-se que os micrômetros externos utilizados atualmente possuem entre 6,50 mm e 8,00 mm de diâmetro em suas faces de contato, deveriam ser consideradas também maneiras para a diminuição da área de contato do elemento medidor com a superfície da placa, ampliando-se assim, a possibilidade de uma melhor definição dos pontos de medição.

2.11.5 Aumentar as Possibilidades de Análise

Conforme mencionado anteriormente, cada tipo de elemento combustível é especificado e produzido de acordo as características do reator em que será empregado e deve atender, além dos requisitos de fabricação e inspeção, aos seus critérios de aceitação (DURAZZO et al., 2015).

Baseando-se em fatos históricos, considera-se bastante possível e até provável, que no futuro surjam demandas para a fabricação de diferentes tipos de placas combustíveis no CECON-IPEN.

Um exemplo recente destas novas demandas foi o desenvolvimento, neste centro, do primeiro combustível nuclear tipo placa para o Reator Nuclear de Pesquisas IPEN–MB 01, que tem por objetivo a simulação do Reator Multipropósito Brasileiro (RBM), projeto institucional considerado a mais importante iniciativa para a pesquisa nuclear no País (IPEN, 2017).

Assim, diante da possibilidade do aparecimento de novos projetos de placas, inclusive com requisitos para a análise de diferentes pontos e dimensões, definiu-se que o novo sistema de medição deveria ser composto por uma estrutura de medição flexível, capaz de posicionar corretamente e realizar os controles de espessura em placas combustíveis de diferentes modelos e tamanhos, além de atender a diferentes procedimentos e critérios de aceitação dimensional.

3 OBJETIVOS

O desenvolvimento deste trabalho é fundamentado na necessidade de aumentar a confiabilidade metrológica nos processos de controle dimensional das placas combustíveis nucleares, que ocorrem durante o desenvolvimento de sua fabricação no CECON-IPEN.

Esta motivação originou o objetivo geral deste trabalho, que é o desenvolvimento de um novo sistema de medição automatizado de placas combustíveis, mediante a concepção, projeto e manufatura de um aparato tecnológico, com características singulares e incrementos perceptíveis em relação ao estado da técnica e aos métodos atualmente realizados.

Com relação a materialização do sistema de medição, o objetivo específico é a construção de um equipamento que permita a execução de medições programáveis, cujos dados sejam automaticamente coletados e sistematicamente tratados via software, e ainda que, as suas fontes de erros e formas de propagação sejam determinadas mediante a aplicação de algoritmo próprio, possibilitando assim, que os resultados obtidos sejam fornecidos juntamente com as suas respectivas incertezas de medição, na forma de relatórios descritivos, gráficos e curvas de resposta.

Com referência ao aumento da confiabilidade metrológica na avaliação da conformidade das placas combustíveis, a proposta é que este novo sistema de medição atinja incertezas nos resultados de medição que, se analisadas em relação aos intervalos de especificação das placas, permitam alcançar valores de índices de capacidade de medição iguais ou superiores a cinco ($C_m \geq 5$), conforme definição deste parâmetro no documento orientador JCGM 106:2012.

E quanto a realização do processo da medição, o objetivo específico é que este novo sistema tenha mais flexibilidade de análise, com possibilidade do aumento de no mínimo 100% do número de pontos de controle de espessura em relação aos 21 pontos medidos atualmente, além de assegurar a execução de medições mais rápidas, reduzindo-se em no mínimo 50% o tempo médio de medição, passando dos atuais de 20 minutos despendidos para a execução de um ciclo completo de medição para, no máximo, 10 minutos por ciclo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para viabilizar este trabalho de pesquisa e desenvolvimento tecnológico e, com o intuito de adequar e validar o método apresentado para os controles dimensionais de espessura placas combustíveis nucleares, foram realizadas operações integradas de manufatura, entre as quais destacam-se a usinagem e montagem de mecanismos automatizados de movimentação, captura, transcrição e processamento dos dados, que culminaram na construção de sistema de medição, posteriormente denominado “Equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica”.

4.1 Definições Iniciais

O desenvolvimento deste trabalho iniciou-se com a definição dos requisitos a serem atendidos pelo projeto, seguido pelo processo de escolha e identificação do sensor de medição que melhor pudesse garantir a exequibilidade do projeto, mediante uma análise das principais características funcionais e metrológicas.

4.1.1 Definição dos Requisitos de Medição

A definição dos requisitos de medição que o sistema de medição deveria contemplar mostrou-se fundamental para o início do desenvolvimento do projeto, considerando-se que o dimensionamento de toda a estrutura mecânica, pneumática, elétrica, de automação e de integração do sistema de medição dependeriam das características técnicas e operacionais destes requisitos e, para tal, alguns parâmetros de ordem técnica foram considerados e são apresentados a seguir.

Especificações das Placas Combustíveis:

Sendo um fator primordial para sua materialização, o sistema de medição a ser construído deveria atender os requisitos metrológicos dos produtos a serem controlados considerando-se, inclusive, as regras de

decisão para verificação da conformidade ou não das placas combustíveis, de acordo com as suas especificações de fabricação.

Foram consideradas, portanto, as características geométricas, dimensionais e de tolerâncias de fabricação de cada uma das placas atualmente fabricadas no CECON-IPEN.

Movimentações de Deslocamento e de Medição:

A translação nos eixos cartesianos X, Y e Z do sistema de medição deveria atender a movimentação espacial necessária para as medições de comprimento, largura e espessura das placas combustíveis. Especificamente neste projeto, o deslocamento no eixo Z seria o mais crítico, pois nele se realizaria a medição da espessura, que possui a menor tolerância dimensional da placa combustível. Assim, para garantir a sua exatidão e precisão, definiu-se o deslocamento no eixo Z deveria ser incorporado diretamente nos sensores, por meio de um sistema de movimentação automática das suas hastes de medição.

Velocidades de Deslocamento e de Medição:

Estabeleceu-se que o sistema de medição deveria atingir a velocidade de deslocamento entre os pontos de medição de até 100 mm/s, e que esta velocidade pudesse ser controlada. Uma vez que esta velocidade é diretamente relacionada com o número de leituras por unidade de tempo que o sistema seria capaz de executar, o estabelecimento desta velocidade foi essencial para determinação dos futuros tempos de medição e para o dimensionamento de vários componentes do sistema.

Ambiente de Trabalho:

O novo sistema de medição deveria ser alocado dentro do laboratório de metrologia do CECON-IPEN, que hoje conta com um sistema de controle de temperatura e umidade relativa do ar, permitindo manter os gradientes de temperatura dentro de limites aceitáveis para o controle dimensional das placas combustíveis. Não obstante a existência destes controles, as especificações dos limites de variação das indicações devido aos possíveis gradientes de temperatura ocorridos no ambiente

foram também consideradas determinantes para o projeto e para a determinação dos materiais componentes do sistema.

Integração de Sinais:

Considerando-se os tipos de sinais e protocolos de comunicação possíveis de trabalho e as futuras necessidades de adequações de padrões de comunicação e troca de dados, os componentes do sistema de medição escolhidos deveriam atender às possibilidades de integração com os demais componentes previstos na sua concepção.

Estrutura do Sistema de Medição:

O sensor de medição escolhido deveria ser compacto o suficiente para ser montado no modelo proposto na fase de concepção do sistema, e possuir a menor massa possível, com o objetivo de minimizar as deformações dos elementos rígidos do sistema e atenuar os efeitos de forças inerciais atuantes nas partes móveis. Assim, as características físicas relacionadas à dimensão, forma e peso do sistema de medição também foram consideradas para a determinação do sensor de medição mais indicado.

4.1.2 Características dos Sensores de Medição

Uma vez definidos os requisitos a serem atendidos pelo projeto, iniciou-se o processo de escolha e identificação do sensor de medição que melhor pudesse atender as necessidades previstas na construção do novo sistema.

Foram analisados vários sensores de medição dimensional que poderiam atuar por meio de métodos com ou sem o contato mecânico entre o sensor e a placa.

Consideraram-se os sensores baseados em diferentes princípios de medição, como os sistemas ultrassônicos, pneumáticos, resistivos, magnéticos, indutivos, capacitivos e ópticos.

Apresenta-se a seguir, um resumo das tecnologias analisadas durante o desenvolvimento deste processo de escolha dos sensores de medição, conforme revisão apresentada em 2.7 e 2.8.

Princípios de Medição de Deslocamento Sem Contato Mecânico

- Ultrassônicos por tempo de voo (ToF)
- Pneumáticos (variação de pressão)
 - por aproximação direta
 - por estrangulamento
- Magnéticos
 - por campos estáticos
 - por placas magnéticas
 - por resistores magnéticos (MDR)
 - por efeito Hall
- Indutivos
 - por eletro indução
 - por correntes parasitas (Foucauld)
- Capacitivos
 - normal
 - diferencial
- Ópticos
 - por luz comum
 - sistemas analógicos
 - sistemas de projeção
 - sistemas de alinhamento
 - sistemas com fibra óptica
 - sistemas de câmeras com matrizes
 - sistemas confocais
 - por laser
 - sistemas interferométricos
 - sistemas de varreduras
 - sistemas de alinhamento
 - sistemas de câmeras com matrizes
 - sistemas baseados em triangulação (LTS)

Sensores com Princípios Ultrassônicos

Este princípio de medição é bastante comum em sensores desenvolvidos para trabalhar sem contato mecânico com os objetos da medição, que apresentam a vantagem de atingir amplas faixas de medição (AZINHEIRA, 2002), além de excelente resposta dinâmica e boa resolução. Todavia sua aplicação em baixas frequências é limitada, exigindo um suporte de tratamento de sinal eletrônico mais complexo e apresentando uma maior sensibilidade à variação dos fatores de influência que possam alterar a velocidade de propagação do som no meio, como a temperatura por exemplo (HATZFELD et al, 2014).

Sensores com Princípios Pneumáticos

Este princípio de medição pode ser utilizado em sistemas de medição com ou sem contato, apresenta facilidade de leitura, rápida resposta dinâmica, baixa histerese e pode atingir até $\pm 1\mu\text{m}$ de erro, sendo ideal para aplicações específicas, como em meios sujeitos à radiação nuclear ou à campos magnéticos (CAVACO, 2002). Não obstante, devido às suas características construtivas, sensores com este princípio normalmente possuem uma faixa de medição bastante limitada, são sensíveis ao acabamento superficial das partes sob medição e dependem da manufatura de elemento de medição e padrões desenvolvidos segundo as características do objeto da medição (RAGHAVENDRA et al, 2013).

Sensores com Princípios Resistivos

Também conhecidos como strain gages, sensores com este princípio de medição, além de deslocamentos, também podem medir outras grandezas físicas, como força, pressão e aceleração (RAGHAVENDRA et al, 2013). Apresentam características positivas, tais como: construção simples, baixo custo, alta resolução, compatibilidade com tecnologias de integração em grande escala (VLSI). No entanto, seu princípio de funcionamento apresenta desvantagens como alto consumo de energia, alta histerese e baixa repetibilidade dos resultados (JUNG et al, 2015).

Sensores com Princípios Magnéticos

Este princípio de medição baseia-se nas mudanças de fluxo / campo magnético causado pelos deslocamentos do sensor e pode ser construído para atuar em sistemas de medição com ou sem o contato. Sensores com este princípio apresentam características positivas como baixo custo, sendo apropriados para medições de deslocamentos lineares e angulares (CAVACO, 2002), além de apresentarem alta sensibilidade, alta faixa de medição, respostas lineares e saídas de alta potência. Contudo, apresentam como fatores negativos as respostas em frequências baixas, além de baixa confiabilidade e alto consumo de energia (JAMONE et al, 2015).

Sensores com Princípios Indutivos

Os sensores baseados neste princípio de medição são amplamente utilizados e podem ser construídos para atuar em sistemas de medição com ou sem contato. De maneira geral demonstram vantagens em diversas aplicações por apresentarem pouco desgaste e possuírem construção compacta; boa resposta dinâmica; alta sensibilidade; boa linearidade de resposta e serem pouco afetados por fatores ambientais como por exemplo, umidade e poeira, se comparados com seus equivalentes capacitivos (CAVACO, 2002). Porém, devido às características inerentes ao seu princípio de funcionamento, os sensores indutivos podem apresentar alta sensibilidade às interferências eletromagnéticas externas, que podem afetar seriamente o seu desempenho. Além disso, como discutido no item 2.7.4., em alguns sensores indutivos, as capacitâncias parasitas podem ser um problema, especialmente na posição nula⁹ do núcleo móvel (EREN, 2017).

⁹ No sistema indutivo dos sensores diferenciais de indutância mútua há um acoplamento igual entre os enrolamentos primário e secundário, originando assim um ponto nulo ou ponto de referência do sensor, conhecido também como posição nula do núcleo móvel.

Sensores com Princípios Capacitivos

Sensores baseados neste princípio de medição normalmente são construções de baixo custo, dispondo de uma ampla gama de sistemas de leitura comercialmente disponíveis (HATZFELD et al, 2014), além de apresentarem vantagens como alta resolução espacial, alta sensibilidade, grande alcance dinâmico e serem pouco afetados por gradientes de temperatura. Apesar destas características positivas, os sensores capacitivos normalmente são propensos a erros derivados da capacitância parasita, sendo, portanto, suscetíveis a interferências de campos, exigindo tratamento eletrônico de sinais mais complexo e apresentando uma maior histerese (LARSON et al 2016).

Sensores com Princípios Ópticos

Conforme discorrido nos itens 2.7.6 e em 2.8.7, existe uma grande variedade de sensores ópticos que operam com e sem contato mecânico com o objeto da medição, o que torna difícil considerar suas características de uma única maneira. Entretanto, de modo geral, observa-se que a maioria dos sistemas baseados nestes princípios apresenta características como alta resolução, ampla faixa de medição, alta repetibilidade e boa confiabilidade (WARD-CHERRIER et al, 2018), além de não serem suscetíveis à interferência eletromagnética e possuírem alta velocidade de resposta. Todavia, alguns dos sensores baseados neste princípio possuem grandes dimensões e são bastante influenciados por gradientes de temperatura ou desalinhamentos (HATZFELD et al, 2014). Outros modelos ainda, apresentam alto consumo de energia e necessitam de tratamento eletrônico de sinais mais complexo (KUPPUSWAMY et al, 2020).

4.1.3 Definição do Sensor de Medição

Baseando-se nos requisitos de medição apresentados no item 4.1.1 e nas características funcionais e metrológicas dos sensores analisados no item 4.1.2, buscou-se a definição do tipo de sensor mais adequado diante das alternativas disponíveis no mercado nacional.

Analisaram-se as especificações funcionais e de projeto de cada alternativa, como suas dimensões, faixas de medição, resolução, erros máximos admissíveis (MPE), repetibilidade, velocidade de resposta e principalmente sensibilidade aos fatores de influência conhecidos e existentes no ambiente operacional do sistema de medição, muitos dos quais relacionados no item 2.9.5.

Foram considerados também os aspectos estruturais e de aplicação, como a adequabilidade espacial de cada sensor, robustez, formas de fixação, formas de apresentação de dados, além das possibilidades de conectividade, integração e apresentação dos resultados.

Os resultados obtidos na soma destas considerações são sintetizados e apresentados de modo ilustrativo na Tabela 03.

Tabela 03 – Características dos sensores de medição

| Características ¹ | Princípio de Medição | | | | | | |
|------------------------------|----------------------|-------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------------|
| | Ultrasônico | Pneumático | Resistivo | Magnético | Indutivo ² | Capacitivo | Óptico ³ |
| Dimensões | ☆☆☆ | ★ | ☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ★ | ☆☆☆☆☆ |
| Faixa de Medição | ☆☆☆☆ | ★ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ |
| Resolução | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ |
| Exatidão (MPE) | ☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ |
| Repetibilidade | ☆☆ | ☆☆☆ | ★ | ☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆ |
| Velocidade de Resposta | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆ | ☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ |
| Fatores de Influência | ★ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆ | ☆☆☆☆ |
| Adaptabilidade Mecânica | --- | --- | ☆☆☆ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆ | ☆☆☆☆☆ |
| Adaptabilidade Eletrônica | ★ | ☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ☆☆☆☆ | ☆☆☆☆☆ | ★ | ☆☆☆☆☆ |
| Total | ☆☆☆½ 2,50 | ☆☆☆ 2,75 | ☆☆☆ 3,00 | ☆☆☆☆½ 3,25 | ☆☆☆☆☆½ 4,50 | ☆☆☆ 2,75 | ☆☆☆☆☆ 4,75 |

¹ Analisadas em relação ao sistema de medição a ser desenvolvido

² Com base em sistemas indutivos diferenciais por indutância mútua (LVDT)

³ Com base em sistemas ópticos baseados em codificação linear (OLE) e triangulação a laser (LTS)

Fonte: Autor da tese

Além das ponderações acima, foram buscadas também outras informações relevantes para o projeto, como a disponibilidade no mercado nacional para o fornecimento e a disponibilidade informações tecnológicas que poderiam ser fornecidos pelos fabricantes e representantes locais antes, durante e após o processo de aquisição dos sensores.

Por fim, outros fatores também considerados foram o custo de aquisição, que deveria ser condizente com os recursos financeiros disponíveis para a execução do projeto e as garantias de assistências técnicas e reais possibilidades de manutenção disponibilizadas no território nacional.

Após análise de cada um destes critérios e de um balanço dos aspectos positivos e negativos de cada tecnologia disponível (Tabela 03), concluiu-se que três tecnologias de sensores disponíveis no mercado se sobressaíram em relação às outras, configurando-se como melhores alternativas para composição do projeto. Apresentam-se a seguir as alternativas selecionadas:

- I – Sensores indutivos baseados em sistemas de variação da indutância mútua entre dois indutores - LVDT (Linear Variable Differential Transformer);
- II - Sensores ópticos baseados em sistemas de codificadores lineares por transmissão fotoelétrica - LE (Linear Encoders);
- III – Os sensores ópticos baseados em sistemas de triangulação a laser - LTS (Laser Triangulation Sensors) com detecção posicional unidimensional PSD (Position Sensitive Detector).

Observa-se que as tecnologias dos sensores indutivos (LVDT) e dos sensores com codificadores lineares (LE) possuem modos de aplicação semelhantes (por contato) e, embora bastante diferentes quanto ao seu princípio de funcionamento, ambas apresentam alta sensibilidade e oferecem boa capacidade de amplificação do sinal, além de se materializarem como sensores compactos e com baixa sensibilidade aos gradientes de temperatura e umidade. As duas tecnologias oferecem relativa proteção a eventuais sobrecargas mecânicas pois, internamente, os elementos transdutores não têm contato direto com a parte móvel do sensor.

Apesar de similares nestes quesitos, a tecnologia dos codificadores lineares apresenta vantagem por ser mais indicada para a realização de medições com alta dinâmica pois, nos sensores indutivos, os efeitos inerciais resultantes de deslocamentos podem levar a erros de medição, considerando-se que seu núcleo tem massa considerável (RAGHAVENDRA et al, 2013) em comparação aos codificadores lineares.

Além disso, considerou-se que, por portar princípio de funcionamento baseado em indução, a aplicação da tecnologia LVDT poderia apresentar alguma sensibilidade às interferências eletromagnéticas existentes no ambiente ou a alguma eventual capacitância parasita, principalmente próximo à posição nula do núcleo móvel (EREN, 2017).

Com relação à análise realizada entre as tecnologias dos codificadores lineares (LE) e os sistemas de triangulação a laser (LTS), embora ambas possuam modos de aplicação bastante diferentes (com e sem contato), percebe-se que as duas utilizam-se de sistemas baseados em princípios ópticos, que se traduzem por características metrológicas bastante indicadas para a aplicação proposta, tais como: disponibilidade de faixas de medição, excelente resolução, baixos erros máximos admissíveis, baixas deriva e estabilidade, robustez mecânica (HATZFELD et al, 2014), além de uma menor sensibilidade às grandezas de influência.

Ao final, a decisão para a escolha entre as tecnologias dos codificadores lineares e os sistemas de triangulação a laser baseou-se em critérios comerciais e mercadológicos, pois, ao contrário do que ocorre com os sensores baseados em sistemas de codificadores lineares, percebeu-se que não existem empresas no mercado nacional que ofereçam o suporte técnico e tecnológico necessário aos sensores baseados em sistemas de triangulação a laser.

Uma consulta ao mercado revelou que grande maioria das empresas que oferecem os sistemas de triangulação a laser são apenas representantes locais, sem disponibilidade de sensores para demonstração e testes de aplicação, e sem a estrutura necessária para garantir uma manutenção e peças de reposição no mercado nacional. Soma-se a isto o fato de que, o custo para aquisição no mercado brasileiro dos sensores baseados em sistemas de triangulação a laser é, em média, 40% (quarenta por cento) maior do que os sensores baseados em sistemas de codificadores lineares.

Ao final da análise, definiu-se que os sensores baseados em sistemas de codificadores lineares por transmissão fotoelétrica (LE - Linear Encoders) seriam a melhor opção para a integração ao projeto. Como contribuição adicional para esta decisão, percebeu-se que, alguns dos sensores oferecidos no mercado brasileiro poderiam incorporar recursos para o desenvolvimento de uma movimentação automática de suas hastes e abarcar soluções de conectividades para a captação e transmissão de seus dados.

4.2 Desenvolvimento Experimental

O desenvolvimento experimental deste trabalho envolveu as fases de concepção, projeto, seleção de componentes e materiais, a manufatura, a integração e os testes funcionais do equipamento, conforme segue.

4.2.1 Concepção do Equipamento

Como mencionado anteriormente, iniciou-se este desenvolvimento com a premissa da construção de um equipamento que possibilitasse a medição automatizada da espessura de placas combustíveis nucleares, atuando com um mínimo de interferência humana tanto na realização da medida, como na obtenção, na transcrição e no processamento matemático dos dados.

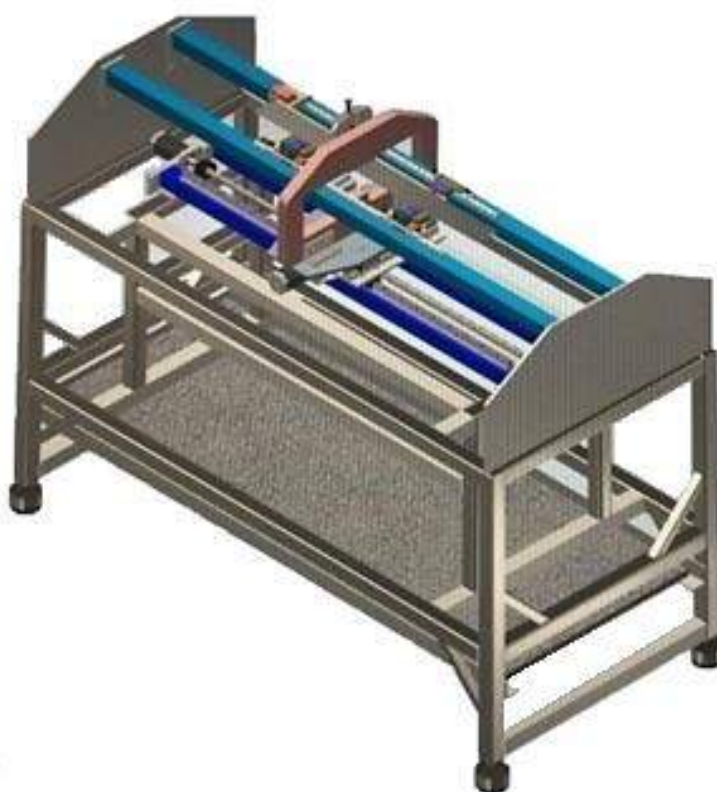
Com estas considerações, trabalhou-se primeiramente no desenvolvimento da concepção de um equipamento que deveria ser composto por um sistema de movimentação automatizado, baseado em motores de deslocamento e comandado por controlador lógico programável.

Nesta concepção foram considerados diversos fatores estruturais, tais como, os sistemas de referência, a rigidez do conjunto, os graus de liberdade da placa sob medição, as formas de contato, o sistema de fixação, a existência de fontes de aquecimento do sistema, os erros de paralaxe, os erros de Abbe e os possíveis desvios angulares.

Conforme discutido no item 4.1.3, definiu-se também que o sistema de aquisição e transmissão dos dados deveria ser composto por sensores de medição baseados em sistemas de codificadores lineares por transmissão fotoelétrica (LE - Linear Encoders).

O equipamento também deveria dispor de detectores de tangência por fibra óptica para referenciamento da placa, transdutores de deslocamento rotativos ou lineares para determinação dos sistemas de coordenadas e sistema de processamento para tratamento e análise matemática dos resultados. A concepção inicialmente proposta é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Concepção inicial do equipamento



Fonte: Autor da tese

4.2.2 Projeto do Equipamento

Com base nesta concepção inicial, desenvolveu-se o projeto do equipamento, partindo-se da definição de sua base, que deveria ser constituída por uma estrutura rígida de aço capaz de suportar os componentes de medição e os dispositivos de posicionamento e fixação da placa combustível.

A partir do projeto da base desenvolveram-se as análises dos sistemas de deslocamento e movimentação dos eixos, dos transdutores de posicionamento e dos sensores de medição.

Para a elaboração deste projeto e geração dos desenhos de manufatura e montagem relacionados, utilizou-se o software de projeto assistido por computador (CAD) Inventor desenvolvido pela empresa Autodesk, Inc.

4.2.3 Seleção dos Componentes e Materiais

Mediante a análise das alternativas, sob os pontos de vista científico-tecnológicos e da alocação financeira destinada, selecionaram-se os componentes e materiais que poderiam melhor atender ao projeto e à construção do equipamento. A escolha de cada destes componentes é comentada a seguir.

Sensores de Medição Baseados em Codificadores Lineares

Com base na discussão apresentada no item 4.1.3, pesquisou-se os sistemas de medição baseados em codificação linear disponíveis no mercado local, optando-se pela aquisição de dois sensores de medição com movimentação pneumática integrada, modelo Mitutoyo LGB-2, que possuem a faixa de medição de 10 mm, com resolução de 1 μm e erro máximo admissível de 2 μm . Como parte complementar ao sistema foi adquirido também o módulo integrado de indicação e comunicação Mitutoyo EH-102P (MITUTOYO CORPORATION, 2020). Nos Anexos 01 e 02, localizados nos elementos pós-textuais deste trabalho, são apresentadas em detalhes as especificações técnicas destes componentes.

Sensor de Fibra Óptica

Investigou-se uma tecnologia que seria condizente para a detecção de bordas de superfícies, que possibilitasse a execução do referenciamento posicional das placas combustíveis sob medição, mediante a correlação entre o sistema de coordenadas do equipamento e o sistema de coordenadas das placas. Considerando-se a exatidão necessária e os custos envolvidos na aquisição, decidiu-se pela utilização do sensor amplificador Autonics série BF4R (AUTONICS CORPORATION,

2020a)., juntamente com o cabo de fibra óptica série FT-320-05R (AUTONICS CORPORATION, 2020b). Nos Anexos 03 e 04 são apresentadas as especificações técnicas destes componentes.

Transdutores de Deslocamento Linear

Considerando-se a possibilidade da ocorrência de folgas mecânicas na transmissão do movimento que poderiam comprometer a transdução dos sinais de deslocamento, descartou-se a utilização dos sinais de deslocamento rotativos obtidos diretamente dos motores de acionamento, ainda que fosse tecnicamente viável. Assim, selecionou-se para a detecção do deslocamento do eixo X o transdutor linear incremental modelo Fagor MX 170 e para o eixo Y o modelo MX 1140 (FAGOR AUTOMATION, 2023). No Anexo 05 são apresentadas as especificações técnicas destes transdutores.

Motores de Acionamento

Inicialmente decidiu-se pela utilização de motores de passo como alternativa de aplicação de dispositivo eletromecânico de acionamento para os eixos, considerando-se as suas menores dimensões e os menores custos de aquisição. Assim, selecionou-se para o eixo X o motor de passo modelo Kalatec Nema 23 HT23-402.8 (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2020b) e, para o eixo Y, o motor de passo modelo Nema 34 KML092-IP65 (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2020c), ambos acionados por drivers modelo STR8 (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2020a). Análises posteriores ocorridas durante o andamento do projeto demonstraram que o motor de passo modelo Nema 34 KML092-IP65 selecionado para o eixo Y não atenderia a alguns requisitos, pois seria necessário garantir neste eixo, de maior curso, uma melhor precisão de controle, maior velocidade e maior torque, bem como garantir uma menor vibração durante o seu acionamento (GILL, 2021) (CITISYSTEMS, 2020). Destarte, decidiu-se pela substituição deste motor de passo por um servo motor, ficando definido para o eixo Y a utilização do servo motor modelo Delta ECMA-C20604 (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2020d) com

driver modelo ASD-A2-0421-M (DELTA, 2023a). Nos Anexos 06, 07, 08 e 09 são apresentadas as especificações técnicas destes componentes.

Controlador Lógico Programável

Analisaram-se as características de automação do projeto; como linguagem de programação, velocidade de processamento, capacidade de armazenamento, tipos e quantidades de entradas e saídas de sinais disponíveis, protocolos de comunicação e possibilidades de associação à módulos de expansão. Assim, selecionou-se para o desenvolvimento das funções de automação, controle e monitoramento do equipamento o controlador lógico programável (CLP) modelo Delta AS324 MT-A (DELTA, 2023c). No Anexo 10 são apresentadas em detalhes as especificações técnicas deste CLP.

IHM - Interface Homem-Máquina

Considerando-se a necessidade da entrada e saída de dados no CLP durante a preparação e execução das medições, tais como o estabelecimento de parâmetros de movimentação, acionamento de funções e introdução de dados referenciais, procurou-se identificar uma interface gráfica que pudesse simplificar o uso e tornar eficiente a comunicação entre o operador e o equipamento. Selecionou-se para estas funções a IHM modelo DOP-107EV, com tela sensível ao toque de 7 polegadas, resolução 800x480 pixels, 65.536 Cores TFT e processador Cortex-A8 800MHz (DELTA, 2023b). No Anexo 11 são apresentadas as especificações técnicas desta IHM.

Sistema de Processamento

Baseando-se nas características necessária ao projeto, como capacidade e velocidade de processamento, capacidade de armazenamento, tipos e quantidades de entradas e saídas de sinais e possibilidades de expansão, selecionou-se para compor o sistema de processamento o desktop Dell modelo Vostro 3470 com processador quad-core de 9ª geração Intel Core i3-9100 de 4.2 GHz, cache de 6MB e sistema operacional Windows 10 Pro Single Language de 64 bits. O

equipamento deveria ainda apresentar uma placa de vídeo integrada Intel UHD Graphics 630, memória DDR4 de 4GB e 2400 MHz, armazenamento em HD SATA 3,5 pol. de 1TB e placa de rede Dell Wireless 1707 802.11 b/g/n + Bluetooth 4.0 de 2.4GHz. (DELL INC., 2020). No Anexo 12 são apresentadas as especificações técnicas detalhadas deste sistema de processamento.

Guias Lineares

Para garantir a retitude (–) e paralelismo (//) dos movimentos dos eixos de translação do sistema, foi definida a utilização de guias lineares de esferas para a sustentação dos elementos móveis do equipamento, com especificações de tolerâncias apropriadas ao projeto. Assim, a guia linear selecionada para o transportador do eixo X, com 105 mm de curso ($// \leq 5\mu\text{m}$), e para o transportador do eixo Y, com 1.250mm de curso ($// \leq 15\mu\text{m}$), foi o modelo OBR-A20H. Para os posicionadores com mola, com 1.350 mm de curso ($// \leq 18\mu\text{m}$), foi selecionado o modelo OBR-C12H, e para os dispositivos de ajustes de altura dos sensores, com cursos de 26 mm e 40 mm ($// \leq 3\mu\text{m}$), foi selecionado o modelo OBR-C7H (OBR, 2017). No Anexo 13 são apresentadas as especificações técnicas destas guias lineares.

Materiais de Manufatura

Para a construção da base do equipamento e manufatura dos demais componentes de apoio e fixação, optou-se pela utilização do aço carbono SAE 1045, considerando-se sua boa soldabilidade, boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura e seu custo acessível, se comparado com outras ligas metálicas

Para a manufatura em corpo único do arco de medição, optou-se pela utilização da liga Al Mg Si 6351 T6, considerando-se sua boa usinabilidade, baixo peso específico, boa resistência mecânica, resistência à corrosão e durabilidade

Para a manufatura dos demais componentes constituintes de partes móveis do equipamento, sujeitos a esforços mecânicos e com necessidade de resistência a corrosão, optou-se pela utilização da liga

Al Zn 7075. Nos Anexos 14, 15 e 16 são apresentadas as especificações técnicas dos materiais utilizados.

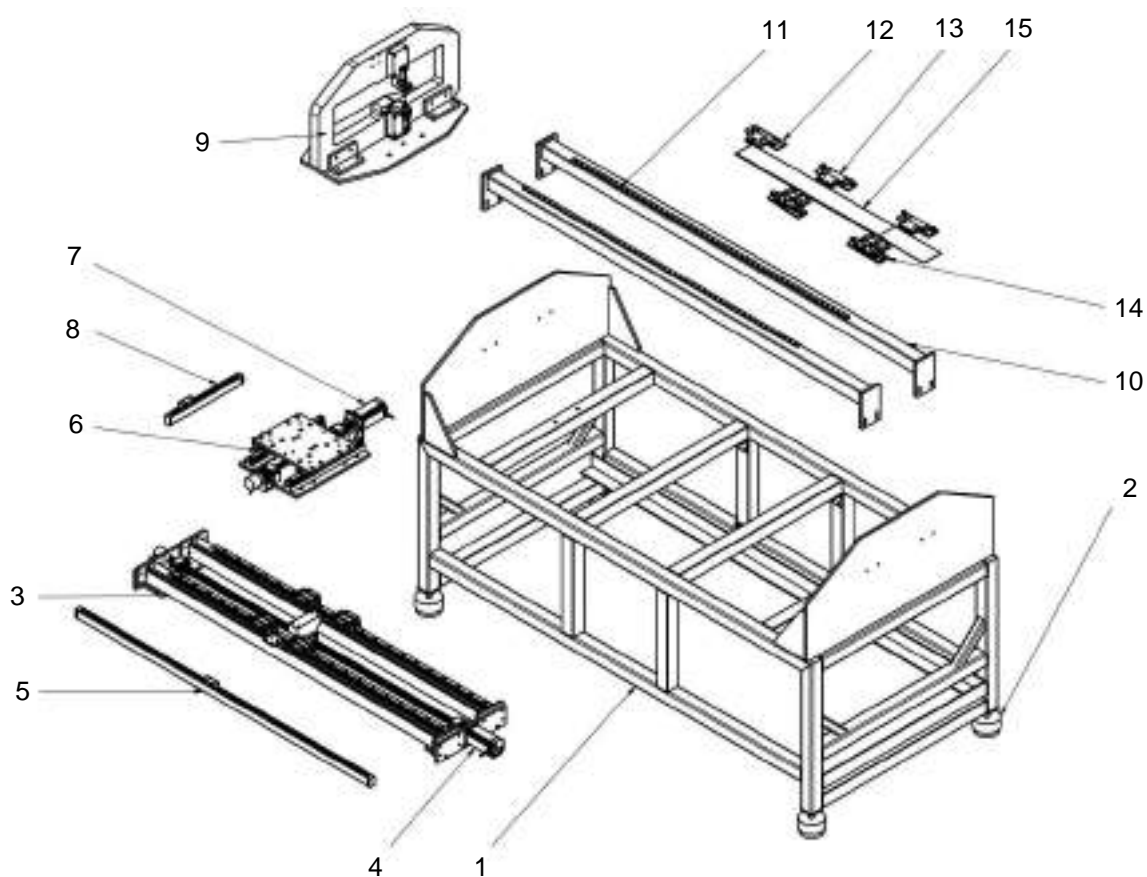
4.2.4 Descrição Estrutural do Equipamento

Conforme previsto na concepção inicial, o projeto estrutural do equipamento foi baseado na execução das medições de espessura das placas combustíveis por meio do deslocamento no plano X e Y de dois sensores de medição lineares por transmissão fotoelétrica contrapostos.

Para uma melhor compreensão desta estrutura, descreve-se a sequência de montagem dos subconjuntos e componentes que compõem o equipamento, relacionando-os aos números que são apresentados na Figura 32.

O subconjunto do arco de medição, também denominado pórtico de varredura (9), fica apoiado sobre o transportador linear do eixo X (6), cuja movimentação é realizada pelo acionamento do motor de passo (7), e cujas coordenadas de translação são captadas pelo transdutor linear do eixo X (8).

Figura 32 – Detalhes dos subconjuntos e componentes do equipamento



| | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 - Base estrutural de aço | 8 - Transdutor linear do eixo X |
| 2 - Amortecedores antivibratórios | 9 - Subconjunto do arco de medição |
| 3 - Transportador do eixo Y | 10 - Travessas dos posicionadores |
| 4 - Servo motor do eixo Y | 11 - Guias de deslocamento linear |
| 5 - Transdutor linear do eixo Y | 12 - Encosto limitador |
| 6 - Transportador do eixo X | 13 - Posicionador fixo |
| 7 - Motor de passo do eixo X | 14 - Posicionadores com mola |
| | 15 - Placa combustível |

Fonte: Autor da tese

Este conjunto, por sua vez, é montado sobre os transportadores do eixo Y (3), cujo deslocamento é realizado pelo acionamento do servo motor (4), e cujas coordenadas de translação são captadas pelo transdutor linear do eixo Y identificado pelo número (5).

Toda esta montagem é suportada por uma base estrutural de aço (1) que é apoiada no solo, mediante a utilização de amortecedores antivibratórios (2), assegurando rigidez e estabilidade ao equipamento.

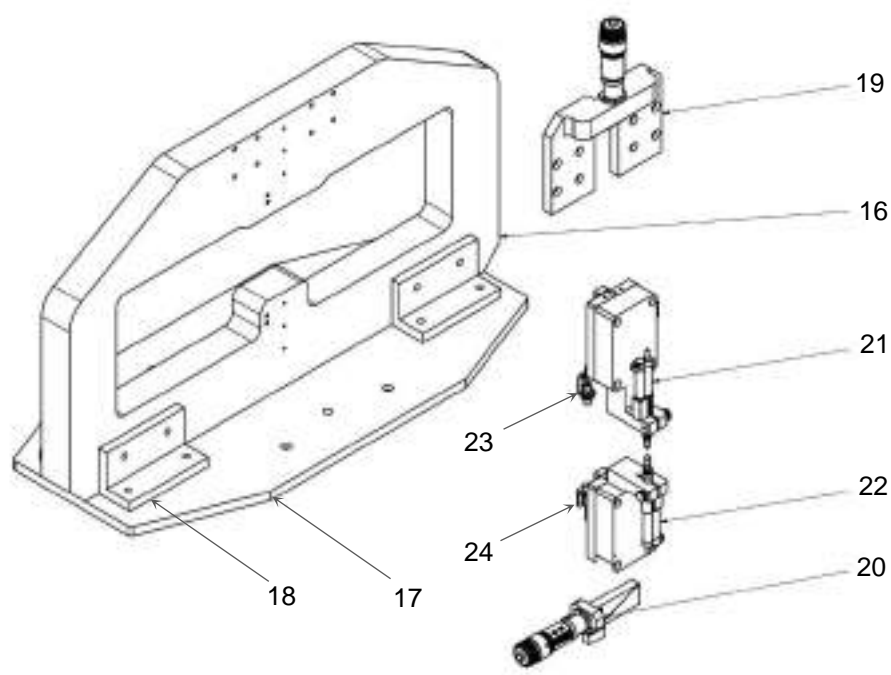
Nesta mesma base estrutural também são fixadas as travessas dos posicionadores (10), onde ficam localizadas as guias de deslocamento linear dos posicionadores (11), que sustentam o posicionador fixo (13), o encosto limitador (12) e os posicionadores com mola (14). Estes componentes integram o berço de medição da placa combustível (15).

Descreve-se a seguir os itens que compõem a montagem do subconjunto do arco de medição, identificado como (9) na Figura 32, relacionando-os aos números que são apresentados na Figura 33.

Os dois sensores de medição lineares por transmissão fotoelétrica contrapostos (21 e 22) e o elemento emissor (23) e o receptor (24) do sensor de fibra óptica, são montados nos suportes de ajuste de altura dos sensores (19 e 20) que, por sua vez, são fixados na estrutura em corpo único do arco de alumínio (16), que é fixada em uma base (17) por meio de cantoneiras também de alumínio (18).

Nos Apêndices de números 01 a 08, localizados nos elementos pós-textuais deste trabalho, são apresentados os desenhos de projeto com detalhes dos subconjuntos e componentes do equipamento.

Figura 33 – Detalhes do subconjunto do arco de medição



16 - Corpo do arco de alumínio

17 - Base do arco de medição

18 - Cantoneiras de fixação do arco

19 - Suporte ajuste de altura sensor superior

20 - Suporte ajuste de altura sensor inferior

21 - Sensor de medição (OLE) superior

22 - Sensor de medição (OLE) inferior

23 - Emissor do sensor de fibra óptica

24 - Receptor do sensor de fibra óptica

Fonte: Autor da tese

4.2.5 Descrição do Modo de Operação

Para uma melhor compreensão do modo de operação do sistema, descreve-se o roteiro de execução operacional para a obtenção das medidas de espessura das placas combustíveis, relacionando-se nesta descrição os números dos subconjuntos e componentes apresentados nas Figuras 32 e 33.

- a) A placa combustível (15), devidamente laminada e cortada nas suas dimensões finais, é posicionada no berço de medição, apoiando sua extremidade superior no encosto limitador (12), apoiando sua lateral nos posicionadores fixos (13) e ajustando o outro lado nos posicionadores com mola (14).

- b) Em seguida, por meio de um comando na IHM, inicia-se a movimentação automatizada do equipamento, mediante a ação do CLP que comanda os acionamentos dos motores de deslocamento (4 e 7) e dos transportadores dos eixos X (6) e Y (3), até um ponto previamente determinado no sistema de coordenadas do equipamento, que é a sua referência inicial e que recebe a denominação de ponto de origem da máquina ou ponto zero máquina.
- c) Com o sistema posicionado no ponto de zero máquina, um novo comando é inserido na IHM para que se movimente os eixos X e Y até um segundo ponto, também previamente determinado no sistema de coordenadas do equipamento, que é a posição de ajuste (ou preset) dos sensores, onde fica posicionado um bloco padrão classe 0 (JIS, 2004) de referência, cuja espessura, que é determinada de acordo com o modelo da placa a ser medida.
- d) Com o sistema posicionado no ponto de ajuste dos sensores, um novo comando é inserido na IHM para que o sistema se movimente nos eixos X e Y, efetuando a detecção das extremidades frontal e lateral da placa, com a utilização do sensor de tangência por fibra óptica (23 e 24), que dispara um sinal para o CLP que executa o registro das coordenadas correspondentes ao ponto de referência inicial da placa, que recebe a denominação de ponto de origem da placa ou ponto zero placa.
- e) Determinadas as coordenadas do ponto de origem da placa, são introduzidos por meio da IHM os dados para a execução da medição, ou seja, são informados os valores nominais de comprimento e largura da placa, o número de pontos da malha de medição em X e Y (que determinam via software as coordenadas dos pontos de medição), a rampa de aceleração e as velocidades de medição e deslocamento dos motores. Introduzidos estes dados, uma programação previamente desenvolvida no CLP aciona os motores

para executar a movimentação do sistema segundo a trajetória definida de medição.

- f) Uma vez nos pontos de medição pré-definidos, os sensores de medição superior (21) e inferior (22), recebem do CLP os comandos para a movimentação de acionamento e de retração pneumática de suas hastes de medição e, simultaneamente, enviam os sinais de deslocamento que serão processados de forma diferencial (canais A+B), fornecendo assim, os valores relativos à espessura da placa e anulando possíveis variações de posicionamento ocorridas no eixo de medição Z em relação a placa sob medição. Estes valores de espessura serão correlacionados no sistema de processamento com as coordenadas informadas pelos transdutores lineares dos eixos X (8) e Y (5).
- g) Determinados os valores das coordenadas espaciais da placa, ou seja, a espessura, a coordenada em X e a coordenada em Y do ponto medido, o sistema processa os dados e, mediante a repetição de ciclos de medições pré-determinados, o algoritmo desenvolvido executa os cálculos e apresenta os resultados das medições juntamente com a expressão de suas incertezas, analisadas conforme as diretrizes do GUM (JCGM, 2008).
- h) Além dos resultados das medições obtidas e suas respectivas incertezas de medição, o sistema realiza a geração automática de um relatório de medição e de um modelo gráfico com representações de variações cromáticas da curva de resposta de variação da espessura da placa, facilitando assim, a interpretação dos resultados obtidos e fornecendo mais detalhes sobre os fenômenos ocorridos durante os processos de fabricação como, por exemplo, as influências de alterações efetuadas nos parâmetros de laminação ou de mudanças nos materiais utilizados na composição da placa, com relação aos resultados das características finais das placas.

4.2.6 Manufatura do Equipamento

Finalizados os projetos construtivos e funcionais do equipamento, iniciou-se a execução da sua manufatura, com operações de construção da base, usinagem das peças, montagem dos subconjuntos e componentes, regulagens e ajustes iniciais.

Construção da Base

Para a construção da base do equipamento, utilizou-se elementos tubulares de secção quadrada de 50 mm x 50 mm e de 30mm x 30 mm, cantoneiras de 1 ½ polegadas e chapas laminadas de 15 mm de espessura, todas fabricadas em aço SAE 1045. Realizou-se a união dos elementos por soldagem a arco elétrico com gás de proteção inerte, conhecido como soldagem MIG (Metal Inert Gas).

Em seguida realizou-se o acabamento das soldagens por esmerilhamento e a proteção das superfícies com a aplicação de uma camada de 40 µm de produto catalisador a base de poliuretano acrílico texturizado fosco, conforme apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Construção da base do equipamento



Fonte: Autor da tese

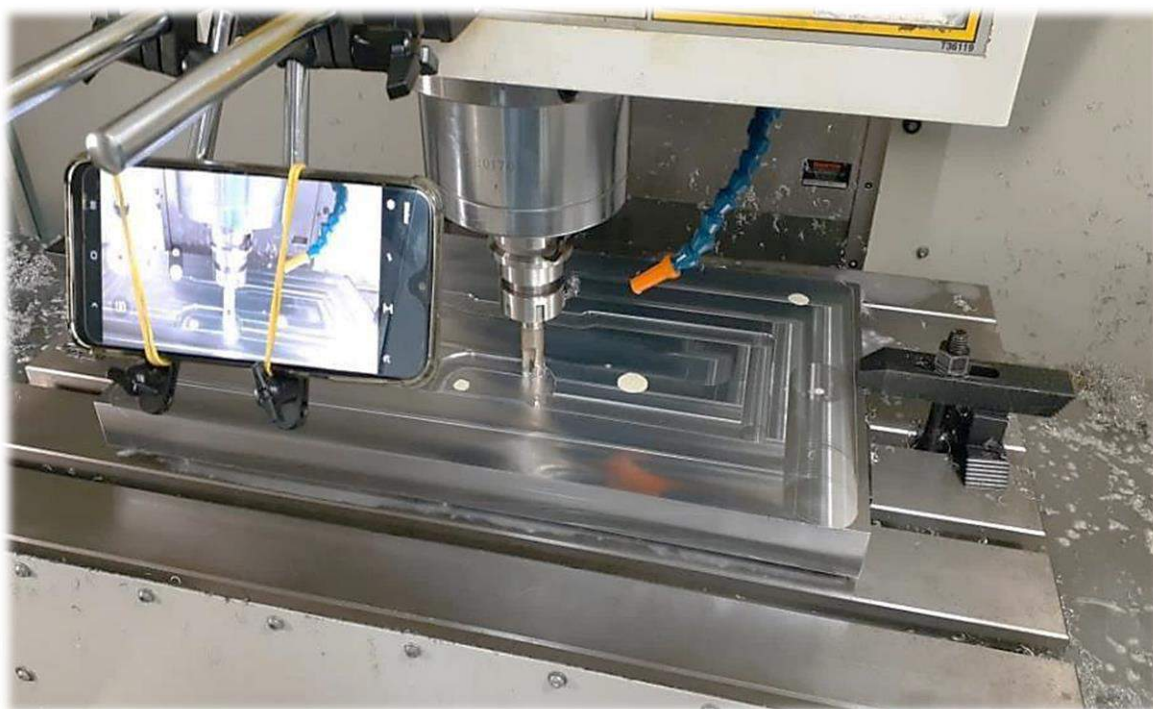
Usinagem das Peças

Para a usinagem das peças de maior complexidade, foram utilizados os modelos do projeto gerado no CAD conforme mencionado no item 4.2.2, importando-se diretamente os dados para o software de manufatura assistida por computador (CAM) Edgecam, desenvolvido pela empresa Hexagon Manufacturing Intelligence, que executou a análise das usinagens e a programação das instruções para o comando numérico computadorizado das máquinas operatrizes (CNC).

Realizaram-se as operações de usinagem das peças por revolução no centro de torneamento Romi GL 240 equipado com o comando GE Oi-TC desenvolvido pela empresa Fanuc Corporation.

As peças prismáticas foram usinadas no centro de usinagem vertical Romi D 600, equipado com o comando Sinumerik 828D desenvolvido pela empresa Siemens Aktiengesellschaft, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Processo de usinagem dos componentes



Fonte: Autor da tese

As operações de usinagem de menor complexidade foram realizadas em máquinas-ferramenta convencionais como tornos horizontais, fresadoras universais, fresadoras horizontais, retificadoras planas, retificadoras cilíndricas e furadeiras de coluna e de bancada.

Montagem dos Subconjuntos Componentes

Finalizadas as usinagens das peças, iniciou-se a montagem dos componentes do equipamento a partir de sua base, com a fixação dos elementos de sustentação, das guias lineares e a colocação do fuso de esferas do eixo Y.

Em seguida, efetuou-se a montagem do sub quadro e a fixação das guias lineares, a colocação do fuso de esferas do eixo X, seguido pela fixação da base de sustentação e da montagem do arco de medição, conforme apresentado na Figura 36.

Posteriormente, fixaram-se as travessas de suporte dos posicionadores e instalaram-se o encosto limitador, o posicionador fixo e os posicionadores com mola do berço de medição das placas.

Figura 36 – Processo de montagem dos componentes



Fonte: Autor da tese

Depois, realizaram-se os acoplamentos dos motores nos fusos de esfera e a fixação dos elementos detectores de posição, das microchaves de fim de curso, dos sensores de fibra óptica e dos sensores de medição. O processo de montagem foi finalizado com o posicionamento e o cabeamento dos componentes eletroeletrônicos, ou seja, das fontes de alimentação, do sistema de processamento, do CLP, da IHM, dos comutadores, dos módulos de acionamento, de controle e de comunicação, das chaves de manobras e demais chaves e componentes de proteção.

Regulagens e Ajustes Iniciais

Durante a montagem dos componentes, foram executados vários ajustes e regulagens, visando garantir ao máximo a precisão do equipamento, minimizando os erros geométricos associados ao seu funcionamento e, garantindo assim, a exatidão dos resultados. São citados a seguir algumas destas regulagens e ajustes, dos quais foram extraídas informações importantes de desvios residuais, que serviram de base para as análises das incertezas padrão desenvolvidas no item 4.3.3 e para a determinação dos coeficientes de sensibilidade desenvolvidos no item 4.3.4, que serão tratados mais adiante.

Identificou-se que desvios de paralelismos entre as duas guias de deslocamento do eixo Y poderiam resultar na ocorrência de movimentos de rotação (rolling) durante o movimento de translação deste eixo, produzindo erros de cosseno nas medições. Assim, durante a montagem, buscou-se garantir o melhor alinhamento possível entre estas duas guias de deslocamento. Após os devidos ajustes, observou-se um desvio residual de alinhamento de 0,05 mm entre as duas guias, que são distantes em 170 mm uma da outra, sendo este o valor máximo de desvio encontrado ao longo dos 960 mm de curso. No eixo X não foram detectados desvios de paralelismo significativos (maiores que 0,001mm) entre as duas guias ao longo dos seus 110 mm de curso.

Observou-se que desvios de alinhamento entre o movimento dos sensores de medição e a superfície da placa sob medição também

poderiam provocar erros de cosseno nas medições e tornar necessária a ampliação da faixa de medição necessária no sensor para a execução das medidas, aumentando proporcionalmente o valor do erro máximo admissível a ser considerado na determinação da incerteza dos resultados de medições. Assim, durante a montagem, buscou-se obter o melhor alinhamento possível entre as faces de apoio dos posicionadores da placa e os movimentos executados pelos carros dos eixos X e Y. Após os devidos ajustes, observou-se um desvio residual máximo de alinhamento de 0,15 mm em 140 mm de deslocamento, considerando-se a interpolação de movimento dos dois eixos.

Constatou-se que desvios de alinhamento entre o eixo do plano do padrão de referência e o eixo do plano formado pelas faces de apoio dos posicionadores da placa poderiam provocar erros de cosseno nas medidas referenciadas com o processo de calibração. Assim, durante a montagem, buscou-se obter o melhor alinhamento possível entre estes planos. Após os devidos ajustes, observou-se um desvio máximo residual de alinhamento de 0,05 mm ao longo dos 25 mm de comprimento útil do maior padrão a ser utilizado.

Por fim, considerou-se o fato de que, quando um corpo rígido está suportado horizontalmente, a quantidade de flexão ocasionada por seu próprio peso varia significativamente, dependendo da posição dos seus pontos de apoio. Assim, durante a elaboração do projeto, buscou-se elaborar um sistema que permitisse o correto posicionamento das faces de apoio dos elementos posicionadores, projetando o sistema para garantir que cada modelo de placa combustível a ser medida pudesse ser locado nos seus respectivos Pontos de Bessel (NIJSSE, 2001).

4.2.7 Integração dos Sistemas

Uma vez mecanicamente montados, regulados e ajustados os componentes, iniciaram-se os processos de integração eletroeletrônica, eletropneumática e de dados dos componentes, mediante a interligação entre o CLP do equipamento de medição e os demais hardwares e softwares designados,

além da elaboração e implantação da rede de aquisição e a padronização do envio de sinais dos sensores de medição, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Processo de integração dos sistemas



Fonte: Autor da tese

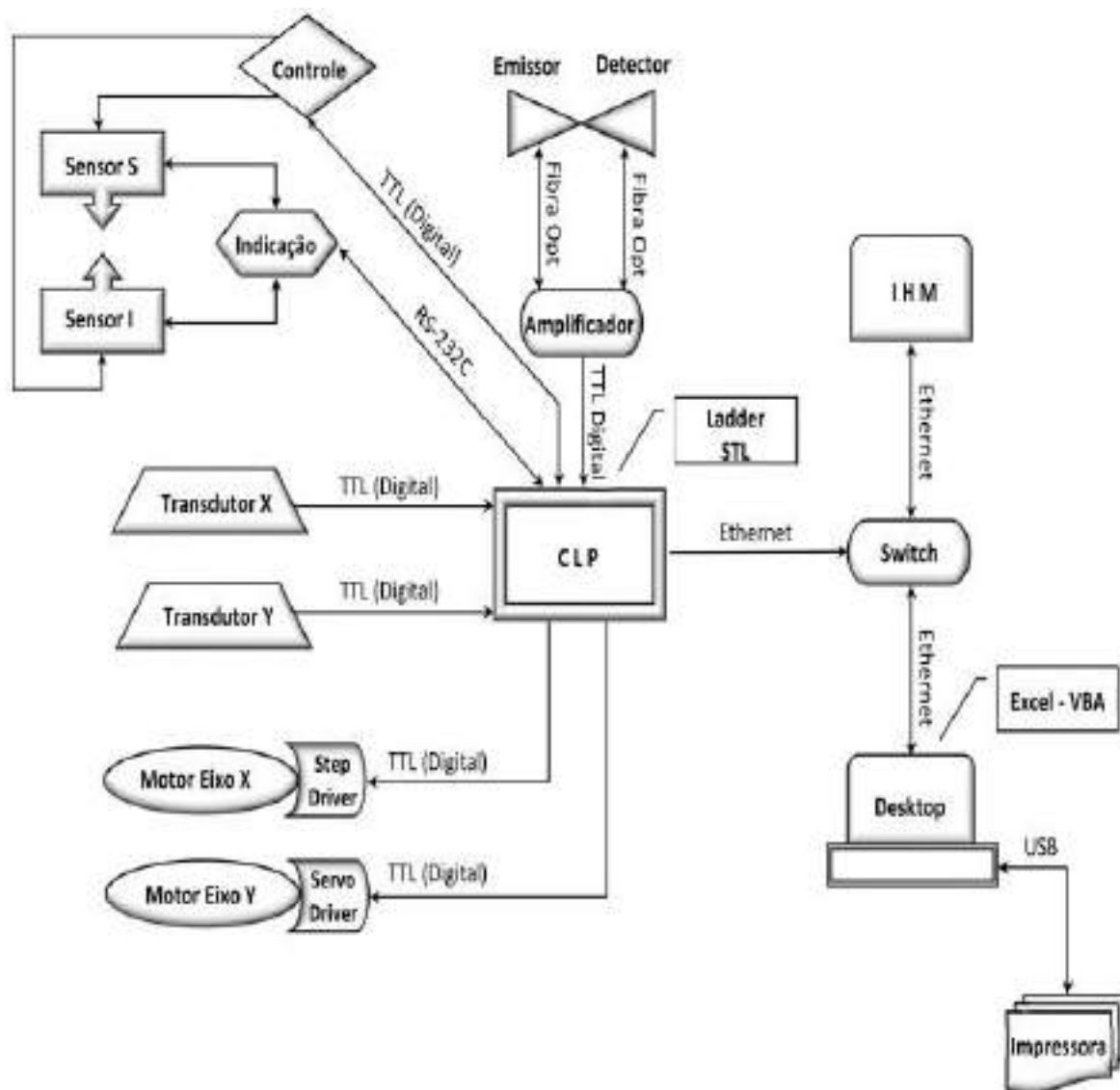
Nesta integração, efetivou-se a comunicação do CLP com a IHM e com o sistema de processamento por intermédio de um comutador (switch) via rede de área local Ethernet.

A recepção de dados dos sensores de medição no CLP foi efetivada por intermédio do módulo integrado de indicação e comunicação utilizando-se de portas seriais RS-232C e a recepção de dados dos transdutores de deslocamento linear e do sensor detector tangência foi efetivada por sinais digitais (binários diferenciais) classe lógica transistor-transistor (TTL).

Da mesma maneira, utilizou-se sinais digitais (binários diferenciais) classe lógica transistor-transistor (TTL) para o envio dos sinais do CLP para os drivers de acionamento dos motores e para o envio de sinais para o módulo de controle das válvulas solenoides que controlam o fluxo de ar comprimido utilizado no acionamento dos cilindros pneumáticos dos sensores de medição.

Na Figura 38 é apresentada de maneira esquemática a comunicação entre os sistemas.

Figura 38 – Diagrama de integração dos sinais



Fonte: Autor da tese

Desenvolveu-se a programação do CLP na linguagem Ladder estruturada. O algoritmo de recepção, tratamento e modelagem dos dados e a elaboração do modelo matemático para execução do cálculo de análise de incerteza dos resultados de medições, assim como a geração das curvas de

resposta das superfícies foram programadas por meio do software Microsoft Excel com o complemento do Visual Basic for Applications (VBA).

Para o desenvolvimento das programações, foram considerados, entre outros: a metodologia de cálculo e apresentação dos resultados, a definição de algarismos significativos, a previsão e possíveis tratamento de erros, as interpolações e extrapolações adotadas, a transformação de unidades, a variação do tamanho da amostragem, a formulação do algoritmo, as constantes físicas aplicáveis, os arredondamentos e os filtros e arredondamentos necessários.

4.2.8 Testes Funcionais

Cumpridas as etapas de manufatura, integração e de instalação do equipamento no laboratório de metrologia do CECON-IPEN, iniciaram-se os testes funcionais com a execução de comandos de acionamento e verificação das respostas de movimentação e a validação do envio e recepção dos sinais, analisando-se a confiabilidade e integridade dos dados em sua transmissão ao longo da rede. Na Figura 39 é apresentada a configuração final do equipamento.

Figura 39 – Equipamento instalado no laboratório do CECON-IPEN



Fonte: Autor da tese

Em seguida, executou-se uma bateria de testes de simulação de medição que evidenciaram a necessidade de pequenos ajustes e adequações em algumas das funções de comando e de comunicação do sistema, que foram revisadas e implementadas com sucesso.

Com a realização de uma nova bateria de testes de movimentação e transmissão de dados, o equipamento foi considerado integralizado e em conformidade com os requisitos do projeto e pronto para a utilização em situações reais de medição.

4.3 Tratamento dos Dados

O tratamento matemático dos dados discutido a seguir foi baseado em dados reais obtidos nas medições realizadas no equipamento e, conforme discutido no item 2.9.9, segue o embasamento teórico fundamentado na metodologia e diretrizes preconizadas no GUM (JCGM, 2008).

Salienta-se que o desenvolvimento que se segue é baseado em dados coletados em um único ponto de medição. Em outras palavras, apenas uma coordenada na medição da espessura da placa combustível será utilizada para a explanação do modelo matemático utilizado.

Deve-se considerar que em uma medição completa todos os pontos medidos na placa serão processados e analisados pelo algoritmo desenvolvido desta maneira, utilizando-se do mesmo rigor matemático que será apresentado a seguir.

Apenas para efeito quantitativo, menciona-se que na medição de uma placa interna do elemento combustível fabricado para atender as especificações do Reator de Pesquisa IEA-R1, com o distanciamento entre pontos de 25 mm no eixo X e 25 mm no eixo Y, seriam obtidos 75 pontos de medição por placa, que equivaleriam, no caso da execução de 5 ciclos de repetições para cálculo da incerteza da medição, a um total de 375 dados a serem processados para a apresentação dos resultados.

4.3.1 Modelagem Matemática

Desenvolveu-se a modelagem do fenômeno da medição, com o objetivo de se expressar matematicamente a relação entre a saída Y (o resultado da

medida) e as grandezas de entrada X_i das quais Y possui uma relação funcional f , conforme Equação (01), rerepresentada a seguir:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (01)$$

No sistema de medição desenvolvido, a espessura da placa combustível é determinada por comparação com a espessura de um bloco padrão de referência previamente calibrado e de próxima ou igual espessura nominal. A saída direta da comparação entre a medida do bloco e da placa será a diferença de suas espessuras, ou seja:

$$E_{pla} = E_{pad} + \Delta E_{p-p} \quad (14)$$

Onde:

E_{pla} = Espessura da placa sob medição

E_{pad} = Espessura do bloco padrão de referência

ΔE_{p-p} = Diferença entre as espessuras da placa e do bloco padrão de referência

A partir da Equação (14), determinou-se a relação funcional entre o mensurando (espessura da placa) e as demais grandezas de entrada que pudessem contribuir com um componente de incerteza para o resultado da medição. Fundamentou-se esta análise nos seguintes pontos:

- Conhecimento de dados estruturais do equipamento;
- Informações sobre os padrões de calibração utilizados;
- Dados técnicos obtidos dos fabricantes de seus componentes;
- Testes realizados durante a manufatura e montagem do equipamento;
- Informações ambientais disponíveis sobre local de instalação e operação do equipamento.

Assim, estabeleceu-se o seguinte modelo matemático da medição:

$$E_{pla} = E_{pad} + \Delta E_{p-p} + \delta S_{sup} + \delta S_{inf} + \delta R_{ind} + \delta T_{ref} + \delta T_{p-p} + \delta F_{sup} + \delta F_{inf} + \delta P_{gui} + \delta A_{pla} + \delta A_{p-p} \quad (15)$$

Onde:

E_{pla} = Espessura da placa sob medição

E_{pad} = Espessura do bloco padrão de referência

ΔE_{p-p} = Diferença entre as espessuras da placa e do bloco padrão de referência

δS_{sup} = Correção devido ao erro máximo admissível do sensor superior

δS_{inf} = Correção devido ao erro máximo admissível do sensor inferior

δR_{ind} = Correção do efeito da resolução do módulo integrado de indicação

δT_{ref} = Correção do efeito do afastamento da temperatura de referência

δT_{p-p} = Correção do efeito do gradiente de temperatura entre o padrão e a placa

δF_{sup} = Correção do efeito da força de medição do sensor superior

δF_{inf} = Correção do efeito da força de medição do sensor inferior

δP_{gui} = Correção do desvio de paralelismo entre as guias do equipamento

δA_{pla} = Correção do desvio de alinhamento entre a placa e o movimento

δA_{p-p} = Correção do desvio de alinhamento entre a placa e o padrão de referência

4.3.2 Cálculo dos Resultados da Medição

Com referência à Equação (01), a rigor, o que se tem é uma estimativa do mensurando Y , que será designada por y , utilizando-se neste caso as estimativas de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ou seja:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (16)$$

Para explicitar este desenvolvimento, foram utilizados valores x_i reais, obtidos com o novo equipamento, nas medições de espessura efetuadas no ponto de coordenadas $X = 35,00$ mm e $Y = 112,50$ mm da placa combustível interna de número de série Si 1099, que foi fabricada no CECON-IPEN para compor um novo elemento combustível do Reator IEA-R1. Estes dados obtidos no novo equipamento são reproduzidos na Tabela 04.

Tabela 04 – Dados de medição da placa Si 1099

| Número da Medição | Valor (mm) |
|-------------------|------------|
| 1 | 1,524 |
| 2 | 1,523 |
| 3 | 1,524 |
| 4 | 1,524 |
| 5 | 1,524 |
| 6 | 1,524 |
| 7 | 1,523 |
| 8 | 1,524 |
| 9 | 1,527 |
| 10 | 1,527 |

Fonte: Autor da tese

A partir destes dados calculou-se o resultado da medição, isto é, a estimativa y do mensurando Y , a partir da relação funcional f , utilizando-se para as grandezas de entrada X_i as estimativas x_i obtidas.

Assume-se que a melhor estimativa disponível do valor esperado μ_y de uma grandeza y que varia aleatoriamente e para a qual foram realizadas n observações independentes y_i sob as mesmas condições de repetibilidade é a média aritmética \bar{y} das n observações, ou seja:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 1,524 \text{ mm} \quad (17)$$

4.3.3 Avaliação das Incertezas Padrão

Para cada estimativa de entrada x_i deve-se associar uma incerteza-padrão $u(x_i)$, que é obtida de uma distribuição de valores possíveis da grandeza de entrada X_i .

Essa distribuição de probabilidade pode ser baseada na frequência, isto é, em uma série de observações X_{ik} de X_i , denominada avaliação do Tipo A, ou pode ser uma distribuição de frequência assumida a priori, denominada avaliação do Tipo B. Observa-se que nos dois casos as distribuições utilizadas refletem o atual estágio de conhecimento do fenômeno da medição (JCGM, 2008).

Avaliação do Tipo A da incerteza-padrão

A avaliação do Tipo A da incerteza-padrão é inerente ao processo de medição e é realizada por meio de tratamento estatístico do conjunto de repetições das medições da grandeza de entrada sob condições de repetitividade (INMETRO, 2008). Assim, a variância experimental das observações, que estima a variância σ^2 da distribuição de probabilidade de x , é:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (18)$$

E a melhor estimativa da variância experimental da média $s^2(\bar{x})$, que quantifica o quão bem \bar{x} estima a esperança μ_x de x , é:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (19)$$

Assim, a avaliação do Tipo A da incerteza padrão será o desvio padrão experimental da média dos valores apresentados (Equação 02), ou seja:

$$u_{x1} = u_A(\Delta E_{p-p}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{1,43 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{10}} = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (20)$$

Avaliações do Tipo B da incerteza-padrão

Quando a avaliação da incerteza da fonte de entrada é realizada por um meio diferente do estatístico, a avaliação da incerteza-padrão é denominada do tipo B.

Esta avaliação é desenvolvida por julgamento científico, baseando-se em informações disponíveis sobre a possível variabilidade de x_i , que podem incluir:

dados de medições prévias, experiência ou conhecimentos gerais do comportamento e das propriedades de materiais e instrumentos, especificações de fabricantes, dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados e às incertezas atribuídas à dados de referência extraídos de manuais (JCGM, 2008).

Uma das estimativas da incerteza-padrão Tipo B, $u(x_i)$, é realizada quando os valores de (x_i) têm uma determinada distribuição assumida¹⁰ e um intervalo de dispersão. As distribuições normalmente trabalhadas na metodologia são a retangular, a triangular, a tipo “U”, a Normal etc. (INMETRO, 2008).

Avaliação da incerteza-padrão associada ao valor da espessura do bloco padrão:

Com base nos dados existentes no certificado de calibração¹¹ previamente realizada no padrão, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

A incerteza expandida informada dos resultados da calibração do bloco padrão de referência foi de $\pm 0,12 \mu\text{m}$, sendo esta incerteza declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k=2,0$, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%, assim:

$$u_{x2} = u_B(E_{pad}) = \frac{U(E_{pad})}{k} = \frac{1,20 \cdot 10^{-4}}{2} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ mm} \quad (21)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao erro máximo admissível dos sensores:

Com base nas especificações técnicas constantes nas documentações fornecidas pelo fabricante, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

No manual dos sensores consta que o erro máximo admissível declarado pelo fabricante é de $2 \mu\text{m}$ dentro da faixa de medição, neste caso, igual a 10 mm .

¹⁰ Novamente salienta-se que as distribuições assumidas a priori são modelos utilizados para representar o estágio atual do conhecimento sobre o fenômeno da medição.

¹¹ Certificado de calibração emitido por laboratório acreditado pelo INMETRO e pertencente à Rede Brasileira de Calibração.

Por não existirem informações adicionais disponíveis a respeito deste erro, assumiu-se que o valor informado se refere à probabilidade de $\pm 2\sigma$ ou aproximadamente 95%, assim:

$$u_{x3.4} = u_B (S_{sen}) = \frac{(S_{sen})}{\sigma} = \frac{(2,00 \cdot 10^{-3})}{2} = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (22)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao efeito da resolução fornecido pelo módulo integrado de indicação e comunicação dos sensores:

Com base nas especificações técnicas constantes nas documentações fornecidas pelo fabricante, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

No manual do módulo integrado de indicação e comunicação consta que o erro de quantização declarado pelo fabricante é de ± 1 dígito significativo, que no nosso caso é equivalente a $1 \mu\text{m}$.

Por não existirem informações adicionais disponíveis a respeito deste erro, assumiu-se que o valor informado se refere à probabilidade de $\pm 2\sigma$ ou aproximadamente 95%, assim:

$$u_{x5} = u_B (R_{ind}) = \frac{(R_{ind})}{2} = \frac{1,00 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,00 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (23)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao efeito do afastamento da temperatura de referência laboratorial:

Com base nas medições de temperatura realizadas no laboratório onde o equipamento se encontra instalado, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

Detectou-se durante os ensaios o afastamento máximo⁷ de $\pm 1,5^\circ\text{C}$ no período da realização de uma medição.

Por não existirem informações disponíveis da grandeza de entrada δT_{ref} sobre possíveis valores de x_i dentro do intervalo, assumiu-se uma distribuição de probabilidade a priori retangular e simétrica, assim:

$$u_{x6} = u_B (T_{ref}) = \frac{(T_{ref})}{\sqrt{3}} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 8,66 * 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (24)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao efeito do gradiente da temperatura na placa e no padrão:

Com base nas medições realizadas no laboratório onde o equipamento se encontra instalado, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

Detectou-se durante os ensaios o gradiente máximo¹² de 3°C no período da realização de uma medição.

Por não existirem informações disponíveis da grandeza de entrada δT_{p-p} sobre possíveis valores de x_i dentro do intervalo, assumiu-se uma distribuição de probabilidade a priori retangular e simétrica, assim:

$$u_{x7} = u_B (T_{p-p}) = \frac{(T_{p-p})}{\sqrt{3}} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1,73 * 10^{+0} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (25)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao efeito da força de medição dos sensores:

Com base nas especificações técnicas constantes nas documentações fornecidas pelo fabricante, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

No manual dos sensores consta que a máxima força de medição exercida durante a medição na posição vertical é de 0,8 N, ou 81,58 gf, podendo este valor variar de acordo com a posição de instalação do sensor.

Por se tratar de uma força de medição, com a maior probabilidade de sua ocorrência próximo aos valores limites especificados, assumiu-se para esta grandeza de entrada δF_{sen} uma distribuição de probabilidade em “U”, assim:

¹² Novas medições de controle da temperatura serão realizadas no laboratório do CECON, cujas condições ambientais poderão reduzir o afastamento da temperatura de referência e os gradientes gerados durante a medição.

$$u_{x8.9} = u_B (F_{sen}) = \frac{(F_{sen})}{\sqrt{2}} = \frac{8,16 \cdot 10^{+1}}{\sqrt{2}} = 5,77 * 10^{+1} \quad (26)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao desvio de paralelismo entre as guias do equipamento:

Conforme descrito em 4.2.6, com base nas medições realizadas no equipamento durante a sua fase de montagem e ajustes, foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

Percebeu-se que o máximo valor obtido no desvio de paralelismo entre as duas guias lineares do eixo Y foi de 0,05 mm. Considerando-se que distância entre as guias é de 170 mm, este desvio pode ser expresso como sendo aproximadamente $2,94 \cdot 10^{-4}$ radianos.

Por se tratar de um desvio angular, frequentemente identificado na metrologia dimensional como uma fonte de erro de cosseno, que se caracteriza pela ocorrência em apenas um dos lados do intervalo, assumiu-se para esta grandeza de entrada δP_{gui} uma distribuição de probabilidade em “U” (LINK, 2000), assim:

$$u_{x10} = u_B (P_{gui}) = \frac{(P_{gui})}{\sqrt{2}} = \frac{(2,94 \cdot 10^{-4})/2}{\sqrt{2}} = 1,04 * 10^{-4} \text{ rad} \quad (27)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao desvio de alinhamento entre a placa e o movimento dos eixos do equipamento:

Com base em medições realizadas para a verificação do alinhamento entre o deslocamento dos eixos da máquina e as superfícies das placas (item 4.2.6), foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

Percebeu-se que o máximo valor obtido no desvio de alinhamento entre a superfície da placa sob medição e o movimento do equipamento foi de 0,15 mm em uma distância de 140 mm, o que equivale a um desvio angular de aproximadamente $1,07 \cdot 10^{-3}$ radianos.

Observou-se também que os valores obtidos não resultavam somente do alinhamento entre o movimento e as faces de apoio dos elementos

posicionadores da placa, mas, também eram influenciados por desvios de planeza da placa e por eventuais flexões⁸ ocasionadas pela ação da força da gravidade.

Por se tratar de um desvio angular, frequentemente identificado na metrologia dimensional como uma fonte de erro de cosseno, que se caracteriza pela ocorrência em apenas um dos lados do intervalo, assumiu-se para esta grandeza de entrada δA_{pla} uma distribuição de probabilidade em “U” (LINK, 2000), assim:

$$u_{x11} = u_B (A_{pla}) = \frac{(A_{pla})}{\sqrt{2}} = \frac{(1,07*10^{-3})/2}{\sqrt{2}} = 3,79 * 10^{-4} rad \quad (28)$$

Avaliação da incerteza-padrão associada ao desvio de alinhamento entre a placa e o padrão:

Com base em medições realizadas para a verificação do alinhamento entre os eixos da superfície da placa e da superfície do padrão (item 4.2.6), foram avaliados os efeitos desta fonte de incerteza.

Observou-se que os valores obtidos não resultavam somente do alinhamento entre os eixos das faces de apoio dos elementos posicionadores da placa e do padrão, mas, também eram influenciados por desvios de planeza da placa e por eventuais flexões¹³ ocasionadas na placa pela ação da força da gravidade.

Detectou-se que o máximo valor obtido no desvio de alinhamento entre o eixo da superfície da placa sob medição e o da superfície do padrão foi de 0,05 mm em uma distância de 25 mm, o que equivale a um desvio angular de aproximadamente $2,00*10^{-3}$ radianos.

¹³ Novamente salienta-se que, para se evitar ao máximo a flecha provocada pelo próprio peso durante a sua medição, as placas são locadas nos seus respectivos pontos de Bessel (NIJSSE, 2001), por meio do correto o posicionamento dos elementos de apoio.

Por se tratar de um desvio angular, frequentemente identificado na metrologia dimensional como uma fonte de erro de cosseno, que se caracteriza pela ocorrência em apenas um dos lados do intervalo, assumiu-se para esta grandeza de entrada δA_{p-p} uma distribuição de probabilidade em “U” (LINK, 2000), assim:

$$u_{x12} = u_B (A_{p-p}) = \frac{(A_{p-p})}{\sqrt{2}} = \frac{(2,00 \cdot 10^{-3})/2}{\sqrt{2}} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \quad (29)$$

4.3.4 Determinação dos Coeficientes de Sensibilidade

Em seguida, determinaram-se os coeficientes de sensibilidade c_i (Equação 09), que são traduzidos como as derivadas parciais $\partial f / (\partial x_i)$, e que descrevem como a estimativa de saída Y varia com alterações nos valores das grandezas de entrada X_i (Equação 15).

Assim, os seguintes coeficientes de sensibilidade são provenientes das derivadas parciais de cada uma das grandezas de entrada da seguinte forma:

Coeficiente de sensibilidade associado à diferença entre as espessuras da placa e do padrão:

$$c_1 = c_{(\Delta E_{p-p})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\Delta E_{p-p}} = 1 \quad (30)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao valor da espessura do bloco padrão:

$$c_2 = c_{(E_{pad})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial E_{pad}} = 1 \quad (31)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao erro máximo admissível dos sensores:

$$c_{3.4} = c_{(\delta S_{sen})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{(S_{sen})} = 1 \quad (32)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao efeito da resolução fornecido pelo módulo integrado de indicação e comunicação dos sensores:

$$c_5 = c_{(\delta R_{ind})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{(R_{ind})} = 1 \quad (33)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao efeito do afastamento da temperatura de referência laboratorial:

O efeito do afastamento da temperatura do laboratório durante a medição, com relação a temperatura de referência laboratorial (ISO, 2022) de 20°C, é dado pelo produto entre a distância de fixação dos sensores e a placa, no nosso caso igual a 40,6 mm; o afastamento da temperatura ocorrido no período e a diferença entre os coeficientes de dilatação linear dos materiais dos sensores (aço inoxidável) e do arco de medição (alumínio) do equipamento, ou seja:

$$\Delta L = L_{sen} * 2 * \Delta T_{ref} * \Delta \alpha_{mat} \quad (34)$$

Assim:

$$c_6 = c_{(\partial T_{ref})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial T_{ref}} = (L_{sen} * 2 * \Delta \alpha_{mat}) = [40,6 * 2 * (23,5 - 19,0) * 10^{-6}]$$

$$c_6 = c_{(\partial T_{ref})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial T_{ref}} = 3,65 * 10^{-4} \frac{mm}{^{\circ}C} \quad (35)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao efeito do gradiente da temperatura na placa e no padrão:

O efeito do gradiente da temperatura na placa e no padrão é dado pelo produto entre a espessura da placa / padrão, o gradiente da temperatura ocorrido no período e o coeficiente de dilatação linear do material da placa / padrão, ou seja:

$$\Delta L = E_{p-p} * \Delta T_{p-p} * \alpha_{mat} \quad (36)$$

Assim:

$$c_7 = c_{(\partial T_{p-p})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial T_{p-p}} = (E_{p-p} * \alpha_{mat}) = (1,5 * 23,5 * 10^{-6})$$

$$c_7 = c_{(\partial T_{p-p})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial T_{p-p}} = 3,53 * 10^{-5} \frac{mm}{^{\circ}C} \quad (37)$$

Coeficiente da sensibilidade associado ao efeito da força de medição dos sensores:

O efeito da variação da força de medição nos sensores pode ser calculado conforme a fórmula desenvolvida por Puttock e Thwaite¹⁴ (1969), onde, para a determinação da deformação ocorrida devido a força de compressão da esfera de contato do sensor sobre a superfície da placa são considerados:

$$\Delta L = \frac{(3\pi)^{\frac{2}{3}}}{2} * F_{sen}^{\frac{2}{3}} * (V_1 + V_2)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

Onde:

$\Delta L =$ Deformação ocorrida

$F_{sen} =$ Força de medição do sensor = 0,8 N = 81,58 gf

$d =$ Diâmetro da esfera de contato do sensor = 3 mm

$V = (1 - \sigma^2)/\pi * \epsilon$

$\sigma_1 =$ Coeficiente de Poisson do alumínio = 0,33

$\sigma_2 =$ Coeficiente de Poisson do carboneto de tungstênio = 0,28

$E_1 =$ Módulo de elasticidade do alumínio = 69,0 GPa = 7.036.042 gf/mm²

¹⁴ Puttock e Thwaite salientam que no desenvolvimento matemático de seu trabalho são considerados apenas os efeitos de compressão Hertziana, assumindo-se que as superfícies em contato são perfeitamente lisas e que, portanto, não existam forças friccionais nas áreas de contato, assume-se também que os materiais em contato são homogêneos e que os seus limites elásticos não são excedidos durante a ação das forças.

$E_2 = \text{Módulo de elasticidade do carboneto de tungstênio} = 619,5 \text{ GPa} = 63.171.419 \text{ gf/mm}^2$

Substituindo-se os valores, podemos reduzir a Equação (38) para:

$$\Delta L = F_{sen}^{\frac{2}{3}} * 1,95573 * 10^{-5} \quad (39)$$

Assim:

$$c_{8.9} = c_{(\partial F_{sen})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial F_{sen}} = \left(\frac{1,95573 * 10^{-5}}{F_{sen}^{\frac{1}{3}}} \right) = \left[\frac{1,95573 * 10^{-5}}{(81,58)^{\frac{1}{3}}} \right]$$

$$c_{8.9} = c_{(\partial F_{sen})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial F_{sen}} = 4,51 * 10^{-6} \frac{mm}{gf} \quad (40)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao desvio de paralelismo entre as guias do equipamento:

O efeito do desvio de paralelismo entre as guias do equipamento é dado pela diferença entre o valor da espessura da placa e o valor da espessura da placa medida com uma inclinação θ_{gui} , ou seja:

$$\Delta L = E_{pla} * (1 - \cos \theta_{gui}) \quad (41)$$

Assim:

$$c_{10} = c_{(P_{gui})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial P_{gui}} = (E_{pla} * \text{sen } \theta_{gui}) = 1,5 * \text{sen}(2,94 * 10^{-4})$$

$$c_{10} = c_{(P_{gui})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial P_{gui}} = 4,41 * 10^{-4} \frac{mm}{rad} \quad (42)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao desvio de alinhamento entre a placa e o movimento dos eixos do equipamento:

O efeito do desvio de alinhamento entre a placa e o movimento dos eixos do equipamento é dado pela diferença entre o valor da espessura da placa e o valor da espessura da placa medida com a inclinação θ_{pla} , provocada pelo desvio de alinhamento entre a placa e o movimento dos eixos do equipamento, ou seja:

$$\Delta L = E_{pla} * (1 - \cos \theta_{pla}) \quad (43)$$

Assim:

$$c_{11} = c_{(A_{pla})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial A_{pla}} = (E_{pla} * \text{sen } \theta_{pla}) = 1,5 * \text{sen}(1,07 * 10^{-3})$$

$$c_{11} = c_{(A_{pla})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial A_{pla}} = 1,61 * 10^{-3} \frac{mm}{rad} \quad (44)$$

Coeficiente de sensibilidade associado ao desvio de alinhamento entre a placa o padrão:

O efeito do desvio de alinhamento entre os eixos da placa e do padrão é dado pela diferença entre o valor da espessura da placa e o valor da espessura da placa medida com a inclinação θ_{p-p} , provocada pelo desvio de alinhamento entre os eixos da placa e do padrão, ou seja:

$$\Delta L = E_{pla} * (1 - \cos \theta_{p-p}) \quad (45)$$

Assim:

$$c_{12} = c_{(A_{p-p})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial A_{p-p}} = (E_{pad} * \text{sen } \theta_{p-p}) = 1,5 * \text{sen}(2,00 * 10^{-3})$$

$$c_{12} = c_{(A_{p-p})} \equiv \frac{\partial E_{pla}}{\partial A_{p-p}} = 3,00 * 10^{-3} \frac{mm}{rad} \quad (46)$$

4.3.5 Avaliação das Contribuições de Incerteza

Os produtos entre os valores das incertezas padrão $u(x_i)$ avaliados anteriormente e seus respectivos coeficientes de sensibilidade, c_i , dão origem à chamada contribuição de incerteza, $u_i(y)$, que corresponde a uma medida de dispersão equivalente a um desvio padrão, com a mesma unidade de medida do mensurando, conforme Equação (09), rerepresentada a seguir:

$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad u_i(y) \equiv |c_i| * u(x_i) \quad (09)$$

Assim, na Tabela 05 apresentam-se as contribuições de incerteza das grandezas de entrada avaliadas:

Tabela 05 - Avaliação das contribuições de incerteza

| Grandeza de Entrada x_i | Incerteza Padronizada $u(x_i)$ | Coefficiente de Sensibilidade $ c_i $ | Contribuição de Incerteza (mm) $u_i(y)$ |
|------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| ΔE_{p-p} | $4,52 * 10^{-04}$ | 1 | 0,00045 |
| E_{pad} | $6,00 * 10^{-05}$ | 1 | 0,00006 |
| δS_{sup} | $1,00 * 10^{-03}$ | 1 | 0,00100 |
| δS_{inf} | $1,00 * 10^{-03}$ | 1 | 0,00100 |
| δR_{ind} | $5,00 * 10^{-04}$ | 1 | 0,00050 |
| δT_{ref} | $8,66 * 10^{-01}$ | $3,65 * 10^{-04}$ | 0,00032 |
| δT_{p-p} | $1,73 * 10^{+00}$ | $3,53 * 10^{-05}$ | 0,00006 |
| δF_{sup} | $5,77 * 10^{+01}$ | $4,51 * 10^{-06}$ | 0,00026 |
| δF_{inf} | $5,77 * 10^{+01}$ | $4,51 * 10^{-06}$ | 0,00026 |
| δP_{gui} | $1,04 * 10^{-04}$ | $4,41 * 10^{-04}$ | 0,00000 |
| δA_{pla} | $3,79 * 10^{-04}$ | $1,61 * 10^{-03}$ | 0,00000 |
| δA_{p-p} | $7,07 * 10^{-04}$ | $3,00 * 10^{-03}$ | 0,00000 |

Fonte: Autor da tese

Por meio dos resultados obtidos, pode-se verificar que as grandezas de entrada associadas ao desvio de paralelismo entre as guias do equipamento (P_{gui}), ao desvio de alinhamento entre a placa e o movimento (A_{pla}) e ao desvio de alinhamento entre a placa e o padrão (A_{p-p}); não apresentaram contribuições de incerteza de magnitude significativa em relação às demais.

Entretanto, somente para efeitos dedutivos, optou-se por mantê-las no desenvolvimento do algoritmo de tratamento e modelagem dos dados, bom como na definição do modelo matemático final para a execução do cálculo de incerteza dos resultados de medições.

4.3.6 Avaliação das Covariâncias Associadas

Em seguida avaliou-se a existência de covariâncias associadas entre as estimativas de entrada e concluiu-se que não existe correlação significativa entre elas, ou seja, é possível considerá-las independentes entre si e, portanto, a expressão apropriada para a variância combinada $u_c^2(y)$ associada com o resultado da uma medição será a Equação (06), reapresentada a seguir:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (06)$$

4.3.7 Determinação da Incerteza Padrão Combinada

Efetou-se então a combinação das contribuições de incerteza:

$$u_c(y) = u_c(E_{pla}) =$$

$$= \sqrt{(0,00045^2 + 0,00006^2 + 0,00100^2 + 0,00100^2 + 0,00050^2 + 0,00032^2 + 0,00006^2 + 0,00026^2 + 0,00026^2 + 0,000000^2 + 0,00000^2 + 0,00000^2)}$$

$$u_c(E_{pla}) = 0,00164mm \quad (47)$$

4.3.8 Cálculo da Incerteza Expandida

A seguir, desenvolveu-se o cálculo do valor dos graus de liberdade efetivos ν_{eff} , baseado nos graus de liberdade ν_i das contribuições individuais de incerteza $u_i(y)$, utilizando-se a Equação (11) de Welch-Satterthwaite, reapresentada a seguir:

$$\frac{u_c^4(y)}{\nu_{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i} \quad (11)$$

Que pode ser reescrita como:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{0,00164^4}{\frac{0,00045^4}{9}} = 1.567 \quad (48)$$

Assim, obtidos os graus de liberdade efetivos ν_{eff} da incerteza-padrão combinada $u_c(E_{pla})$, determinou-se o valor do fator de abrangência k a partir da distribuição t de Student assumindo-se uma probabilidade de abrangência p , de 95%, assim:

$$k_p = t_p(\nu_{eff})$$

$$k_{95} = t_{95}(1.567) = 2,0 \quad (49)$$

A metodologia defendida pelo GUM sustenta que, pela extensão e confiabilidade da informação disponível, raramente é justificável processar um grande volume de dados que é requerido para combinar distribuições de probabilidade, sendo aceitável usar uma aproximação para a distribuição da grandeza de saída.

Assim, considerando-se o Teorema do Limite Central, geralmente é suficiente assumir que a distribuição da probabilidade $(y-Y)/u_c(y)$ é a distribuição- t e tomar $k_p = t_p(\nu_{eff})$, com o fator- t baseado no número de graus de liberdade efetivo obtido pela equação de Welch-Satterthwaite (JCGM, 2008).

Portanto, obteve-se a incerteza expandida:

$$U_p = u_c(y) * k_p$$

$$U_{95}(E_{pla}) = u_c(E_{pla}) * k_{95}$$

$$U_{95}(E_{pla}) = 0,00164 * 2,0 \cong 0,003mm \quad (50)$$

4.3.9 Relato do Resultado da Medição

Por fim, foi possível declarar o resultado da medição do ponto medido, como sendo:

$$(1,524 \pm 0,003)mm \quad (51)$$

Nota adicional ao resultado:

A incerteza de medição relatada foi declarada como a incerteza expandida, isto é, a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 1.567$ graus de liberdade efetivos, corresponde a uma probabilidade de abrangência p de aproximadamente 95%.

4.4 Realização das Medições

Finalizados os testes funcionais descritos em 4.2.8 e definidas as formas de tratamento de dados apresentados em 4.3, iniciou-se uma série de medições dentro das condições laboratoriais, com o objetivo de se obter a comprovação da confiabilidade metrológica do equipamento.

Durantes a realização das medições, foram avaliadas a estabilidade, a deriva e a tendência instrumental do sistema, e analisada sistematicamente a incerteza obtida nos resultados, mediante a aplicação do modelo matemático apresentado em 4.3.1.

4.4.1 Descrição da Medição

Para as medições de espessura e com objetivo da validação do novo sistema de medição, foram disponibilizadas pelo CECON duas placas de códigos de fabricação Si 1097 e Si 1099, fabricadas para compor os elementos combustíveis aplicados no reator nuclear de pesquisa IEA-R1, e outras duas placas de códigos de fabricação IPMB 007 e IPMB 010, fabricadas para compor os elementos combustíveis aplicados no reator nuclear de pesquisa IPEN/MB-01.

Em complemento às informações fornecidas em 4.2.5, seguem alguns conceitos sobre os termos que serão utilizados, a partir deste ponto, no desenvolvimento deste texto.

Cada placa combustível pode ser medida em vários pontos, que são localizados segundo a definição de suas coordenadas no plano da placa, sendo a soma destes pontos denominada como o número de pontos medidos (N_p).

Este número de pontos medidos será resultado de uma matriz de medição a ser adotada no plano X e Y do sistema, sendo esta matriz composta por um número de colunas (N_X) identificadas por suas coordenadas no eixo X (na largura da placa) e por um número de linhas (N_Y) identificadas por suas coordenadas no eixo Y (no comprimento da placa).

Quando todos os pontos de medição determinados pela matriz forem medidos completa-se um ciclo de medição e, para que seja realizável o desenvolvimento de uma análise estatística dos dados coletados, é necessário executar repetições destes ciclos, sendo que o número destas repetições (N_c) irá determinar o tamanho da amostra (amostragem) que será obtido em cada um dos pontos medidos.

A realização de todos os ciclos de medição pré-definidos permitirá o desenvolvimento dos cálculos para apresentação dos resultados de espessura da placa e caracterizará uma série completa de medição com N_d dados coletados.

Em resumo:

$$N_X * N_Y = N_p \quad (52)$$

$$N_p * N_c = N_d \quad (53)$$

N_X = Número de colunas

N_Y = Número de linhas

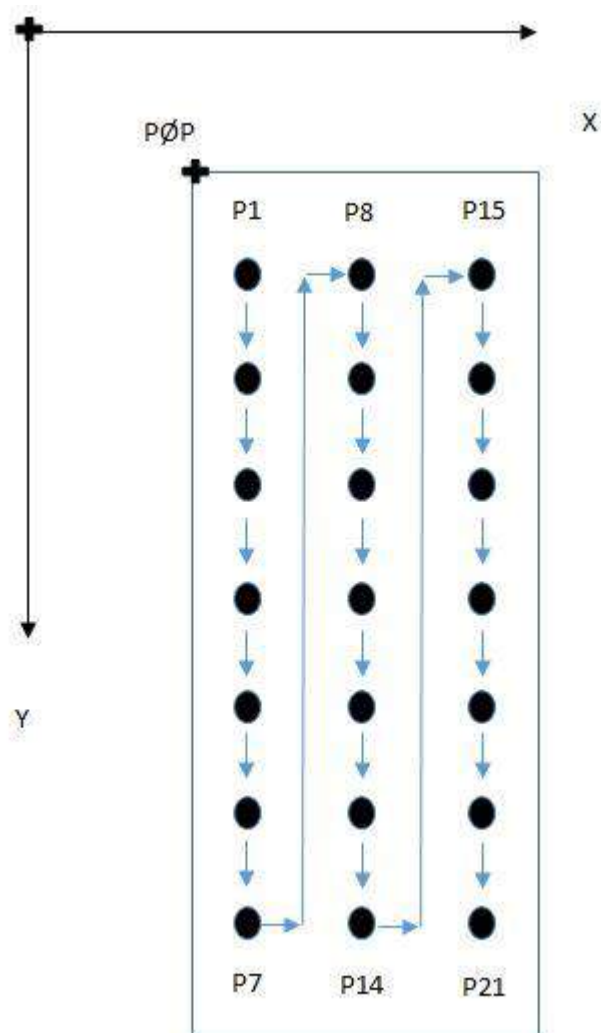
N_p = Número de pontos medidos

N_c = Número de ciclos completos

N_d = Número de dados coletados

Exemplifica-se na Figura 40 uma sequência de medição de uma matriz de 3 colunas por 7 linhas (3 x 7), que soma o total de 21 pontos medidos por ciclo.

Figura 40 – Sequência de medição em uma matriz 3 x 7 com 21 pontos



Onde:

PØP = Ponto zero peça

P1 = Primeiro ponto de medição

P21 = Último ponto de medição

→ = Sequência da medição

4.4.2 Medições de Espessura

As primeiras medições realizadas tiveram por objetivo observar a performance do equipamento e avaliar os resultados obtidos em cada uma das quatro placas disponibilizadas. Com a finalidade de proporcionar futuros parâmetros de análises e comparações, optou-se neste primeiro estudo por realizar a coleta dos dados nas mesmas posições determinadas pelos procedimentos que norteiam as medições manuais realizada com micrômetros.

As respostas oriundas dos dados coletados nas medições e fornecidas pelo sistema de análise matemática, e o perfeito funcionamento do equipamento, assentiram o desenvolvimento de dois estudos complementares, criando-se assim, subsídios para a elaboração de procedimentos de trabalho baseados na utilização do novo equipamento.

Deste modo, um segundo estudo foi realizado com o objetivo de determinar qual seria o efeito do tamanho da amostra no resultado das medições. Procurou-se então, determinar o número mais indicado de ciclos de repetições a serem realizadas, para composição de uma amostragem representativa dos resultados. Para o desenvolvimento deste estudo, selecionou-se aleatoriamente a placa de código de fabricação Si 1099.

Um terceiro estudo foi realizado, e teve como objetivo avaliar qual seria o efeito do número de pontos medidos na avaliação da espessura das placas. Buscou-se assim, definir o número mais indicado de pontos a serem medidos, para a obtenção de resultados que melhor representassem a variação da espessura das placas medidas. Para a realização deste estudo designou-se, também de forma aleatória, a placa de código de fabricação Si 1097.

Considerando-se o primeiro estudo, com medições realizadas nas das quatro placas disponibilizadas, e a consecução dos outros dois estudos complementares, obteve-se um total realizado de 26 séries completas de medição, onde foram executados 244 ciclos de medição e obtidos 5.484 dados coletados para tratamento e análise.

Na Tabela 06 são apresentadas as séries de medições realizadas, com a identificação em cada uma do número de série placa medida, o número de pontos medidos (N_p) por ciclo, o número de ciclos realizados (N_c) e o número de dados coletados (N_d).

Tabela 06 – Séries de medições de espessura realizadas

| Placa Combustível | Nº Pontos Medidos por Ciclo (N_p) | Nº Ciclos Realizados (Amostragem – N_c) | Nº de Dados Coletados (N_d) |
|-------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| Si 1097 | 21 | 5 | 105 |
| Si 1099 | 21 | 5 | 105 |
| IPMB 007 | 21 | 5 | 105 |
| IPMB 010 | 21 | 5 | 105 |
| Si 1099 | 21 | 2 | 42 |
| Si 1099 | 21 | 3 | 63 |
| Si 1099 | 21 | 4 | 84 |
| Si 1099 | 21 | 5 | 105 |
| Si 1099 | 21 | 6 | 126 |
| Si 1099 | 21 | 7 | 147 |
| Si 1099 | 21 | 8 | 168 |
| Si 1099 | 21 | 9 | 189 |
| Si 1099 | 21 | 10 | 210 |
| Si 1099 | 21 | 11 | 231 |
| Si 1099 | 21 | 12 | 252 |
| Si 1099 | 21 | 13 | 273 |
| Si 1099 | 21 | 14 | 294 |
| Si 1099 | 21 | 15 | 315 |
| Si 1099 | 21 | 16 | 336 |
| Si 1099 | 21 | 17 | 357 |
| Si 1099 | 21 | 18 | 378 |
| Si 1099 | 21 | 19 | 399 |
| Si 1099 | 21 | 20 | 420 |
| Si 1097 | 21 | 5 | 105 |
| Si 1097 | 39 | 5 | 195 |
| Si 1097 | 75 | 5 | 375 |
| Total | | 244 | 5.484 |

Fonte: Autor da tese

4.4.3 Medições de Largura e Comprimento

Conforme discutido no item 4.2.3, com o objetivo de impedir a ocorrência de folgas mecânicas na transmissão do movimento, que poderiam comprometer a transdução dos sinais de deslocamento, descartou-se a utilização dos sinais de deslocamento obtidos diretamente dos motores de acionamento, optando-se, assim, pela utilização de transdutores de deslocamento linear.

Ao se optar por esta solução, criaram-se possibilidades para o desenvolvimento de novos estudos, envolvendo a utilização dos sinais destes transdutores lineares para a medição das dimensões de largura e comprimento das placas, uma vez que o projeto estrutural do equipamento foi desenvolvido para permitir tal funcionalidade.

Uma das alternativas estudadas para execução destas medições foi a utilização do conjunto sensor de detecção de bordas de superfícies, inicialmente previsto para o referenciamento posicional das placas combustíveis.

Diante desta possibilidade, realizaram-se testes de medição da largura e comprimento das placas, com a utilização do sensor amplificador BF4R, juntamente com o cabo de fibra óptica FT-320-05R (AUTONICS CORPORATION, 2020a). (AUTONICS CORPORATION, 2020b), apresentados em 4.2.3.

Detectou-se, porém, nos testes realizados, que as características de sensibilidade, velocidade de resposta e limiar de mobilidade deste conjunto sensor, embora apropriado para a realização do referenciamento das placas, não atingiam os valores necessários para a sua aplicação na medição da largura e comprimento.

Em outras palavras, o conjunto sensor de tangência utilizado para a criação do sistema de coordenadas das placas sob medição, embora adequado para execução desta função, não possuía precisão de repetibilidade necessária para a medição de comprimento e largura, se considerados os intervalos de especificação (tolerâncias) de projeto das placas combustíveis.

Deste modo, diante dos resultados obtidos, optou-se por implementar em uma próxima etapa as funções de medição de largura e comprimento das placas no equipamento. Nas conclusões deste trabalho será apresentada uma proposta para a integração destas funcionalidades, como uma sugestão de possível estudo para continuidade deste tema.

5 RESULTADOS

As medições realizadas forneceram dados que permitiram realizar a verificação da confiabilidade metrológica do sistema de medição, onde foram analisadas as características construtivas e metrológicas do equipamento, como a sua rigidez, sensibilidade, estabilidade, tendência e deriva, e analisados alguns detalhes da montagem, como os sistemas de referência, graus de liberdade, pontos de contato, sistema de fixação da placa e possíveis erros relacionados, como os de paralaxe, de Abbe e desvios angulares. Além destes, também foram consideradas as respostas do sistema às alterações de parâmetros do processo da medição e às variações ambientais ocorridas no laboratório.

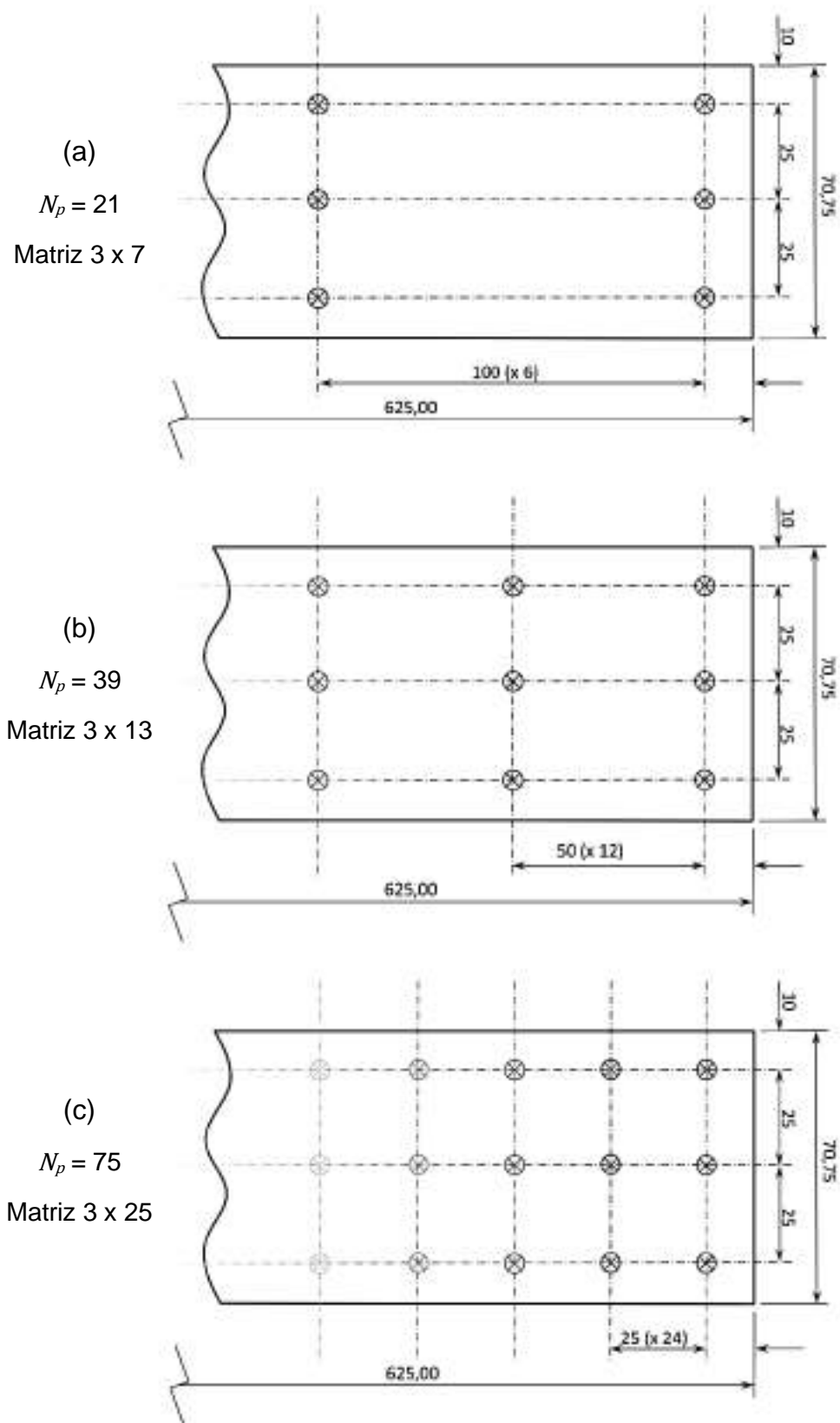
5.1 Resultados das Medições

No primeiro estudo desenvolvido, com o objetivo de observar a performance do equipamento e avaliar os resultados obtidos, cada uma das placas disponibilizadas foi medida em 21 pontos, formando uma matriz de 3 x 7 (Figura 41a) com espaçamentos entre os pontos de 25 mm na largura (eixo X) e 100 mm no comprimento (eixo Y). Foram realizados 5 ciclos de medição em cada placa, obtendo-se assim, 5 amostras de dados para cada um dos 21 pontos medidos, totalizando-se 420 dados coletados.

No segundo estudo, para estudar o efeito da amostragem no resultado das medições, a placa de código de fabricação Si 1099 foi medida em 21 pontos, formando uma matriz 3 x 7 (Figura 41a) com espaçamentos entre os pontos de 25 mm na largura (eixo X) e 100 mm no comprimento (eixo Y). Foram realizadas 19 séries de medição, variando-se o número de ciclos de medição (repetições realizadas) de cada série de 2 até 20, totalizando-se 4.389 dados coletados.

No terceiro estudo, sobre o efeito do número de pontos na avaliação da conformidade das placas, a placa de código de fabricação Si 1097 foi medida, na primeira série, em com 21 pontos por ciclo, em uma matriz 3 x 7 (Figura 41a), na segunda série foram medidos 39 pontos por ciclo, em uma matriz 3 x 13 (Figura 41b) e na terceira série foram medidos 75 pontos por ciclo em uma matriz de 3 x 25 (Figura 41c). Foram realizados, 5 ciclos de medição em cada uma das 3 séries realizadas, totalizando-se 420 dados coletados.

Figura 41 – Matrizes de medição da placa Si 1097 com 21 / 39 / 75 pontos



Fonte: Autor da tese

Os resultados de todas as medições são apresentados na Tabela 07

Tabela 07 – Resultados das séries de medições de espessura

| ID Placa Combustível | Pontos Medidos Por Ciclo | Ciclos Realizados (Amostragem) | Espessura da Placa (mm) | | | Incerteza de Medição (mm) |
|----------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------|--------|---------------------------|
| | | | Mínima | Média | Máxima | |
| Si 1097 | 21 | 5 | 1,470 | 1,484 | 1,498 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 5 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| IPMB 007 | 21 | 5 | 1,355 | 1,362 | 1,366 | ± 0,003 |
| IPMB 010 | 21 | 5 | 1,349 | 1,358 | 1,368 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 2 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,004 |
| Si 1099 | 21 | 3 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 4 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 5 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 6 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 7 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 8 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 9 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 10 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 11 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 12 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 13 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 14 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 15 | 1,498 | 1,533 | 1,551 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 16 | 1,498 | 1,533 | 1,552 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 17 | 1,498 | 1,533 | 1,552 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 18 | 1,498 | 1,533 | 1,552 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 19 | 1,498 | 1,533 | 1,552 | ± 0,003 |
| Si 1099 | 21 | 20 | 1,498 | 1,533 | 1,552 | ± 0,003 |
| Si 1097 | 21 | 5 | 1,470 | 1,484 | 1,498 | ± 0,003 |
| Si 1097 | 39 | 5 | 1,470 | 1,486 | 1,498 | ± 0,003 |
| Si 1097 | 75 | 5 | 1,470 | 1,487 | 1,498 | ± 0,003 |

Fonte: Autor da tese

5.2 Relatórios de Medição

Utilizou-se para a elaboração dos relatórios de medição um algoritmo de programação desenvolvido no Microsoft Excel com o complemento do Visual Basic for Applications (VBA), que foi utilizado para a recepção, tratamento dos dados, modelagem matemática e desenvolvimento do cálculo de análise de incerteza dos resultados.

O relatório proposto foi composto por duas páginas, sendo que na página 1 (um) são identificados o número do relatório, o local e data da realização, o objeto e os objetivos da medição, as normas de referência, a descrição do método e os padrões utilizados. Na página 2 (dois) do relatório são apresentados os resultados de espessuras mínima, média, máxima e as variações encontradas, um gráfico de desvios, onde são relacionados os valores de espessura com as incertezas obtidas e os respectivos intervalos de tolerância de cada placa e as notas relativas à realização da medição, com a identificação dos horários, temperaturas de execução e metrologista responsável.

Nas Figuras de 42 a 49 são apresentados os relatórios de medição das placas Si 1097, Si 1099, IPMB 007 e IPMB 010, gerados automaticamente pelo sistema. Os relatórios das demais séries de medições efetuadas para o estudo do efeito da amostragem no resultado das medições e para o estudo do efeito do número de pontos na avaliação das placas são disponibilizados nos Apêndices de números 09 a 52, localizados nos elementos pós-textuais deste trabalho.


5.3 Curvas de Resposta da Variação da Espessura

O mesmo algoritmo de programação desenvolvido no Microsoft Excel com o complemento do Visual Basic for Applications (VBA), foi também preparado para executar a geração de curvas cromáticas de resposta da variação de espessura das placas.

Nas Figuras 50 a 53 são apresentados os modelos gráficos em vistas de perspectiva e planta das representações cromáticas da curva de resposta da variação de espessura das placas Si 1097, Si 1099, IPMB 007 e IPMB 010, com destaques na identificação dos pontos de mínima e máxima espessuras encontradas.

Figura 42 – Relatório de medição da placa Si 1097 – 01 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1097

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 01 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
 1.2- Identificação: Si 1097
 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
 1.4- Código do Fabricante: Si 1097
 1.5- Número de Série: Si 1097

2 - Objetivo da Medição:

. Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

. IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
 . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

. Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 105 dados adquiridos e analisados.
 . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

. Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
 Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
 . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
 Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
 . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
 Certificado de Calibração XXXXXX
 . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNNN, Série XXXX
 Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

Figura 43 – Relatório de medição da placa Si 1097 – 02 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

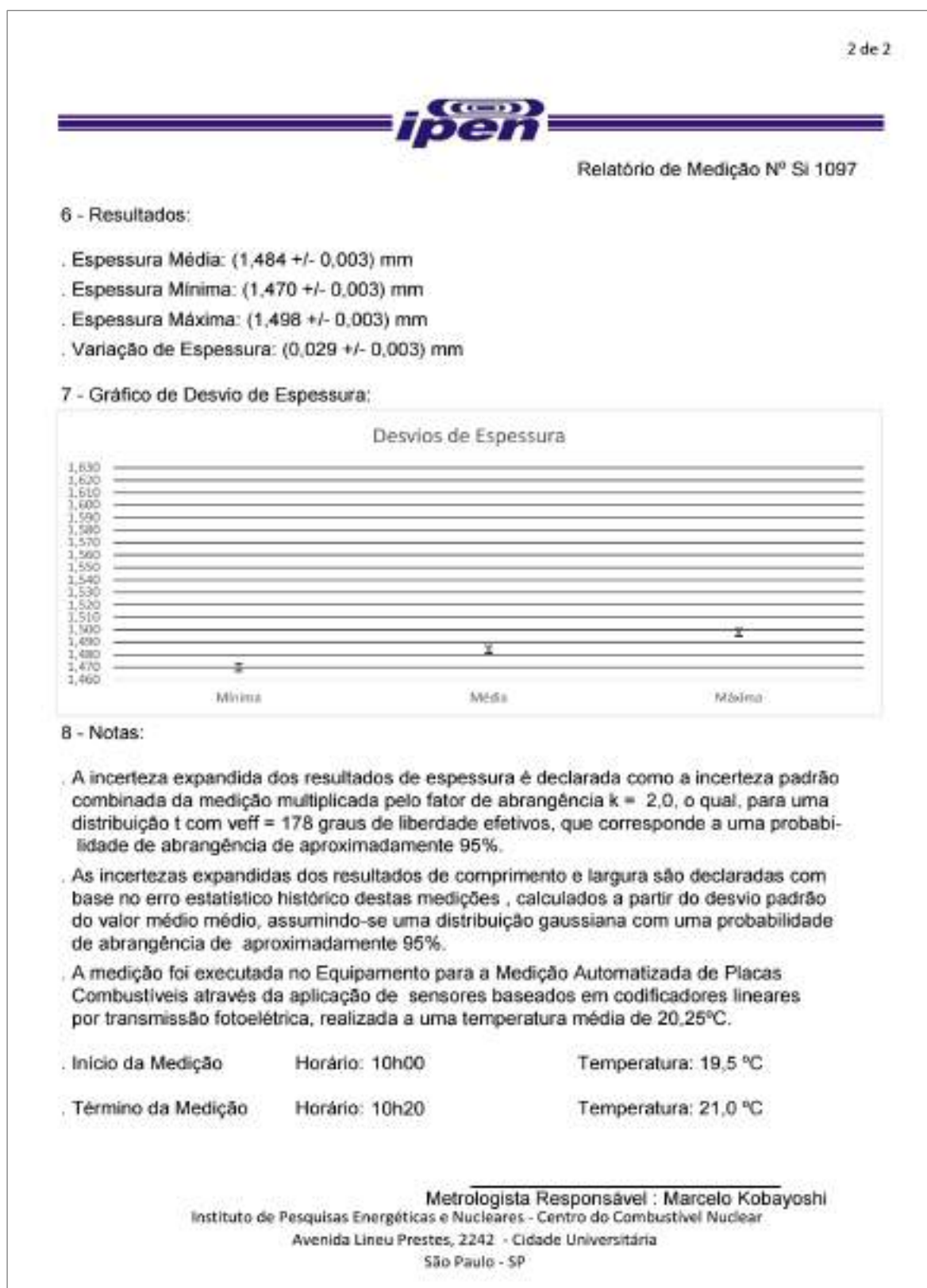



Figura 44 – Relatório de medição da placa Si 1099 – 01 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 01 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
 1.2- Identificação: Si 1099
 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

. Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

. IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
 . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

. Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 105 dados adquiridos e analisados.
 . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

. Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
 Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
 . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
 Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
 . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
 Certificado de Calibração XXXXXX
 . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
 Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

Figura 45 – Relatório de medição da placa Si 1099 – 02 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

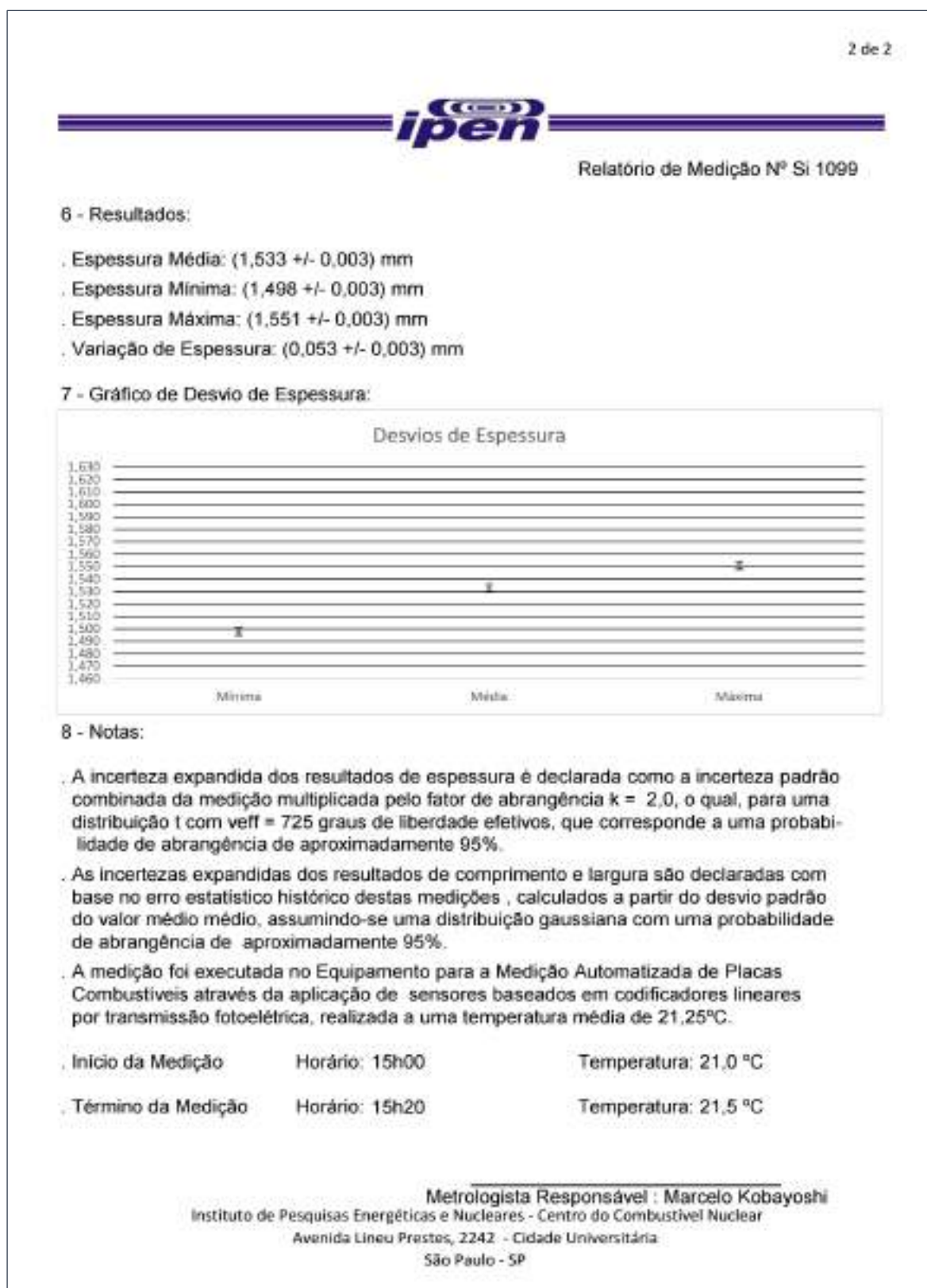



Figura 46 – Relatório de medição da placa IPMB 007– 01 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

1 de 2



Relatório de Medição Nº IPMB 007

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 01 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

1.1- Tipo da Placa: RMB - Interna
 1.2- Identificação: IPMB 007
 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
 1.4- Código do Fabricante: IPMB 007
 1.5- Número de Série: IPMB 007

2 - Objetivo da Medição:

. Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

. IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
 . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

. Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 105 dados adquiridos e analisados.
 . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

. Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
 Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
 . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
 Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
 . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611590-021"ERRO
 Certificado de Calibração XXXXXX
 . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
 Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

Figura 47 – Relatório de medição da placa IPMB 007 – 02 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

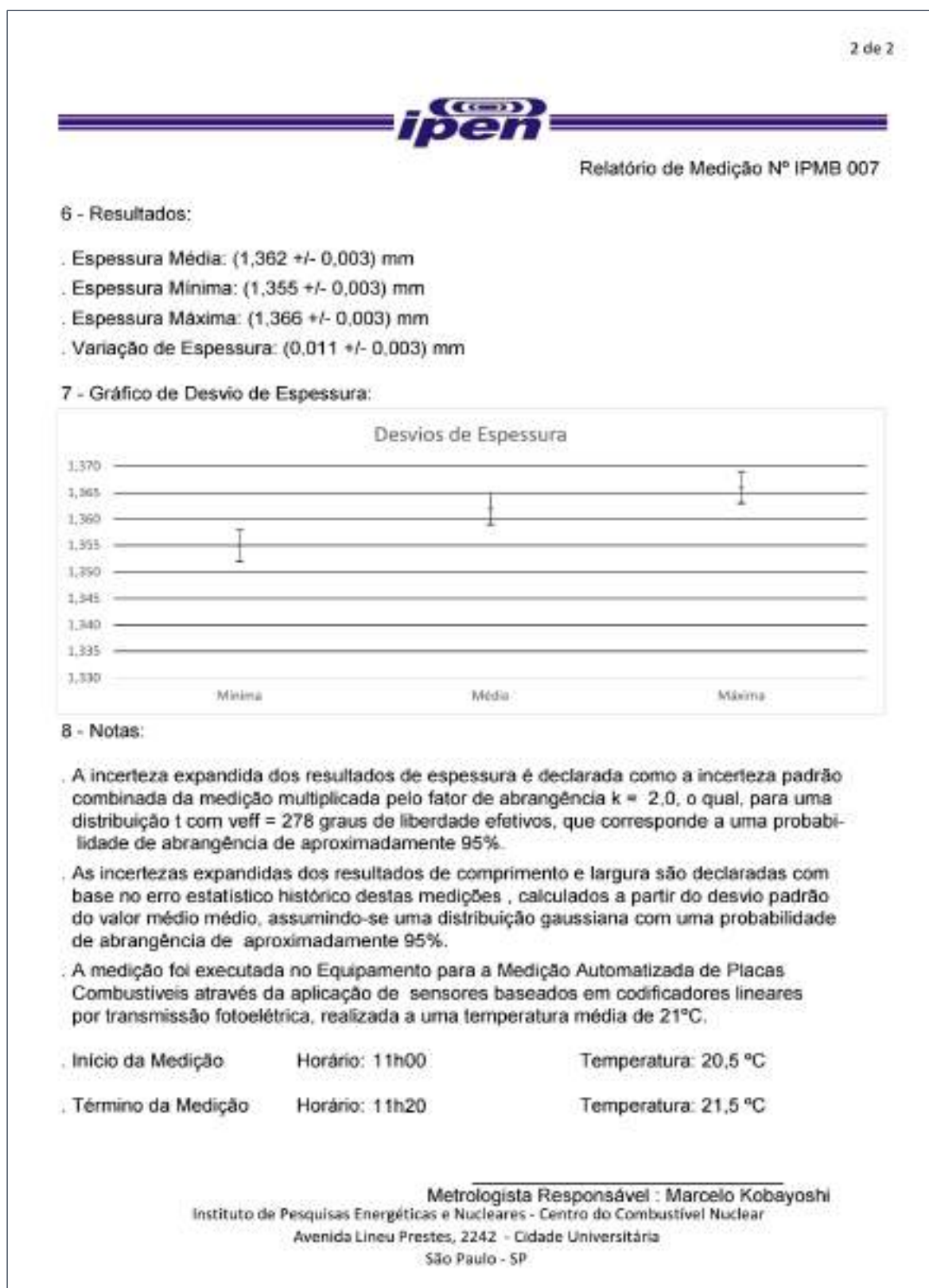



Figura 48 – Relatório de medição da placa IPMB 010 – 01 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

1 de 2


Relatório de Medição Nº IPMB 010
Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 01 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: RMB - Interna
- 1.2- Identificação: IPMB 010
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: IPMB 010
- 1.5- Número de Série: IPMB 010

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 105 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

Figura 49 – Relatório de medição da placa IPMB 010 – 02 / 02
(medição realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição)

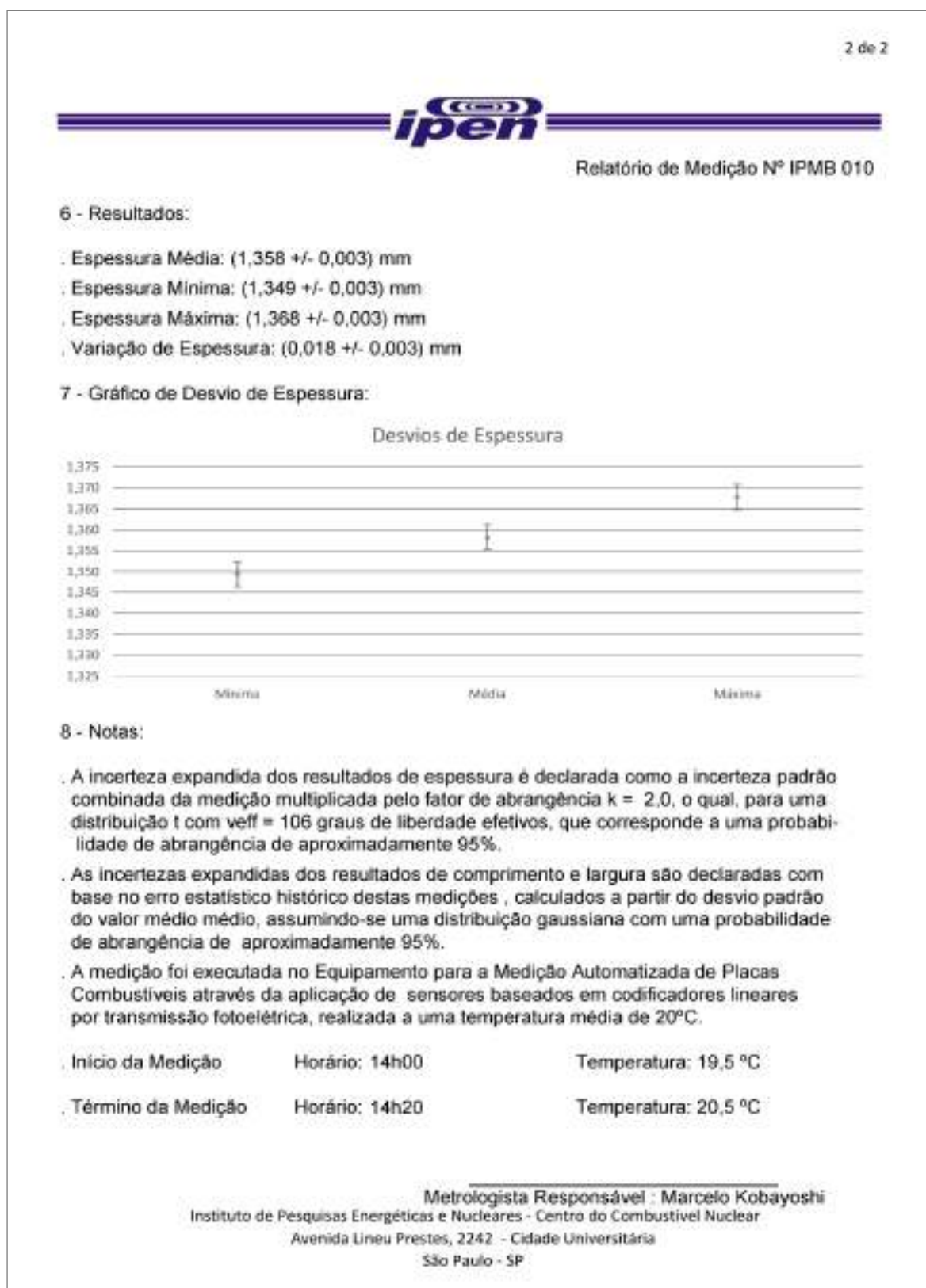
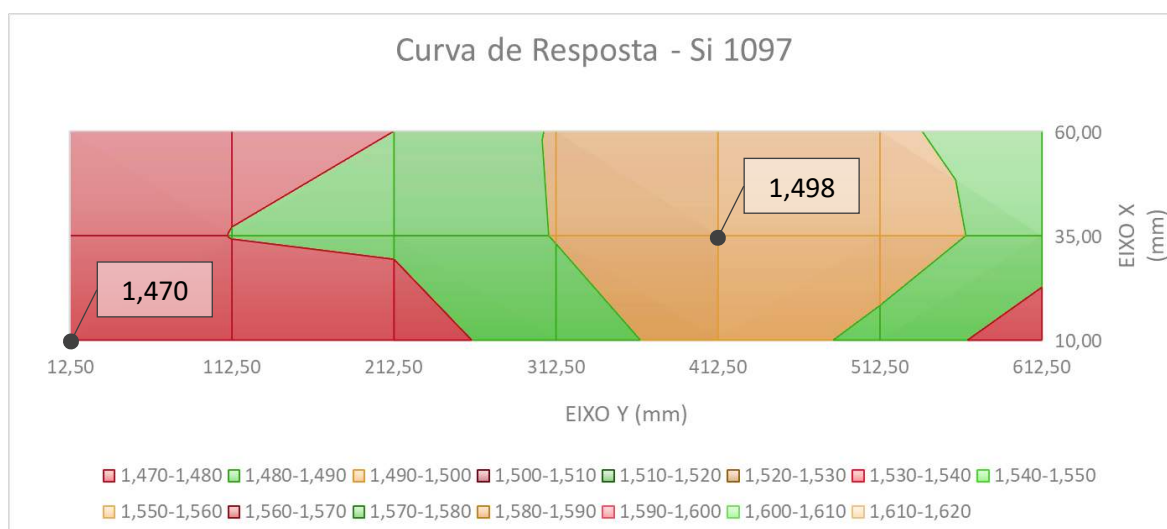
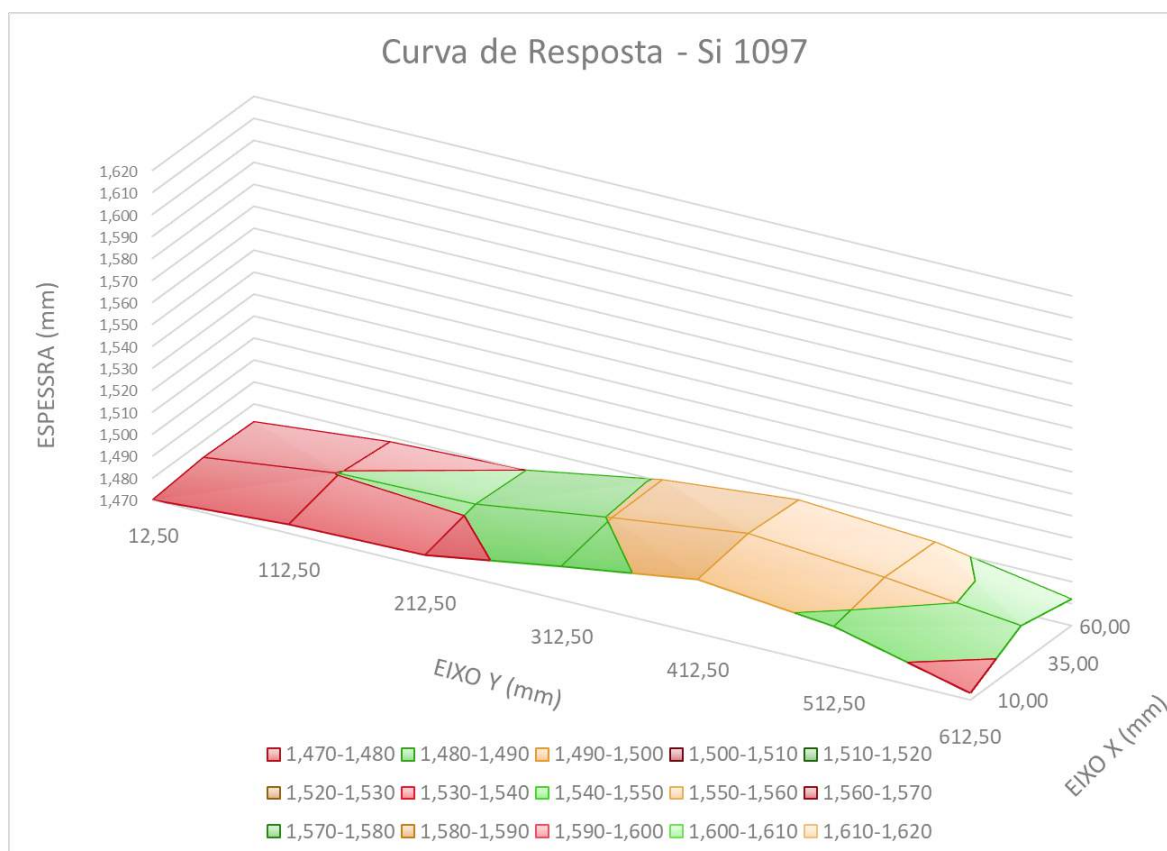
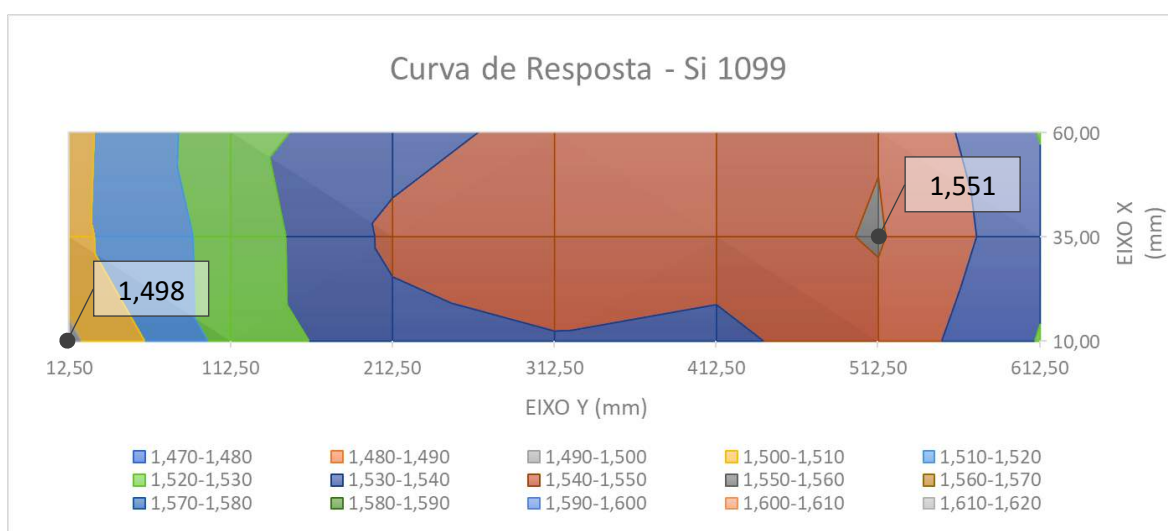
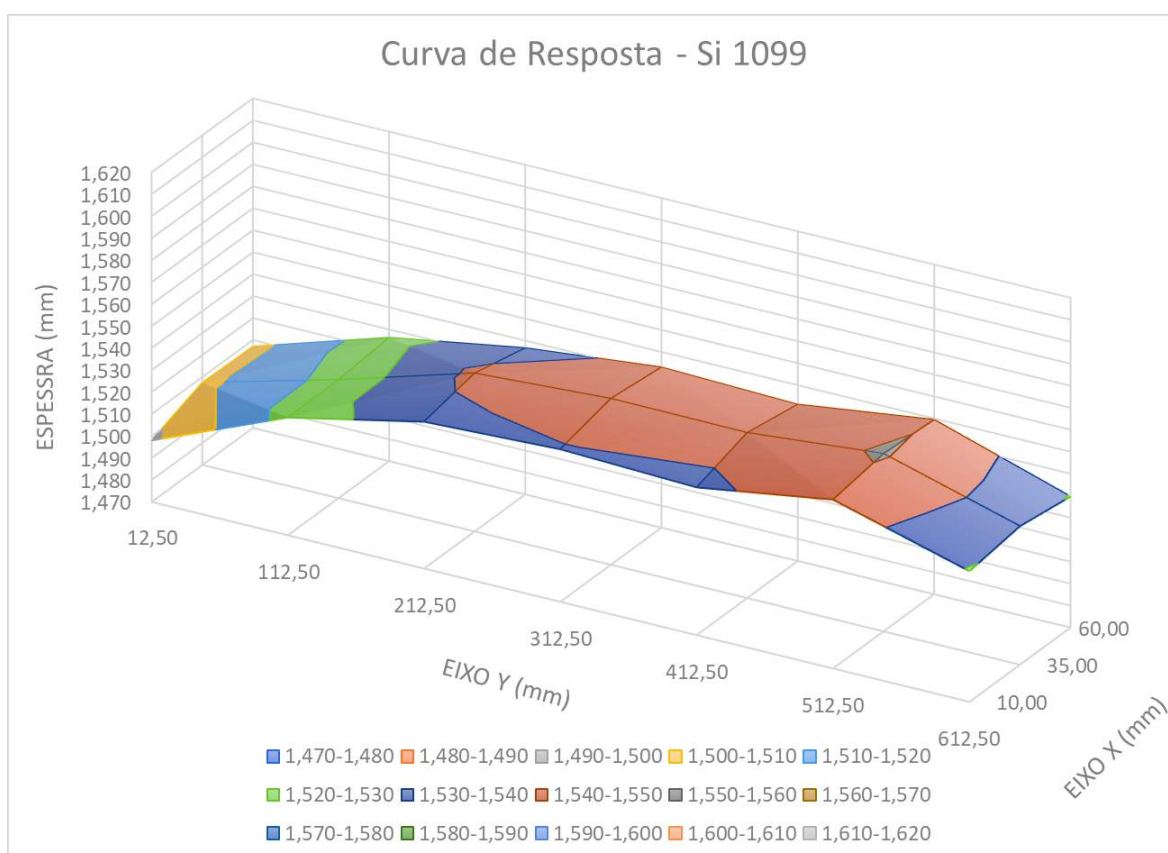


Figura 50 – Curvas de resposta da variação de espessura da placa Si 1097



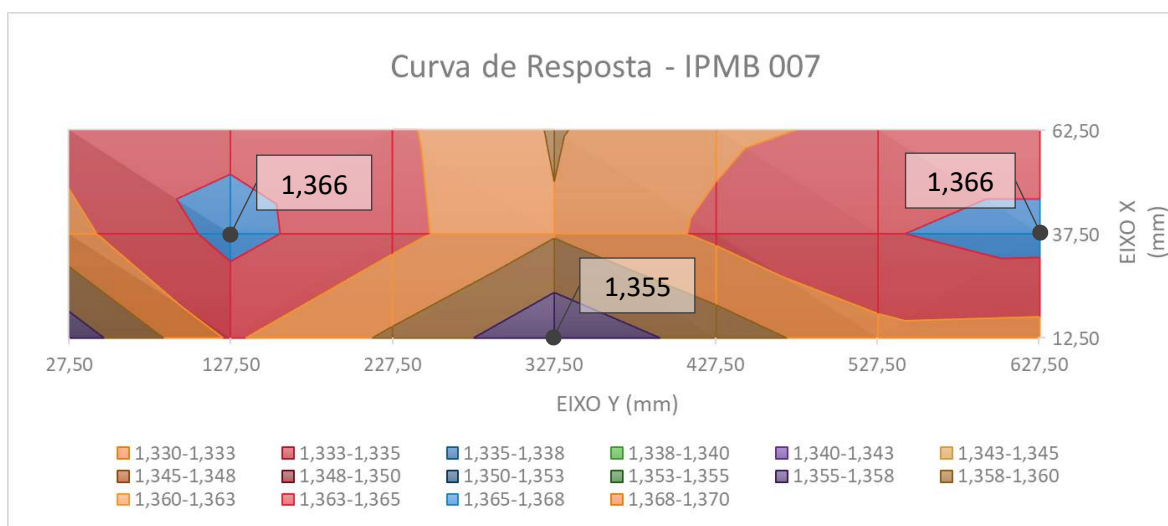
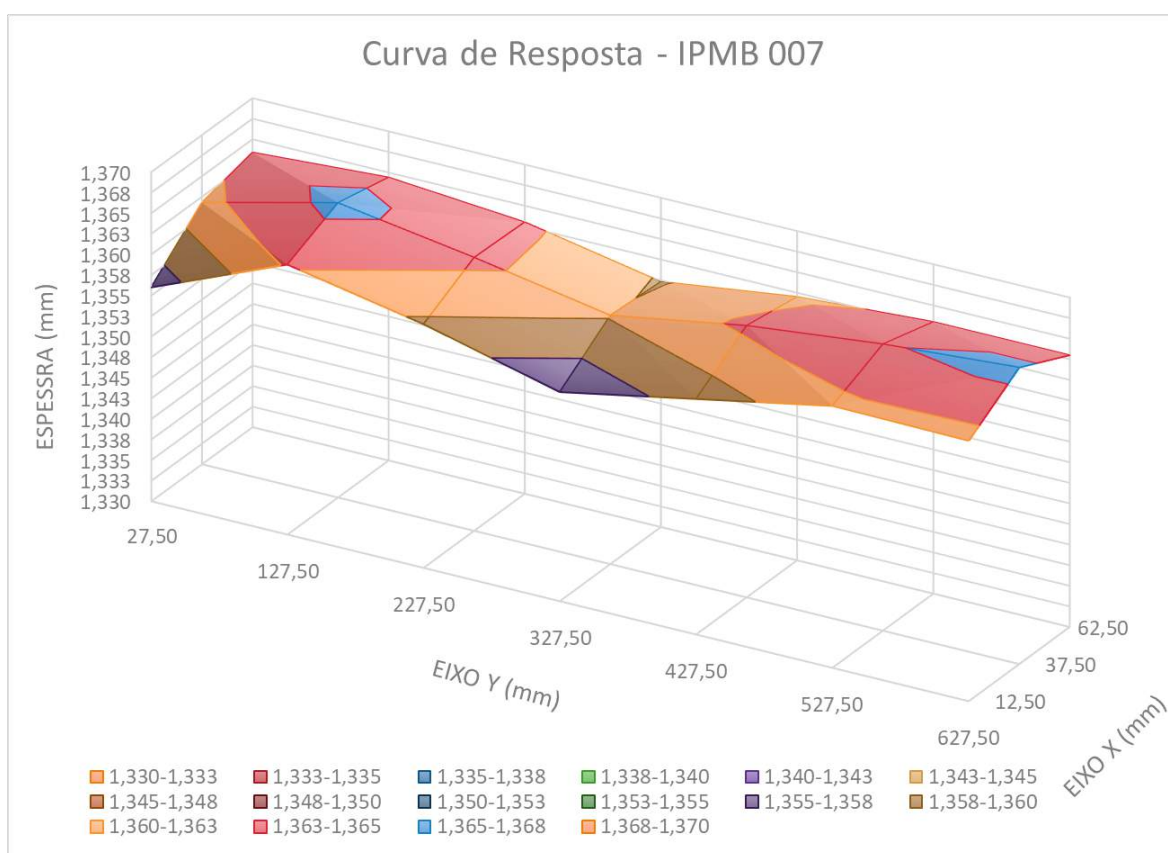
Fonte: Autor da tese

Figura 51 – Curvas de resposta da variação de espessura da placa Si 1099



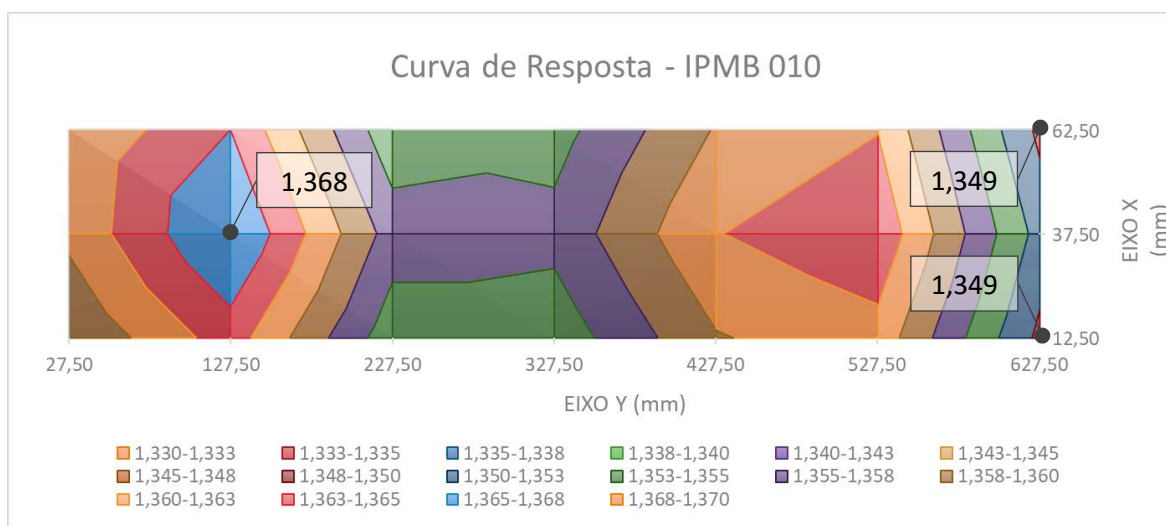
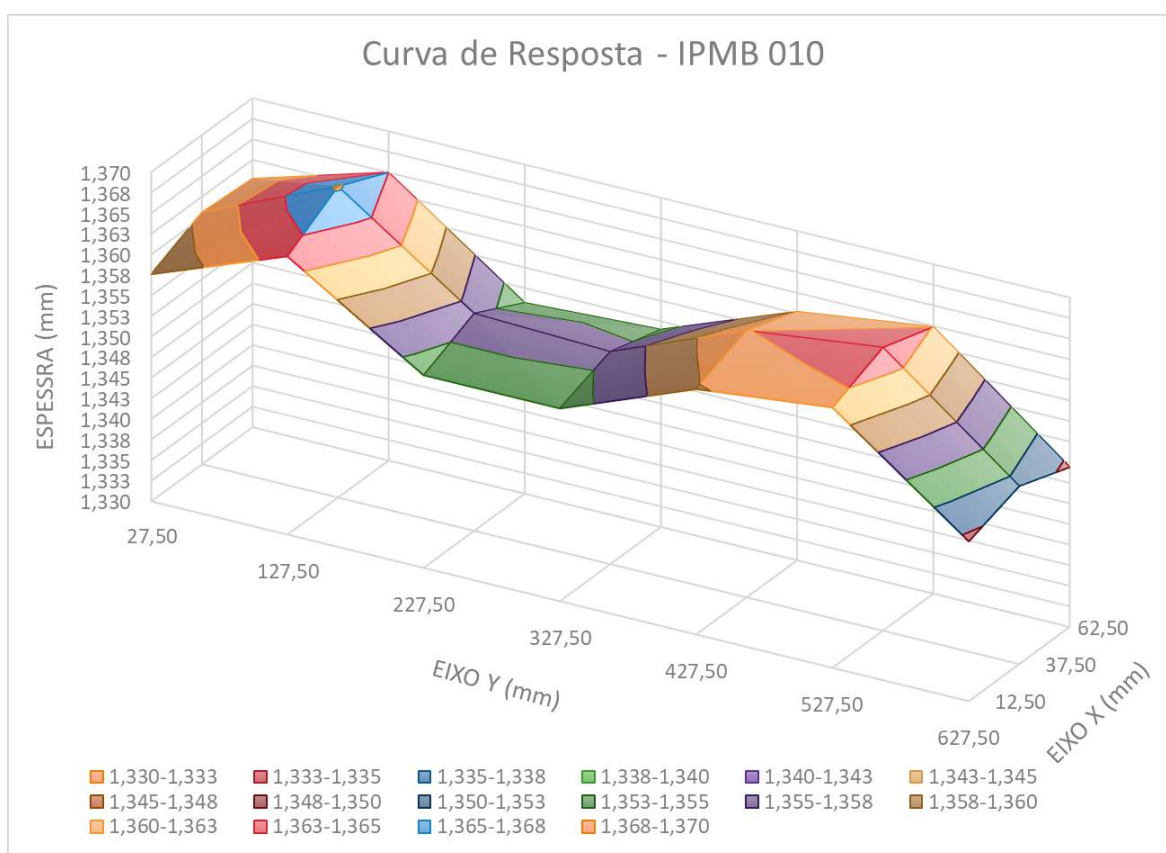
Fonte: Autor da tese

Figura 52 – Curvas de resposta da variação de espessura da placa IPMB 007



Fonte: Autor da tese

Figura 53 – Curvas de resposta da variação de espessura da placa IPMB 010



Fonte: Autor da tese

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Discussão dos Resultados Obtidos

Conforme descrito em 4.2.5, ao início de cada série de medição, executa-se o ajuste (ou preset) dos sensores, com a utilização de um bloco padrão de referência classe 0 (JIS, 2004), cuja espessura é o mais próximo possível do valor nominal de espessura do modelo de placa a ser medida.

Especificamente na execução das 26 séries de medições apresentadas na Tabela 06, após o término do primeiro ciclo de medições, e em todas as repetições de ciclos subsequentes, o equipamento recebeu um comando para retornar ao ponto de ajuste dos sensores, onde se realizou a verificação do valor de resposta do aparelho na indicação da espessura do bloco padrão.

Assim, esta verificação foi realizada 218 vezes no total, sendo de 0,002 mm a maior variação encontrada em relação ao valor de ajuste, realizado no início de cada série. Assumiu-se, portanto, este valor de 2 μm como sendo o valor de repetibilidade (precisão) do equipamento.

Observa-se que este valor de repetibilidade é bastante coerente, mostrando-se bem congruente, se comparado com o valor máximo do erro de quantização do sistema dos sensores, especificado pelo fabricante, de $\pm 0,001$ mm, e se confrontado com os valores dos dados extraídos dos cálculos de incerteza das medições das placas de códigos de fabricação Si 1097, Si 1099, IPMB 007 e IPMB 010, apresentados na Tabela 08.

Tabela 08 – Dados dos cálculos de incerteza das medições

| ID Placa Combustível | Incerteza Padrão Combinada U_c (μm) | Graus de Liberdade Efetivos ν_{eff} | Fator de Abrangência k | Incerteza de Expandida U_{95} (mm) |
|----------------------|--|---|--------------------------|--------------------------------------|
| Si 1097 | 1,71 | 178 | 1,97 | $\pm 0,003$ |
| Si 1099 | 1,64 | 725 | 1,96 | $\pm 0,003$ |
| IPMB 007 | 1,68 | 278 | 1,97 | $\pm 0,003$ |
| IPMB 010 | 1,76 | 106 | 1,98 | $\pm 0,003$ |

Fonte: Autor da tese

6.2 Índices de Capacidade de Medição do Equipamento

Conforme material teórico apresentado em 2.9.11, avaliou-se também o índice de capacidade de medição do novo equipamento, com base nos requisitos especificados de intervalo de tolerância das placas e as incertezas obtidas nos resultados das medições realizadas, utilizando-se para isto, o modelo matemático proposto (Equação 15) pelo documento orientador JCGM 106:2012, obtendo-se os seguintes valores:

Para a placa Si 1097, fabricada para compor o elemento combustível nuclear do reator IEA-R1, o índice de capacidade de medição encontrado foi de:

$$C_m = \frac{1,620-1,470}{4*0,00171} = 21,93 \quad (54)$$

Para a placa Si 1099, fabricada para compor o elemento combustível nuclear do reator IEA-R1, o índice de capacidade de medição encontrado foi de:

$$C_m = \frac{1,620-1,470}{4*0,00164} = 22,87 \quad (55)$$

Para a placa IPMB 007, fabricada para compor o elemento combustível do reator nuclear IPEN/MB-01, o índice de capacidade de medição encontrado foi de:

$$C_m = \frac{1,370-1,330}{4*0,00168} = 5,95 \quad (56)$$

E para a placa IPMB 010, fabricada para compor o elemento combustível do reator nuclear IPEN/MB-01, o índice de capacidade de medição encontrado foi de:

$$C_m = \frac{1,370-1,330}{4*0,00180} = 5,55 \quad (57)$$

Uma análise da Equação (15) torna explícito que os índices de capacidade de medição obtidos são diretamente relacionados aos valores das incertezas padrão combinada u_c obtidas nos resultados, assim temos, por exemplo:

$$\text{Se, } C_m \geq 5 \rightarrow u_c \leq \frac{I_E}{20} \quad (58)$$

Utilizando-se do mesmo raciocínio, e assumindo-se que a distribuição dos valores obtidos nas medições apresenta uma função densidade de probabilidade representada por uma curva Normal, onde a probabilidade de abrangência para tal intervalo é aproximadamente 95 %, é possível concluir que:

$$\text{Se, } C_m \geq 5 \rightarrow U_{95} \leq \frac{I_E}{10} \quad (59)$$

Ou seja, no nosso caso, os valores obtidos de índice de capacidade de medição C_m iguais ou superiores a 5 indicam que as incertezas expandidas obtidas nos resultados das medições realizadas pelo equipamento foram sempre iguais ou menores que 10 % do valor do intervalo dos limites de especificação (tolerância) das dimensões medidas da placa.

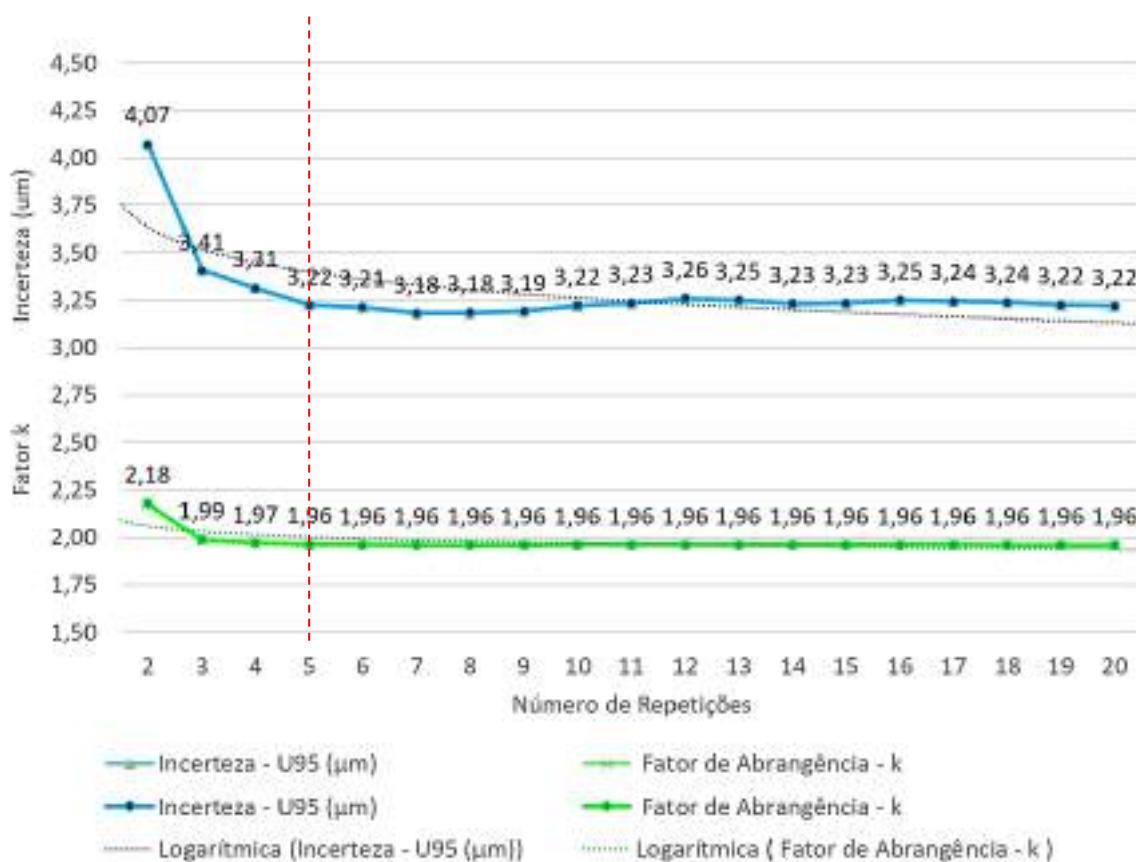
6.3 Efeito do Tamanho da Amostra no Resultado das Medições

Conforme apresentado na Tabela 06, no estudo realizado com o objetivo de se determinar o efeito do tamanho da amostra no resultado das medições, foram utilizadas 19 séries de medição na placa Si 1099, variando o número de ciclos de medição (repetições realizadas) em cada série de 2 até 20.

Com base nestes dados, foram analisadas as variações ocorridas nos valores das incertezas expandidas U_{95} e nos fatores de abrangência k obtidos nos resultados das medições, de acordo com a variação do número de repetições.

Por meio das curvas dos valores de incerteza expandida U_{95} e dos fatores de abrangência k apresentados na Figura 54, é possível constatar que o número de repetições exerce maior influência nos dois indicadores entre as amostras de tamanho 2 até as de tamanho 5, e que, a partir deste, os resultados sofrem pouca variação com o aumento da amostragem.

Figura 54 – Análise do efeito da amostragem nas incertezas dos resultados



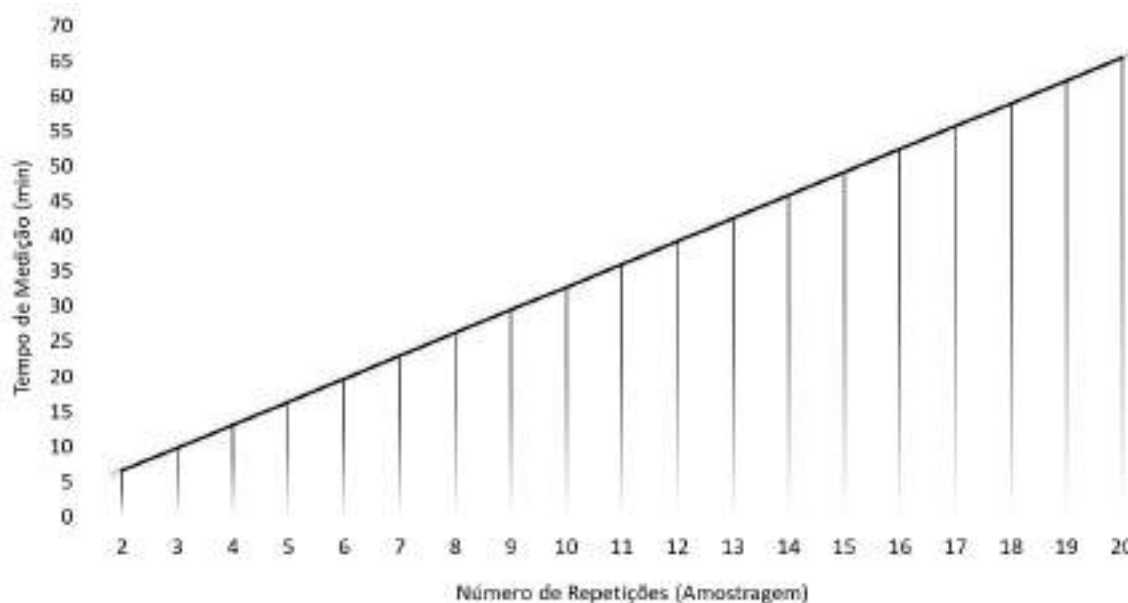
Fonte: Autor da tese

Um fator importante a ser considerado neste aumento do número de ciclos de medição é o aumento proporcional do tempo despendido na medição das placas, conforme apresentado na Figura 55.

Assim, correlacionando-se os dados apresentados na Figura 54 com os dados da Figura 55, é possível observar que amostras à partir do tamanho 5 irão gerar um aumento financeiro com gasto de recursos, como tempo do operador, tempo de operação do equipamento, gasto de energia elétrica e consumo pneumático que, efetivamente, não trarão ganhos significativos na redução da incerteza e no aumento da confiabilidade dos resultados obtidos.

Portanto, diante dos dados apresentados, sugere-se a utilização de 5 ciclos de medição (repetições) para a medição das placas, desde que sejam garantidas as condições de exatidão, resolução, sensibilidade, precisão, baixa deriva instrumental e mantidas as grandezas de influência sob controle.

Figura 55 – Análise do efeito da amostragem no tempo das medições



Fonte: Autor da tese

6.4 Efeito do Número de Pontos na Avaliação das Placas

Conforme discutido nos itens 2.3.1 e 2.4.1, o processo de fabricação das placas combustíveis tem grande influência no resultado de aplicação das mesmas, e diversos parâmetros de qualidade devem ser controlados durante a etapa da laminação, com o objetivo de se atingir as propriedades de especificação, tais como: a estrutura interna, a uniformidade da composição química, a ausência de defeitos superficiais, a uniformidade microestrutural (INFOMET, 1998) e as próprias variações de espessuras resultantes.

Estas propriedades mecânicas e geométricas estão correlacionadas aos parâmetros dos processos sequenciais de laminação a quente e a frio das placas, como as temperaturas aplicadas, as taxas de deformação, o atrito entre os cilindros de laminação e o material, a força de laminação exercida pelo sistema hidráulico, a presença de esforços de tração, o diâmetro dos cilindros de laminação utilizados (CRUZ et al., 2021), e a própria rigidez do equipamento laminador.

Assim, conforme apresentado na Tabela 06, no estudo realizado com o objetivo de se verificar o efeito do número de pontos na avaliação da conformidade foram executadas 3 séries de medição na placa Si 1097, variando-se entre 21

(matriz 3 x 7), 39 (matriz 3 x 13) e 75 (matriz 3 x 25) o número de pontos medidos em cada ciclo, e executando-se 5 ciclos de medição em cada série.

Para a comparação de curvas de resposta obtidas em medições realizadas com diferentes números de pontos medidos, foram utilizados modelos gráficos apresentados em perspectiva e com representações cromáticas da variação de espessura.

Na Figura 56 são apresentadas comparações e sobreposições das curvas de respostas obtidas por meio das medições realizadas com 21 e 39 pontos por ciclo, onde uma seta em vermelho destaca a existência de uma acentuada diferença entre as duas curvas de resposta

Tal variação ocorre devido a uma diferença de espessura encontrada ao longo da linha com coordenada de 62,50 no eixo Y, que somente foi possível a detecção na matriz de medição com 39 pontos (3 x 13) por ciclo.

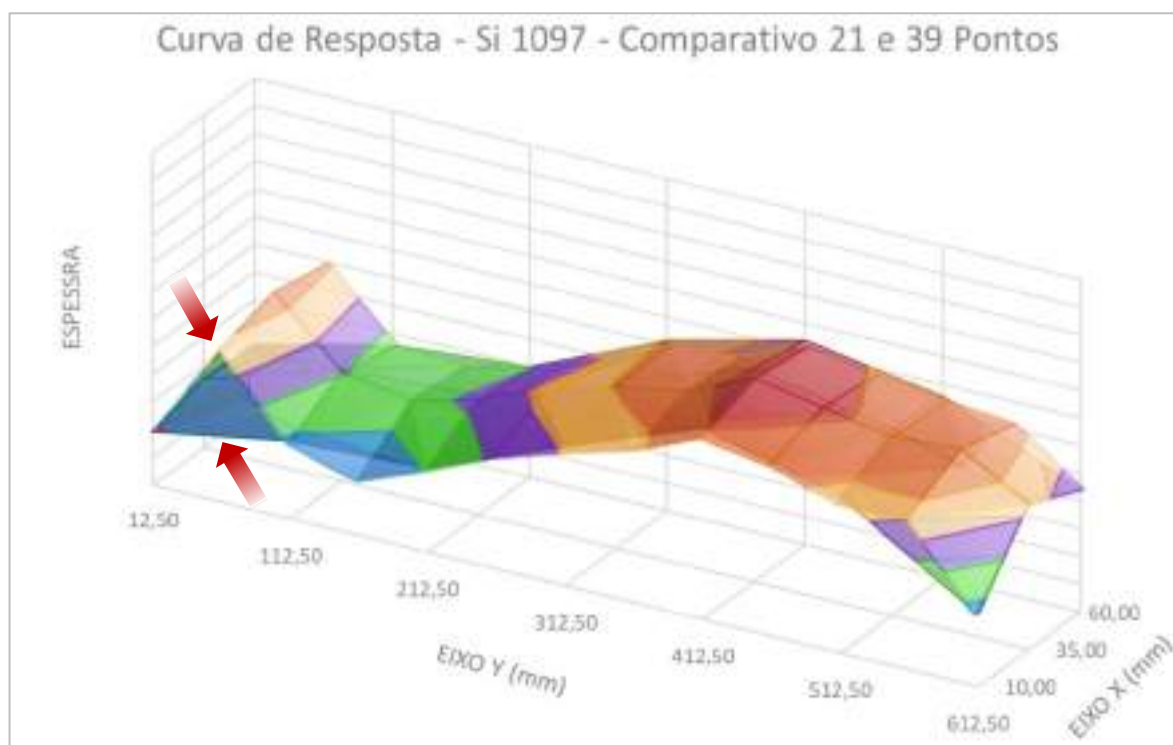
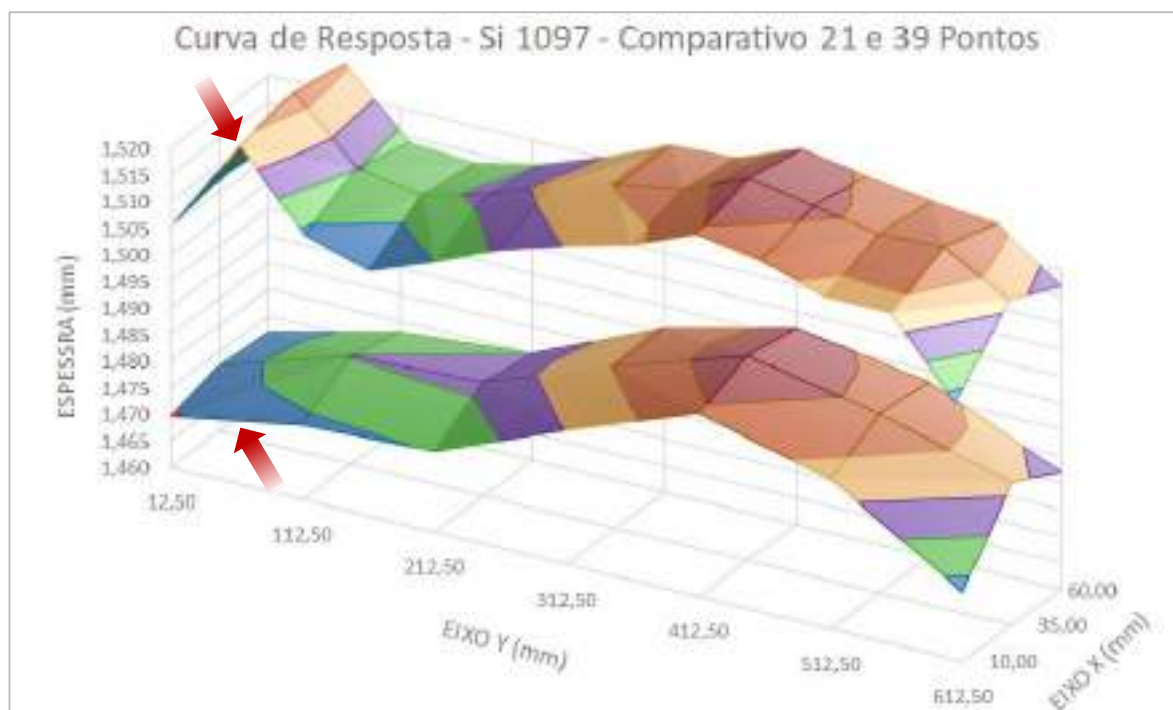
Da mesma maneira, na Figura 57 são apresentadas comparações por sobreposição as curvas de respostas obtidas por meio das medições realizadas com 39 e 75 pontos por ciclo.

Observa-se que, ao contrário da comparação entre as curvas de resposta das medições com 21 e 39 pontos por ciclo, a comparação entre as curvas de resposta das medições com 39 e 75 pontos por ciclo não apresentou grandes diferenças entre as representações.

Obviamente que uma matriz de medição com mais pontos sempre irá proporcionar uma melhor discriminação e um representação mais fiel da real variação de espessura da placa combustível. Muito embora seja importante considerar também que, o aumento do número de pontos na avaliação da conformidade das placas será sempre consonante com aumento do tempo despendido na medição das placas, conforme apresentado na Figura 58.

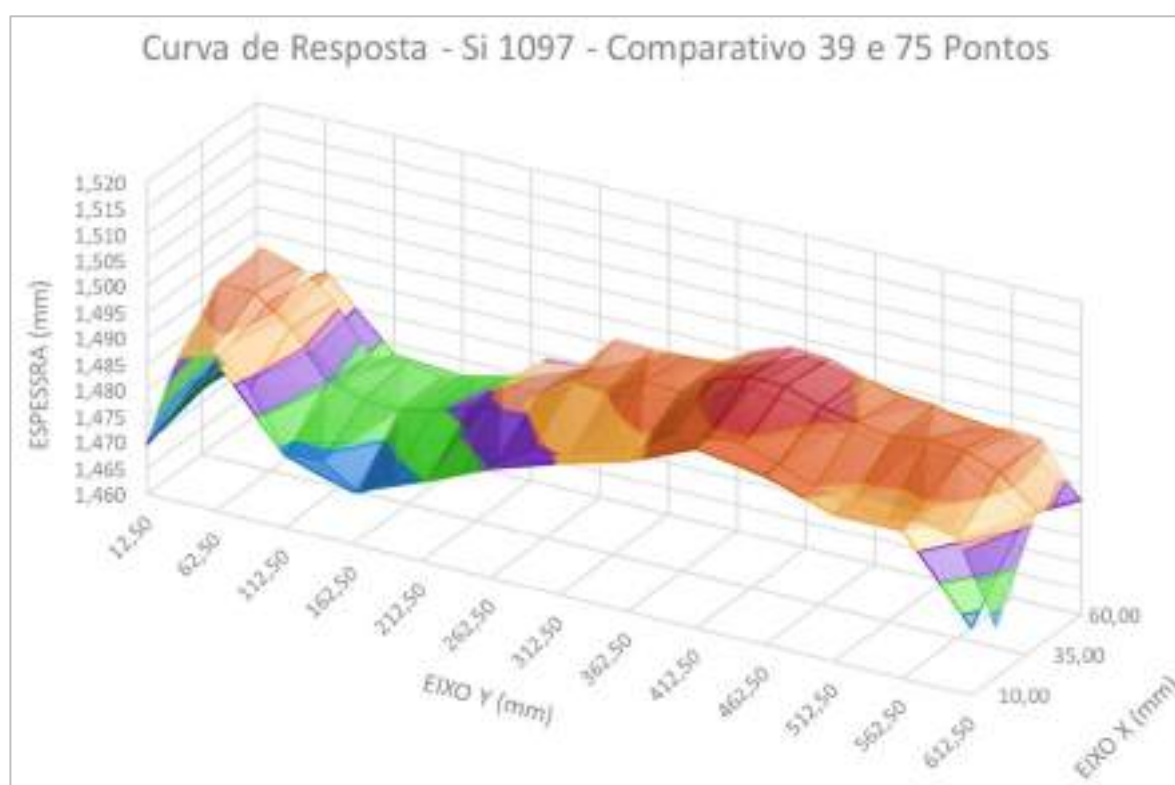
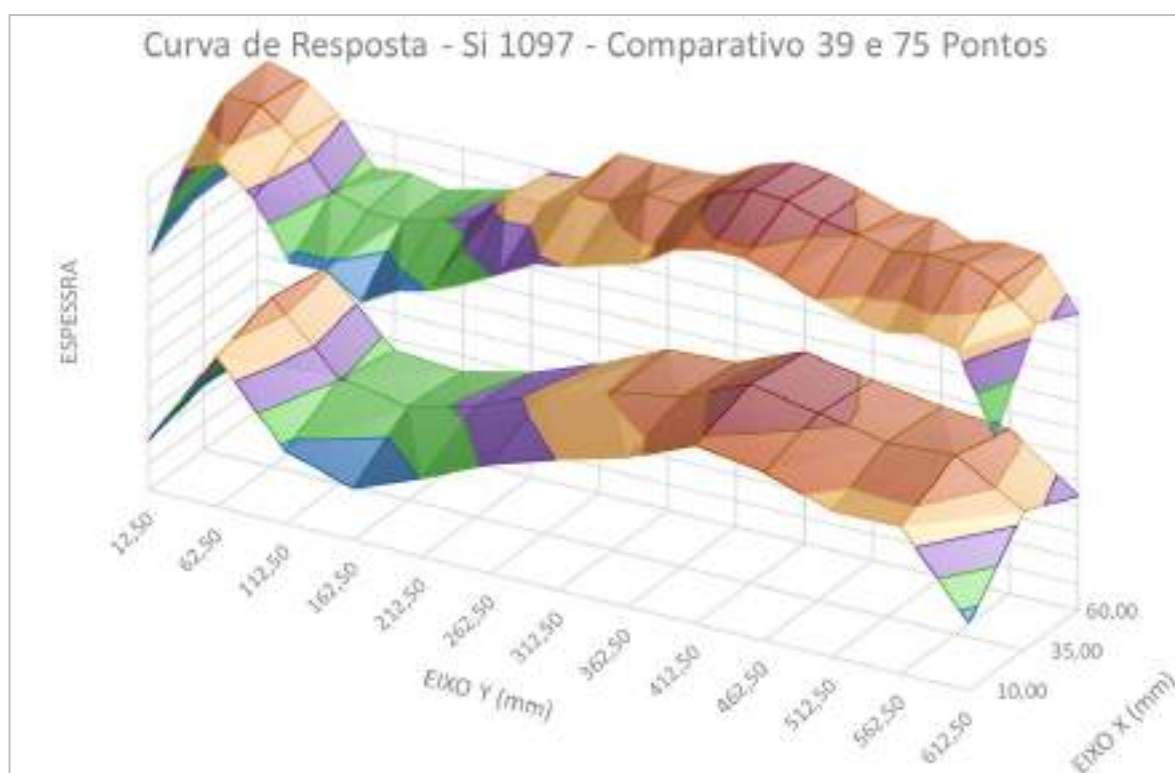
Não obstante este aumento de tempo, e conseqüentemente de custos, com a adoção de um número maior de pontos na avaliação, percebe-se, mediante a análise da Figura 56 que a curva de resposta gerada pelas medições com 21 pontos (matriz 3 x 7) por ciclo resulta em uma representação com baixa fidelidade em relação real variação de espessura da placa combustível, não representando adequadamente as variações decorrentes do processo de laminação.

Figura 56 – Comparativo entre as curvas de resposta da placa Si 1097 avaliadas com 21 e 39 pontos



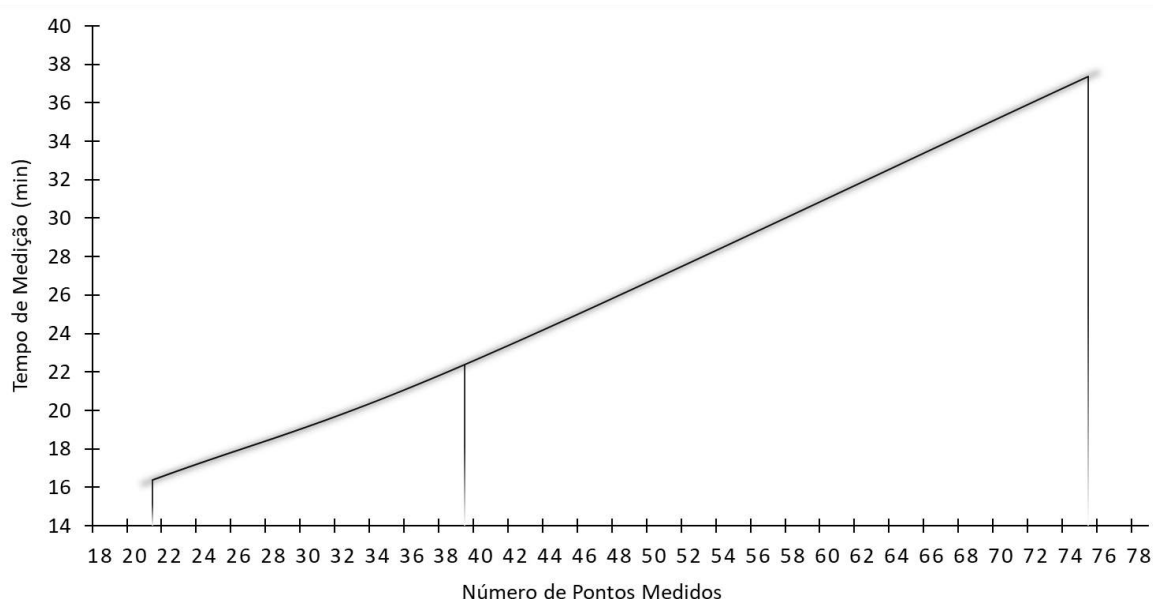
Fonte: Autor da tese

Figura 57 – Comparativo entre as curvas de resposta da placa Si 1097 avaliadas com 39 e 75 pontos



Fonte: Autor da tese

Figura 58 – Análise do efeito do número de pontos no tempo das medições



Fonte: Autor da tese

Em conclusão, as análises das curvas de resposta obtidas evidenciam a necessidade da realização do controle de espessura das placas em mais pontos por ciclo do que os 21 estabelecidos pelo método anterior.

Assim, diante dos dados apresentados sugere-se que, para uma melhor avaliação em processos de fabricação de placas já consolidados, a medição seja realizada em no mínimo 39 pontos, desde conhecidos e mantidos sob controle os parâmetros do processo de laminação já comentados.

Já para o estudo ou o desenvolvimento de novos processos de fabricação de placas, ou na ocorrência da alteração de algum dos seus parâmetros, sugere-se, para uma melhor avaliação, que a medição seja realizada em, no mínimo 75 pontos.

7 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados apresentados, evidencia-se que o equipamento de medição desenvolvido apresenta adequada precisão, mantendo, sob condições de repetibilidade, o valor de 2 μm . Este valor também demonstra a boa estabilidade e pequena tendência do sistema.

Das 26 séries desenvolvidas, somente na série realizada com 2 ciclos de medição (2 repetições) observou-se que a incerteza de medição obtida ($\pm 4 \mu\text{m}$) sofreu pequeno acréscimo, resultado este já esperado devido à baixa representatividade estatística obtida com apenas 2 amostras por ponto medido.

Em todas as demais 25 séries, realizadas com 3 ou mais ciclos de medição, os valores obtidos de incerteza nos resultados mantiveram-se constantes, no valor de $\pm 3 \mu\text{m}$, o que evidencia que a exatidão, a resolução e sensibilidade do equipamento atendem aos requisitos para o controle dimensional proposto.

Já a análise dos dados realizados em 6.3, onde foram relacionados os fatores de abrangência k e as incertezas expandidas U_{95} dos resultados com o número de repetições, confirmam a realização do adequado modelamento matemático e demonstram as corretas correlações com as grandezas de influência, revelando um correto conhecimento dos fenômenos envolvidos na medição.

Assim, atesta-se que foi atingido o objetivo da construção de um equipamento para a realização de medições programáveis, cujos dados obtidos pudessem ser automaticamente coletados e tratados, e no qual os resultados fossem apresentados com as suas respectivas incertezas de medição, na forma de relatórios descritivos, gráficos e curvas de resposta.

As análises realizadas em 6.2, indicam que, em todas as séries realizadas foram atingidos valores de índices de capacidade de medição iguais ou superiores a cinco ($C_m \geq 5$), o que equivale a dizer que as incertezas expandidas obtidas nos resultados das medições foram sempre iguais ou menores que 10 % do valor do intervalo dos limites de especificação (tolerância) de espessura das placas combustíveis analisadas.

Com relação às realizações de séries de medição em diferentes medidas de placa e com matrizes de 3 x 13 (39 pontos) e de 3 x 25 (75 pontos) por ciclo de medição, demonstrou-se que o equipamento é adequado para execução de

medições com números de pontos até superiores ao aumento de 100% (no caso de 21 para 42 pontos) inicialmente colocado como objetivo.

Com respeito à execução de medições mais rápidas, colocadas com a meta de redução de no mínimo 50% em relação às medições manuais, hoje realizadas em um tempo médio de 20 minutos na execução de um ciclo completo de medição, verificou-se que, utilizando-se a mesma matriz de 3 x 7 (21 pontos por ciclo) o novo sistema é capaz de proceder o ciclo completo de medição em 3 minutos e 20 segundos, tempo este bem abaixo dos 10 minutos colocados como objetivo inicial.

Em resumo, demonstrou-se que o desenvolvimento deste novo sistema de medição automatizado de placas combustíveis facultou a obtenção de vários incrementos em relação ao estado da técnica e aos métodos anteriormente utilizados, promovendo ganhos em flexibilidade, produtividade e confiabilidade metrológica no processo¹⁵ de avaliação da conformidade, durante as etapas de fabricação das placas combustíveis produzidas no CECON-IPEN.

¹⁵ Disponibiliza-se nos Apêndices 53 a 56, localizados nos elementos pós-textuais deste trabalho, uma proposta de Instrução de Trabalho (IT), elaborada segundo as características operacionais do equipamento e visando atender as premissas propostas e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos no novo sistema de medição.

8 SUGESTÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Apresenta-se a seguir três sugestões de temas, visando futuros desenvolvimentos deste trabalho.

8.1 Redução da Incerteza Obtida nos Resultados das Medições

Durante a construção e, principalmente durante a execução das medições, foram levantados vários aspectos relativos a calibrações de padrões de referência e de tratamento dos fatores de influência, que poderão ser trabalhados para a obtenção mais acurada de suas informações.

Assim, sugere-se o desenvolvimento de novos estudos, buscando-se informações que viabilizem ao tratamento de forma sistemática de alguns efeitos atualmente assumidos como componentes de incerteza, possibilitando, assim, a aplicação de fatores de correção, o que, possivelmente, permitirá também a redução da incerteza obtida nos resultados.

A adoção desta sugestão irá demandar estudos para a aquisição de serviços da calibração dos sensores de medição utilizados, bem como, a elaboração de novos procedimentos operacionais, além da aquisição de novos instrumentos para a medição de fatores de influência. Também será necessária a readequação do modelo matemático para execução do cálculo de análise de incerteza dos resultados de medições.

8.2 Incremento de Medições de Largura e Comprimento

Conforme discutido no item 4.4.3, foram realizados testes de medição da largura e comprimento das placas, com utilização do conjunto sensor de detecção de bordas de superfícies.

Os resultados apresentados permitiram constatar que a aplicação do conjunto sensor de detecção de bordas de superfícies, quando utilizado como elemento sensor dos transdutores de deslocamento linear, não apresenta a repetibilidade de indicação posicional necessária para as medições de largura e comprimento das placas.

Assim, sugere-se o desenvolvimento de novos estudos envolvendo a utilização dos sinais de deslocamento captados por intermédio dos transdutores lineares, visando o desenvolvimento de medições nas dimensões de largura e comprimento das placas.

A adoção desta sugestão demandará estudos para a aquisição de um sistema mais preciso para detecção de tangência da placa, o que, possivelmente, irá requerer uma readequação do projeto, visando um melhor posicionamento dos novos elementos do sensor, além de exigir uma reprogramação no CLP e na IHM para a correta realização destas funções.

8.3 Realização de Medições de Espessura Sem Contato

Conforme discutido no item 4.1.3, a decisão para a escolha entre os sensores baseados em sistemas de codificadores lineares por transmissão fotoelétrica (L.E.) e os sensores baseados em sistemas de triangulação a laser (LTS) baseou-se fundamentalmente em critérios de disponibilidade financeira e de capacidade das empresas no fornecimento de garantias para os suportes técnico e tecnológico no mercado nacional.

Assim, caso haja possibilidade de futura obtenção de aporte financeiro, sugere-se o desenvolvimento de novos estudos visando a utilização de cabeçotes de triangulação laser, salientando-se aqui, que a estrutura do equipamento foi concebida para permitir a utilização destes sensores sem contato.

Entre outras vantagens, a aplicação de destes novos sensores trará oportunidades para realização de medições ainda mais rápidas, possibilitando efetuar a varredura da superfície de modo contínuo e efetivando as medições com maior velocidade, abrindo possibilidades de captação de um número muito maior de pontos de medição (N_p), ficando esta captação limitada apenas pelos sistemas de processamento do equipamento.

A adoção desta sugestão demandará o desenvolvimento de estudos específicos sobre as tecnologias e recursos oferecidos pelos sistemas de medição por triangulação a laser, além da pesquisa de fornecedores, para garantir a aquisição de um sistema que possua suporte técnico e tecnológico. Deverá ser buscado também um sensor que indicado para contornar as características reflexivas heterogêneas das superfícies das placas combustíveis.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A2LA - AMERICAN ASSOCIATION FOR LABORATORY ACCREDITATION. **Guide for Estimation of Uncertainty of Dimensional Calibration and Testing Results**: G103. Frederick, 2019. 30 p.

AAAS - AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE (ed.). **Science**. Lancaster: Science Press, 1880. 975 p. Michels, John, 1875- org.

ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B89.7.3.1-2001**: Guidelines for Decision Rules Considering Measurement Uncertainty in Determining Conformance to Specifications: New York: ASME, 2001. 24 p.

AZINHEIRA, J.R.. **Sensores e Actuadores**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2002. 133 p. DEM Secção de Sistemas.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10.012:2004**: Sistemas de Gestão de Medição - Requisitos para os Processos de Medição e Equipamentos de Medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 20 p.

ALLARDICE, Corbin; TRAPNELL, Edward R; FERMI, Enrico; FERMI, Laura. **The First Reactor**: Understanding the Atom. Oak Ridge: Atomic Energy Commission - Division of Technical Information, 1968. 52 p.

ATLAS STEELS. **Grade Data Sheet 440c**. Ingleburn, 2008. Disponível em: <<http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas%20Grade%20datasheet%20440C%20rev%20May%202008.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

AUTONICS CORPORATION (Republic of Korea) (org.). **BF4R**: Fiber Optic Sensors. 2020a. Disponível em: <https://www.autonics.com/model/A1750000027>. Acesso em: 11 mar. 2023.

AUTONICS CORPORATION (Republic Of Korea) (org.). **FTS2-320-05**: Fiber Optic Units. 2020b. Disponível em: <https://www.autonics.com/model/A1700000036>. Acesso em: 11 mar. 23.

BALLUFF CONTROLES ELÉTRICOS LTDA (Indaiatuba) (org.). **Sensores Magnetostritivos**: Confiável mesmo em longas trilhas e em condições difíceis, 2023. Disponível em: <https://www.balluff.com/pt-br/products/areas/A0001/groups/G0116>. Acesso em: 14 jul. 2022.

BAUMER DO BRASIL LTDA (São Paulo). **Functionality and Technology of Magnet and Zylinder Sensors**: Magnetic sensors. 2022. Disponível em: https://www.baumer.com/br/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-magnet-and-zylinder-sensors/a/Know-how_Function_Magnet-cylinder-sensors. Acesso em: 15 jan. 2022.

BEAVER, R J; ADAMSON, G M; PATRIARCA, P (comp.). **Procedures for Fabricating Aluminium-Base ATR Fuel Elements**. 30. ed. Washington D.C: Oak Ridge National Laboratory, 1964. 86 p.

BÍBLIA, A. T. Levítico. In BÍBLIA. Português. **A Bíblia Sagrada**: Antigo e Novo Testamentos. Tradução de João Ferreira de Almeida. Brasília: Sociedade Bíblia do Brasil, 1988. p. 116.

BIPM - BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. **Système International d'Unités**: SI. Sèvres, 2006. 88 p. 8th edition - Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre.

BUSCH, Ted. **Fundamentals of Dimensional Metrology**. 2. ed. New York: Delmar Publishers Inc., 1989. 723 p. Wilkie Brothers Foundation.

CARDARELLI, Francois. **Encyclopaedia of Scientific Units, Weights, and Measures**: Their SI equivalences and origins. London: Springer-Verlag London Limited, 2003. página 5, tabela 2.1, dados de Giacomo, P., Du Platine a la Lumiere, Bull. Bur. Nat. Metrologie, 102 (1995) 5–14.

CAVACO, Marco Antônio Martins. **Metrologia**: Parte II. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 169 p. Laboratório de Metrologia e Automatização.

CCL - COMITÉ CONSULTATIF DES LONGUEURS. Comité International des Poids et Mesures (org.). **Mise en Pratique for the Definition of the Metre in the SI**. In: France. Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre. Bureau International des Poids et Mesures (org.). Le Système International d'Unités: SI. 8. ed. France: BIPM, 2019. p. 1-22. Appendix 2.

CITISYSTEMS (Sorocaba) (org.). **Servo Motor**: Veja como funciona e quais os tipos. 2020. Elaborado por Cristiano Bertulucci Silveira. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/servo-motor/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

COWAN, Robin. Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in: **The Journal of Economic History**, Cambridge, v. 50, n. 3, p. 541-567, set. 1990.

CRUZ, Amanda Fernandes et al. Processo de Conformação Mecânica por Laminação: Um estudo sobre as principais características desse processo, sob o enfoque do sistema de produção em massa. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 11., 2021, Ponta Grossa. **Anais [...]** Ouro Preto: APREPRO, 2021. p. 1-10.

DELL TECHNOLOGIES (Texas) (org.). **DELL Vostro 3470 i5-9400**: SFF Intel® Core™ i5 8 GB DDR4-SDRAM 256 GB SSD Windows 10 Pro. 2020. Disponível em: https://www.dell.com/pt-br/work/shop/cty/pdp/spd/vostro-3470-desktop/cv3470w_2001206_brmon. Acesso em: 30 jul. 2020.

DELTA ELECTRONICS INC (Taiwan) (org.). **ASDA-A2R Series**. 2023a. Disponível em: <https://www.deltaww.com/en-US/products/Servo-Systems-AC-Servo-Motors-and-Drives/1149>. Acesso em: 17 mar. 2023.

DELTA ELECTRONICS INC (Taiwan) (org.). **DOP-107EV**. 2023b. Disponível em: <https://www.deltaww.com/en-US/products/Touch-Panel-HMI-Human-Machine-Interfaces/4674>. Acesso em: 17 mar. 2023.

DELTA ELECTRONICS INC (Taiwan) (org.). **PLC**: Programmable Logic Controller. 2023c. Disponível em: <https://www.deltaww.com/en-US/products/PLC-Programmable-Logic-Controllers/>. Acesso em: 17 mar. 2023.

DUARTE, Juliana P.; OLIVA, Jose de Jesus Rivero; MELO, Paulo Fernando F. Frutuoso e. Generation IV Nuclear Systems: State of the art and current trends with emphasis on safety and security features. **Current Research in Nuclear Reactor Technology in Brazil and Worldwide**, [s.l.], p. 143-174, 6 fev. 2013. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/53140>.

DURAZZO, Michelangelo. **Corrosão de Placas Combustíveis Tipo MTR Contendo Núcleos de Cermets U₃O₈-Al**. 1985. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

DURAZZO, M.; SOUZA, J.A.B.; CARVALHO, E.F. Urano de; RIELLA, H.G.. Effect of Porosity on the Manufacturing of U₃O₈-Al Dispersion Fuel Plates. **Progress In Nuclear Energy**, São Paulo, v. 99, p. 49-58, ago. 2017a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.05.001>.

DURAZZO, M.; VIEIRA, E.; CARVALHO, E.F. Urano de; RIELLA, H.G.. Evolution of fuel plate parameters during deformation in rolling. **Journal Of Nuclear Materials**, [S.L.], v. 490, p. 197-210, jul. 2017b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.04.018>.

DURAZZO, M.; UMBEHAUN, P.e.; TORRES, W.M.; SOUZA, J.A.B.; SILVA, D.G.; ANDRADE, D.A.. Procedures for manufacturing an instrumented nuclear fuel element. **Progress In Nuclear Energy**, [S.L.], v. 113, p. 166-174, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2019b.01.021>.

DURAZZO, Michelangelo; RAMANATHAN, Lalgudi V.. Corrosão do Combustível do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do IPEN. In: International Corrosion Meeting, 2., 2008b, Recife. **Anais [...]**. Recife: Abraco, 2008. p. 1-18.

DURAZZO, Michelangelo; RIELLA, Humberto Gracher. **Procedures for Manufacturing Nuclear Research Reactor Fuel Elements**. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2015. 242 p.

EA - EUROPEAN ACCREDITATION. **Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration**: EA-4/02. Paris, 2013. 75 p.

EC - EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Research and Innovation, Campas, J., Dienenthal, A. **Online Control: Hot Rolling of Heavy Plates: Thickness Measurement**: Final report, publications Office. Brussels, 2003. 170 p. (Technical Steel Research). Science Research Development.

EC - EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Research and Innovation, Kirsch, H., Wester, R. Bodefled. **Rolling Flat Products**: Automatic recognition and quantification of flatness defects at heavy plates after a water cooling treatment for online optimization of the cooling process. Final report, publications Office. Brussels, 2002. 170 p. (Technical Steel Research). Science Research Development.

ELASTISENSE APS (Denmark) (ed.). **Sensor Solutions**: EDS displacement sensors. 2022. Disponível em: <https://elastisense.com/sensor-solutions>. Acesso em: 20 jul. 2022.

EREN, Halit (ed.). **Inductive Displacement Sensors**. In: WEBSTER, John G.; Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Electromagnetic, optical, radiation, chemical, and biomedical measurement. 2. ed. Flórida: Crc Press, 2017. p. 1-22.

FABERT, M.; GALLAIS, L.; PONTILLON, Y.. On-line Deformation Measurements of Nuclear Fuel Rod Cladding Using Speckle Interferometry. **Progress In Nuclear Energy**. Amsterdam, p. 44-48. abr. 2014.

FAGOR AUTOMATION (Spain) (ed.). **Encoders**: Lineales y Rotativos, Gama Estándar. Mondragón, 2023. 20 p.

FARAGO, Francis T; CURTIS, Mark A. **Handbook of Dimensional Measurement**. 3. ed. New York: Industrial Press Inc, 1994. 608 p.

FERRUFINO, Felipe Bonito Jaldin. **Determinação Quantitativa da Homogeneidade da Distribuição de Urânio em Combustíveis Nucleares Tipo Placa**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Materiais, Centro do Combustível Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

FROTA, Maurício Nogueira; OHAYON, Pierre (ed.). **Padrões e Unidades de Medida: Referências metrológicas da França e do Brasil**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 1999. 120 p. Produzido a partir do original *Étalons et Unités de Mesure* (1997).

GILL, Hurley. **Servo Motor or Stepper Guide: Which to choose?:** Kollmorgen Corporation, 2021. 11 p.

GONZÁLES, Carlos Gonzáles; VÁZQUEZ, José Ramón Zeleny. **Metrología**. 2. ed. Mexico: Magraw-hill Interamericana Editores S.a de C.v., 1998. 446 p.

GTP - GLOBAL TUNGSTEN & POWDERS CORP . **Tungsten Carbide Technical Bulletin**. Towanda, 2008. Disponível em: <http://https://www.globaltungsten.com/fileadmin/user_upload/home/Technologies/Tungsten_Carbide_Towanda.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2020.

HATZFELD, Christian; KERN, Thorsten A. (ed.). **Engineering Haptic Devices: A beginner's guide**. 2. ed. Germany: Springer Science+Business Media, 2014. 596 p. (Springer Series on Touch and Haptic Systems).

HBK - Hottinger Brüel & kjaer (ed.). **Transdutor de Deslocamento DD1: Medindo deslocamento e deformação com uma classe de precisão de 0.1**. 2022. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/2514/dd1-sensor-de-deformacao-e-deslocamento/?product_type_no=DD1:%20Sensor%20de%20deforma%C3%A7%C3%A3o%20e%20deslocamento%20de%20precis%C3%A3o. Acesso em: 01 jun. 2022.

HBM - Test and Measurement (Darmstadt). Spectris Plc (ed.). **What is a Fiber Bragg Grating?**. 2022. Disponível em: <https://www.hbm.com/en/4596/what-is-a-fiber-bragg-grating/>. Acesso em: 20 ago. 2022.

DR. JOHANNES HEIDENHAIN, GMBH (Germany) (org.). **Length Gauges**. Traunreut: Heidenhain, 2021. 44 p.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (Austria) (org). **Benchmarks of Fuel Burnup and Material Activation Computational Tools Against Experimental Data for Research Reactors.** 1992 ed. Vienna: IAEA Library, 2022a. 278 p. (IAEA TECDOC).

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (Austria) (org.). **Nuclear Power Reactors in the World.** 42. ed. Vienna: IAEA Library, 2022b. 102 p. (RDS 2-42).

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (Vienna) (org.). **Research Reactor Database:** RRBD. 2023. Disponível em: <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>. Acesso em: 29 mar. 2023.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (org.). **Research Reactor Core Conversion Guidebook:** Volume 4: Fuels (Appendices I-K): Vienna: IAEA, 1992. 594 p. (IAEA-TECDOC-643).

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. (org.). **Standardization of Specifications and Inspection Procedures for LEU Plate-Type Research Reactor Fuels.** Vienna: IAEA, 1988. 35 p. (IAEA-TECDOC-467).

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEV - International Electrotechnical Vocabulary:** Part 311 - General terms relating to measurements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2001. 267 p.

ILAC - INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION. **ILAC Policy for Uncertainty in Calibration:** ILAC-P14:01/2013. Silverwater, 2013. 14 p.

INAMEQ - Indonesia Marine Equipment (Indonesia) (ed.). **What are Proximity Marine Sensors?** 2022. Disponível em: <https://inameq.com/engine-system/marine-sensor/what-proximity-sensors/>. Acesso em: 16 jul. 2022.

INFOMET - (Rio de Janeiro). Universidade Federal do Rio de Janeiro (ed.). **Aços & Ligas:** Processos de fabricação e processo siderúrgico. 1998. Elaborada por: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=238>. Acesso em: 25 fev. 2023.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **A Estimativa da Incerteza de Medição pelos Métodos do ISO GUM 95 e de Simulação de Monte Carlo.** Rio de Janeiro, 2008. 33 p. Nota Técnica DIMEC/nt02/v00.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Metrologia Científica**: Estrutura hierárquica de rastreabilidade. 2012a. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/estrutura.asp>. Acesso em: 30 de maio de 2020.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Metrologia Científica**: Metrologia. 2012b. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/estrutura.asp>. Acesso em: 25 de maio de 2020.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **VIM**: Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Edição luso-brasileira, autorizada pelo BIPM, da 3ª edição internacional do VIM - International Vocabulary of Metrology - JCGM 200:2012. 1 ed. Duque de Caxias: INMETRO, 2012c. 94 p.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.). **Análise Dimensional Externa da Placa Combustível de U_3Si_2** : Instrução Nº IT-CCN-1001.01 - FM-CCN-1001-05 V1. 0 ed. São Paulo: IPEN, 2018. 01 p.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.). **Com Novo Núcleo, Reator IPEN/MB-01 Recebe Autorização de Operação Permanente da CNEN**. 2020. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=38&campo=13402. Acesso em: 01 out. 2020.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.). **Elemento Combustível que vai Simular o RMB é Lançado no IPEN**: IPEN, 2017. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=38&campo=9170. Acesso em: 10 jul. 2020.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.). **Placa Combustível Externa**: Elemento Combustível IEA-R1: Desenho R19-IPN-213PR-2DJ-002-Rev06. São Paulo: IPEN, 2014a. 01 p.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.). **Placa Combustível Externa**: Elemento Combustível IPEN/MB01: Desenho IPEN-CEN-PSE-RMB-005-00-QC-002-Rev01. São Paulo: IPEN, 2017a. 01 p.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.). **Placa Combustível Interna**: Elemento Combustível IEA-R1: Desenho R19-IPN-213PR-2DJ-003-Rev06. São Paulo: IPEN, 2014b. 01 p.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.).
Placa Combustível Interna: Elemento Combustível IPEN/MB01: Desenho IPEN-CEN-PSE-RMB-005-00-QC-003-Rev01. São Paulo: IPEN, 2017b. 01 p.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - (org.).
Reator Multipropósito Brasileiro: IPEN, 2016. Disponível em:
https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=2773. Acesso em: 10 jul. 2020.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1:**
Geometrical product specifications (GPS) - Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties. 4 ed. Geneva: ISO, 2022. 6 p.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14.253-1:**
Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications. 3 ed. Geneva: ISO, 2017. 23 p.

JAMONE, Lorenzo; NATALE, Lorenzo; METTA, Giorgio; SANDINI, Giulio. Highly Sensitive Soft Tactile Sensors for an Anthropomorphic Robotic Hand. **IEEE**

JCGM - JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY - Working Group 1.
Evaluation of Measurement Data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Sèvres, 2008. 134 p. (JCGM 100:2008). Copyright shared jointly by the JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML).

JCGM - JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY - Working Group 1.
Evaluation of Measurement Data: the role of measurement uncertainty in conformity assessment. Sèvres, 2012. 57 p. (JCGM 106:2012). Copyright shared jointly by the JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML).

JIS - JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **JIS B 7506 (JMA):** Gauge blocks. Tokyo: Japanese Standards Association, 2004. 34 p.

JONES, Barry E. Sensors in Industrial Metrology. **Journal Of Physics:** Scientific instruments, Bristol, v. 20, n. 9, p. 1113-1126, set. 1987.

JUNG, Youngdo; LEE, Duck-Gyu; PARK, Jonghwa; KO, Hyunhyub; LIM, Hyuneui. Piezoresistive Tactile Sensor Discriminating Multidirectional Forces. **Sensors**, [S.L.], v. 15, n. 10, p. 25463-25473, 2 out. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s151025463>.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Campinas) (ed.). **Drive de Motor de Passo STR8**. 2020a. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/drive-de-motor-de-passo-str8/>. Acesso em: 11 março 2023.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Campinas) (ed.). **Motor de Passo Nema 23**: Torque 3Nm. 2020b. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-nema-23-3nm/>. Acesso em: 11 março 2023.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Campinas) (ed.). **Motor de Passo Nema 34 IP65**. 2020c. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-nema-34-ip65/>. Acesso em: 11 março 2023.

KALATEC AUTOMAÇÃO (Campinas) (ed.). **Servo Delta ECMA-C20604**. 2020d. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/servo-motor-delta-ecma-c20604/>. Acesso em: 11 março 2023.

KAUFMANN, Albert R (ed.). **Nuclear Reactor Fuel Elements**: Metallurgy and fabrication. New York: John Wiley & Sons, 1962. 740 p.

KEISER, Dennis D.; WILLIAMS, Walter; ROBINSON, Adam; WACHS, Dan; MOORE, Glenn; CRAWFORD, Doug. Detailed Measurements of Local Thickness Changes for U-7Mo Dispersion Fuel Plates with Al-3.5Si Matrix After Irradiation at Different Powers in the RERTR-9B Experiment. **Journal Of Nuclear Materials**, [s.l.], v. 494, p. 448-460, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.047>.

KESTER, Walt et al. Sensor Signal Conditioning. In: JUNG, Walt (ed.). **Op Amp Applications Handbook**: Analog devices. Wilmington: Newnes / Elsevier, 2005. Cap. 4. p. 41-492.

KEYENCE UK Ltd (United Kingdom). Keyence Corporation (ed.). **1D Laser Displacement Sensors**. 2022. Disponível em: https://www.keyence.co.uk/ss/products/measure/measurement_library/type/laser_1d/. Acesso em: 14 maio 2022.

KOVALEVSKY, Jean. Préface. In: CHAMBON, Maguelonne; FRIOUS, Françoise Le; SIGALA, Michel. **Étalons et Unités de Mesure**: Les bases de la métrologie en France. 2. ed. Paris: Bureau National de Métrologie, 1997. p. 07-08.

KUPPUSWAMY, Naveen; ALSPACH, Alex; UTTAMCHANDANI, Avinash; CREASEY, Sam; IKEDA, Takuya; TEDRAKE, Russ. Soft-bubble Grippers for Robust and Perceptive Manipulation. **2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, [S.L.], p. 9917-9924, 24 out. 2020. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iros45743.2020.9341534>.

LARSON, C.; PEELE, B.; LI, S.; ROBINSON, S.; TOTARO, M.; BECCAI, L.; MAZZOLAI, B.; SHEPHERD, R.. Highly Stretchable Electroluminescent Skin for Optical Signaling and Tactile Sensing. **Science**, [S.L.], v. 351, n. 6277, p. 1071-1074, 4 mar. 2016. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac5082>.

LINK, Walter. **Tópicos Avançados da Metrologia Mecânica: Confiabilidade metrológica e suas aplicações**. São Paulo: INMETRO, 2000. 265 p.

LIRA, Francisco Adval de. **Metrologia na Indústria**. 10. ed. São Paulo: Editora Saraiva Educação, 2015. 256 p. 3ª tiragem 2017 - Revisada.

LU, Mingyang; MENG, Xiaobai; YIN, Wuliang; QU, Zhigang; WU, Fanfu; TANG, Jiawei; XU, Hanyang; HUANG, Ruochen; CHEN, Ziqi; ZHAO, Qian. Thickness Measurement of Non-magnetic Steel Plates Using a Novel Planar Triple-coil Sensor. **NDT & E International**, [S.L.], v. 107, p. 102148, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102148>.

LUXON, James T; PARKER, David e. Introduction to the Laser. In: LUXON, James T; PARKER, David e. **Industrial Lasers and Their Applications**. New Jersey: Prentice-hall, 1985. p. 78-83

MARPOSS S.P.A. (Italy) (ed.). **Pneumatic Gauges for Internal Diameters: M1 air**. 2022. Disponível em: <https://www.marposs.com/eng/product/pneumatic-gauges-for-internal-diameters>. Acesso em: 16 jul. 2022.

MATWEB - MATERIAL PROPERTY DATA. **Aluminum 6061-T6: 6061-T651**. Blacksburg, 1999. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a>. Acesso em: 10 jul. 2020.

MEDLOCK, R s. Recent Advances in Industrial Measurement Techniques. **Measurement And Control**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 6-13, abr. 1987. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/002029408702000301>.

MEGATRON ELEKTRONIK GMBH & CO. (München) (ed.). **Linearpotentiometer**: Potentiometrische lineare positionssensoren zur wegmessung. 2022a. Disponível em: <https://www.megatron.de/kategorie/potentiometrische-positionssensoren.html>. Acesso em: 10 jul. 2022.

MEGATRON ELEKTRONIK GMBH & CO. (München) (ed.). **Induktiver Wegsensor EVT**: Robuster miniatur-wegsensor für kleine messwege von 1,3 mm bis 25 mm in erschwerten umgebungsbedingungen (max. IP68 / druckdicht max. 30 bar). 2022b. Disponível em: <https://www.megatron.de/en/products/inductive-position-sensors/inductive-linear-transducer-evt.html>. Acesso em: 10 ago. 2022.

MINGFEI, Gu; YINGHUA, Yu; LUQUAN, Wang; XUEBIN, Huang; SITONG, Peng. **Nuclear Fuel Material Board Thickness Automatic Detection Device**. Titular: Nuclear Power Institute of China. CN n. CN101169319. Depósito: 11 dez. 2007. Concessão: 19 maio 2010. State Intellectual Property Office, p. 1-6, 2010.

MITUTOYO CORPORATION (Japan) (ed.). **Linear Displacement Sensors**: Linear gage. Kawasaki: Mitutoyo Corporation, 2018. 60 p. (E13007(4)).

MOHAMED, Kelash H.; ABDOU, Berbar M.; MOHAMED, Elaraby S.; HASSAN, Hassan A.. Automated Image Analysis System for Homogeneity Evaluation of Nuclear Fuel Plates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS AND BRAIN, 1., 2005, Beijing. **Anais [...]**. S.l.: IEEE, 2005. p. 1178-1183.

NIJSSE, Gert-Jan. **Linear Motion Systems**: A modular approach for improved straightness performance. Delft University Press, 2001. 255 p.

NIST - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results**: NIST Technical Note 1297. Gaithersburg, 1994. 25 p.

NOLL, R.; KRAUHAUSEN, M.. Online Laser Measurement Technology for Rolled Products. **Ironmaking & Steelmaking**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 221-227, abr. 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/174328108x284543>.

OBR - EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. (Santa Catarina) (org.). **Guias Lineares**. Joinville: OBR Equipamentos Industriais Ltda, 2017. 54 p.

PACHECO, Clara Johanna. **Sensores de Campo Magnético à Fibra Óptica com Redes De Bragg**. 2011. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Física, Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PARK, Seung-kyu; PARK, Nak-gyu; BAIK, Sung-hoon; KANG, Young-june. Visualization of Internal Defects in Plate-Type Nuclear Fuel by Using Noncontact Optical Interferometry. **Nuclear Engineering and Technology**, [s.l.], v. 45, n. 3, p. 361-366, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.5516/net.05.2012.065>.

PUHLMANN, Henrique Frank Werner. **O que são Sensores Magnetostrictivos?** 2014. Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Centro de Tecnologia da Informação, Automação e Mobilidade. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277954179_O_que_sao_sensores_magnetostrictivos. Acesso em: 16 jul. 2022.

PUTTOCK, M. J.; THWAITE, E. G.. **Elastic Compression of Spheres and Cylinders at Point and Line Contact**. Melbourne: Commonwealth Scientific And Industrial Research Organization, 1969. 64 p. National Standards Laboratory Technical Paper Nº 25.

RAGHAVENDRA, N.V.; KRISHNAMURTHY, L.. **Engineering Metrology and Measurements**. New Delhi: Oxford University Press, 2013. 547 p.

RENISHAW Plc, (ed.). **Interferometry Explained**. 2022. Disponível em: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>. Acesso em: 14 maio 2022.

RIBEIRO, Álvaro Silva; GÖLZE, Manfred. **Decision Rules Applied to Conformity Assessment**. Brussels: Eurolab General Secretariat, 2017. 14 p. (Technical Report 1/2017).

SALSBURY, James G.. **Test Uncertainty**: Guide to the evaluation of measurement uncertainty in the conformity assessment of measuring instruments. 2. ed. Illinois: Mitutoyo America Corporation, 2022. 90 p. (EDU-510-20).

SCHÖDEL, René; YACOOT, Andrew; LEWIS, Andrew. The New Mise en Pratique for the Metre: A review of approaches for the practical realization of traceable length metrology from 10–11 m to 1013 m. **Metrologia**, Braunschweig, v. 58, n. 5, p. 052002, 5 ago. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1681-7575/ac1456>.

SCHOELER, Nelson; FIDÉLIS, Gilberto Carlos; KLEN, Edmilson Rampazzo; SOARES, Gilberto Gualberto. **Qualificação e Certificação de Instrumentos de Medição**. Florianópolis: Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras, 1999. 140 p. Apostila.

SCHOELER, Nelson. **Incerteza de Medição**. Florianópolis: Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras, 2002. 121 p. Apostila.

SILFVAST, William T. Lasers. In: CHANDRA ROYCHOUDHURI (Washington). The International Society for Optics and Photonics (Ed.). **Fundamentals of Photonics**. Bellingham: SPI Digital Library, 2008. p. 44.

SURYA, Johannes (ed.). **Types of Proximity Sensors**. 2021. Sinaumedia. Disponível em: <https://sinaumedia.com/types-of-proximity-sensors/>. Acesso em: 16 jul. 2022.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED (Dallas) (ed.). **Ultrasonic Sensing Basics**. Texas: Texas Instruments, 2021. 15 p.

TOURNANT, Audrey; MAGRE, Frederic Alain; LORIOT, Benjamin. **Method for Controlling the Positions of Nuclear Fuel Assemblies Inside a Nuclear Reactor Core, and Corresponding Control Assembly**. Titular: United States Patent and Trademark Office. FR n. 10.083.768 B2. Depósito: 26 jul. 2011. Concessão: 08 abr. 2013. USPTO, p. 1-7, 2018.

TRIOPTICS GMBH (Germany) (ed.). **TriAngle**: Electronic autocollimator for precise optical angle measurement. 2022. Disponível em: <https://trioptics.com/products/triangle-electronic-autocollimators/>. Acesso em: 14 maio 2022.

UKAS - UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. **Decision Rules and Statements of Conformity**: LAB 48. 4. Ed. Middlesex, 2022. 47 p.

UKAS - UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. **The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement**: M3003. Middlesex, 2019. 81 p.

VUOLO, José Henrique. **Fundamentos da Teoria de Erros**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1996. 249 p.

WAAG, Grunde; HOFF, Lars; NORLI, Petter. Air-coupled Ultrasonic Through-Transmission Thickness Measurements of Steel Plates. **Ultrasonics**, [S.L.], v. 56, p. 332-339, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2014.08.021>.

WALKER, J.. Nuclear Reactors as Research Instruments. **Reports on Progress in Physics**, Birmingham, v. 30, p. 285-332, 01 jan. 1967.

WARD-CHERRIER, Benjamin; PESTELL, Nicholas; CRAMPHORN, Luke; WINSTONE, Benjamin; GIANNACCINI, Maria Elena; ROSSITER, Jonathan; LEPORA, Nathan F.. The TacTip Family: Soft Optical tactile Sensors with 3d-Printed Biomimetic Morphologies. **Soft Robotics**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 216-227, abr. 2018. Mary Ann Liebert Inc. <http://dx.doi.org/10.1089/soro.2017.0052>.

WNA - WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (London - United Kingdom) (Org.). **Nuclear Fuel and its Fabrication**: Types of nuclear fuel assemblies for different reactors. 2018. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>>. Acesso em: 14 fev. 2019.

YOSHIOKA, Saijiro; GOTOH, Yuji. Proposal of Thickness Measurement Method of Steel Plate with High Liftoff Using Pulsed Magnetic Field. **IEEE Transactions On Magnetics**, [S.L.], v. 53, n. 11, p. 1-4, nov. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tmag.2017.2717480>.

ZANGL, Hubert; HOERMAIER, Klaus. Educational Aspects of Uncertainty Calculation with Software Tools. **Measurement**, [s.l.], v. 101, p. 257-264, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/J.Measurement.2015.11.005>.

ZAZ, Ghita; CLÉZIO, Emmanuel Le; DEKIOUS, Ali; ALAOUI, Meriem Chrifi; CALZAVARA, Yoann; DESPAUX, Gilles. In Situ High-Resolution Measurement of HFR Nuclear Fuel Plates' Spacing. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, [s.l.], v. 65, n. 11, p. 2776-2783, 11 nov. 2018.

10 GLOSSÁRIO

Ajuste (de um sistema de medição): Conjunto de operações efetuadas num sistema de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados valores de uma grandeza a ser medida (INMETRO, 2012c).

Amplitude de medição: Valor absoluto da diferença entre os valores extremos dum intervalo nominal de indicações. No Brasil, o termo “intervalo de medição” é, por vezes, impropriamente utilizado no lugar de amplitude de medição (INMETRO, 2012c).

Calibração: Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação (INMETRO, 2012c).

Correção: Compensação de um efeito sistemático estimado. A compensação pode assumir diferentes formas, tais como a adição de um valor ou a multiplicação por um fator, ou pode ser deduzida a partir de uma tabela (INMETRO, 2012c).

Deriva (instrumental): Variação da indicação ao longo do tempo, contínua ou incremental, devida a variações nas propriedades metrológicas de um instrumento de medição. A deriva instrumental não está relacionada a uma variação na grandeza medida, nem a uma variação de qualquer grandeza de influência identificada (INMETRO, 2012c).

Detector: Dispositivo ou substância que indica a presença de um fenômeno, corpo ou substância quando um valor limiar de uma grandeza associada for excedido (INMETRO, 2012c).

Erro aleatório: Componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida por sua esperança matemática ou valor esperado, o qual é geralmente assumido como sendo zero, e por sua

variância. O erro aleatório é igual à diferença entre o erro de medição e o erro sistemático (INMETRO, 2012c).

Linearidade (de um instrumento de medição): Capacidade de um instrumento de medição fornecer uma indicação tendo uma relação linear com uma quantidade definida diferente de uma quantidade de influência. O método de expressão da falta de linearidade é diferente para diferentes tipos de instrumentos e é estabelecido em cada instância particular (IEC, 2001).

Erro de medição: Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. Não se deve confundir erro de medição com erro de produção ou erro humano (INMETRO, 2012c).

Erro sistemático: Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. O erro sistemático é igual à diferença entre o erro de medição e o erro aleatório (INMETRO, 2012c).

Erro máximo admissível: Valor extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, admitido por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição (INMETRO, 2012c).

Estabilidade (de um instrumento de medição): Propriedade de um instrumento de medição segundo a qual este mantém as suas propriedades metrológicas constantes ao longo do tempo. A estabilidade pode ser expressa quantitativamente de diversas maneiras (INMETRO, 2012c).

Exatidão (de medição): Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando. A “exatidão de medição” não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando fornece um erro de medição menor (INMETRO, 2012c).

Faixa de medição: Ver Intervalo de medição.

Fator de abrangência: Número maior do que um pelo qual uma incerteza-padrão combinada é multiplicada para se obter uma incerteza de medição expandida. Um fator de abrangência é geralmente simbolizado por k (INMETRO, 2012c).

Grandeza de influência: Grandeza que não é o mensurando, mas que afeta o resultado da sua medição. Entende-se que a definição de grandeza de influência inclui valores associados com padrões de medição, materiais e dados de referência dos quais o resultado de uma medição pode depender, assim como fenômenos com flutuações de curta duração do instrumento de medição e grandezas como temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade (JCGM, 2008)

Histerese: Fenômeno representado por uma curva característica que possui um ramo, denominado ramo ascendente, para valores crescentes da variável de entrada, e um ramo diferente, denominado ramo descendente, para valores decrescentes da variável de entrada (IEC, 2001).

Incerteza definicional: Componente da incerteza de medição que resulta da quantidade finita de detalhes na definição de um mensurando e é a incerteza mínima que se pode obter, na prática, em qualquer medição de um dado mensurando. No Guia ISO/IEC 98-3:2008 e na IEC 60359, este conceito é denominado “incerteza intrínseca” (IEC, 2001).

Incerteza de medição: Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas. A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos e, algumas vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados e são incorporadas componentes de incerteza de medição associadas. Geralmente para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando, assim, a modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada (INMETRO, 2012c).

Incerteza de medição expandida: Produto de uma incerteza-padrão combinada por um fator de abrangência maior do que o número um. |O fator depende do tipo de distribuição de probabilidade da grandeza de saída e da probabilidade de abrangência escolhida (INMETRO, 2012c).

Incerteza intrínseca: Ver incerteza definicional.

Incerteza padrão: Incerteza de medição expressa na forma de um desvio-padrão (INMETRO, 2012c).

Incerteza padrão combinada: Incerteza-padrão obtida ao se utilizarem individuais associadas às grandezas de entrada num modelo de medição. Em caso de correlações entre grandezas de entrada num modelo de medição, as covariâncias também devem ser levadas em consideração no cálculo da incerteza-padrão (INMETRO, 2012c).

Indicação: Valor fornecido por um instrumento de medição ou por um sistema de medição. A indicação é frequentemente dada pela posição de um ponteiro sobre um mostrador para saídas analógicas, por um número apresentado em um mostrador ou impresso para saídas digitais, por uma configuração codificada para saídas em código ou por um valor atribuído a medidas materializadas (INMETRO, 2012c).

Intervalo de abrangência: Intervalo, baseado na informação disponível, que contém o conjunto de valores verdadeiros de um mensurando, com uma probabilidade determinada. Não é recomendável que um intervalo de abrangência seja denominado "intervalo de confiança" para evitar confusão com o conceito estatístico (INMETRO, 2012c).

Intervalo de medição: Conjunto de valores de grandezas da mesma natureza que pode ser medido por um dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza de medição instrumental especificada, sob condições determinadas. No Brasil, o termo adotado para "intervalo" é "faixa". Em Portugal, o termo "gama", adjetivado de "de medição", "de operação", ou "de trabalho", era por vezes utilizado seja com sentido de amplitude de medição, seja como intervalo de medição (INMETRO, 2012c).

Limiar de mobilidade: Maior variação do valor de uma grandeza medida que não causa variação detectável na indicação correspondente. O limiar de mobilidade pode depender, por exemplo, de ruído (interno ou externo) ou de atrito e pode depender também do valor da grandeza medida e de como a variação é aplicada. (INMETRO, 2012c).

Medição diferencial (método de): Método de comparação de medição, baseado na comparação do mensurando com uma quantidade do mesmo tipo tendo um

valor conhecido apenas ligeiramente diferente daquele do mensurando, e medindo a diferença algébrica entre os valores dessas duas quantidades (IEC, 2001).

Precisão (de medição): Grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição, sendo que estas podem ser, por exemplo, condições de repetibilidade, condições de precisão intermediária ou condições de reprodutibilidade (INMETRO, 2012c).

Probabilidade de abrangência: Probabilidade de que o conjunto de valores verdadeiros de um mensurando esteja contido num intervalo de abrangência especificado. Não é recomendável que este conceito seja confundido com o conceito estatístico de nível de confiança, embora o termo “confidence level” seja utilizado em inglês no GUM (INMETRO, 2012c).

Rastreabilidade metrológica: Propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência por intermédio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição. A rastreabilidade metrológica requer uma hierarquia de calibração estabelecida e sua existência não assegura a adequação da incerteza de medição para um dado objetivo ou a ausência de erros humanos (INMETRO, 2012c).

Resolução: Menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente, assim a resolução de um dispositivo mostrador é a menor diferença entre indicações mostradas que pode ser significativamente percebida (INMETRO, 2012c).

Repetibilidade (de medição): Precisão de medição sob um conjunto de condições de repetibilidade de medição, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo (INMETRO, 2012c).

Reprodutibilidade (de medição): Precisão de medição conforme um conjunto de condições de reprodutibilidade de medição, as quais incluem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares (INMETRO, 2012c).

Resultado de medição: Conjunto de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível sobre o conjunto de valores. Um resultado de medição é geralmente expresso por um único valor medido e uma incerteza de medição. Caso a incerteza de medição seja considerada desprezável para alguma finalidade, o resultado de medição pode ser expresso como um único valor medido (INMETRO, 2012c).

Sensibilidade (de um sistema de medição): Quociente entre a variação de uma indicação de um sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida. A variação do valor da grandeza medida deve ser grande quando comparada à resolução (INMETRO, 2012c).

Sensor: Elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida (INMETRO, 2012c).

Sistema de medição: Conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas (INMETRO, 2012c).

Tempo de aquecimento: Duração entre o instante após o qual a fonte de alimentação é energizada e o instante em que o instrumento de medição pode ser usado, conforme especificado pelo fabricante (IEC, 2001).

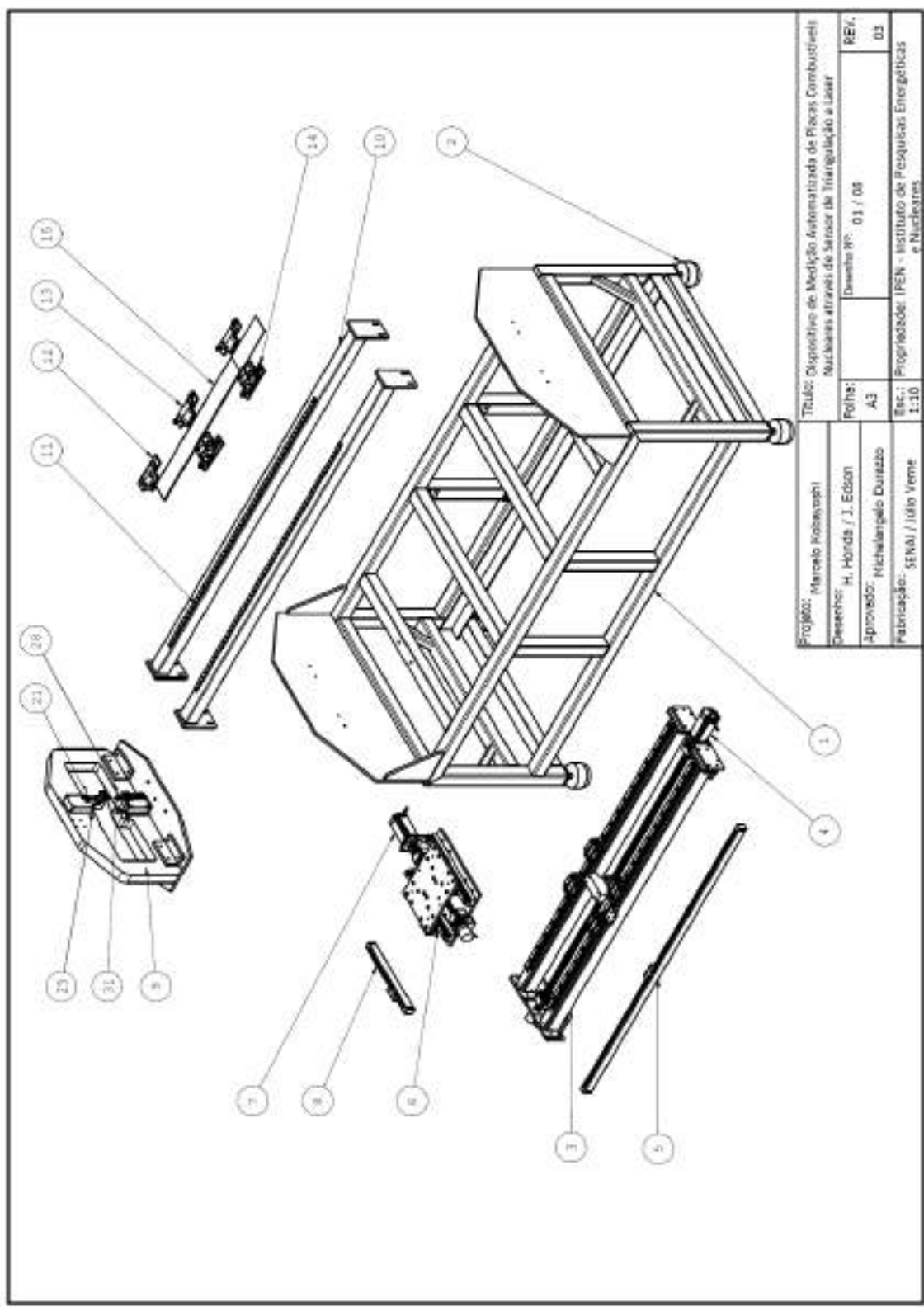
Tendência (instrumental): Diferença entre a média de repetidas indicações e um valor de referência (INMETRO, 2012c).

Valor de uma divisão: Diferença entre os valores do mensurando correspondente a duas marcas de escala consecutivas (IEC, 2001).

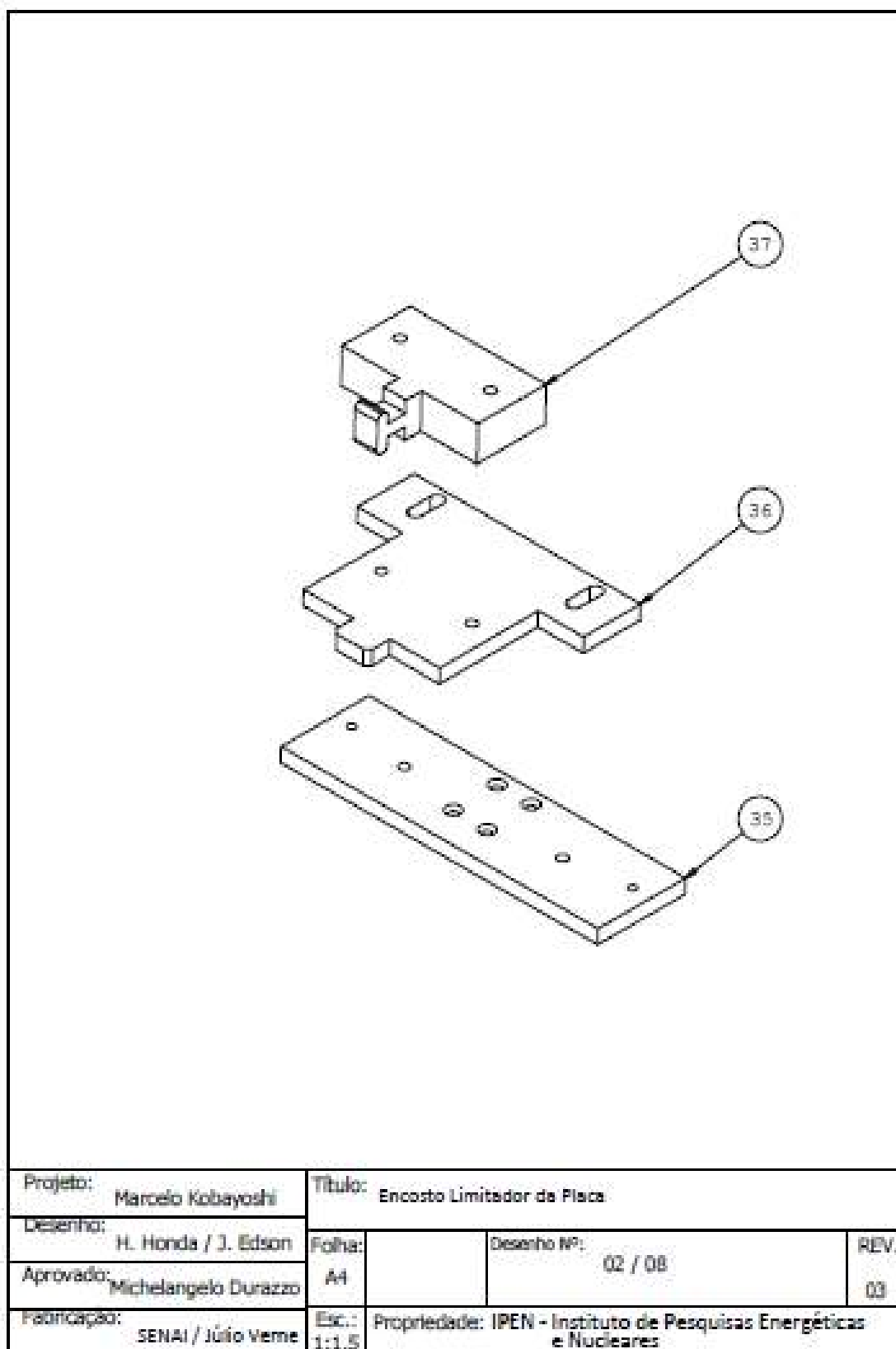
Verificação: Fornecimento de evidência objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados. A verificação não deve ser confundida com calibração e nem toda verificação é uma validação (INMETRO, 2012c).

11 APÊNDICES

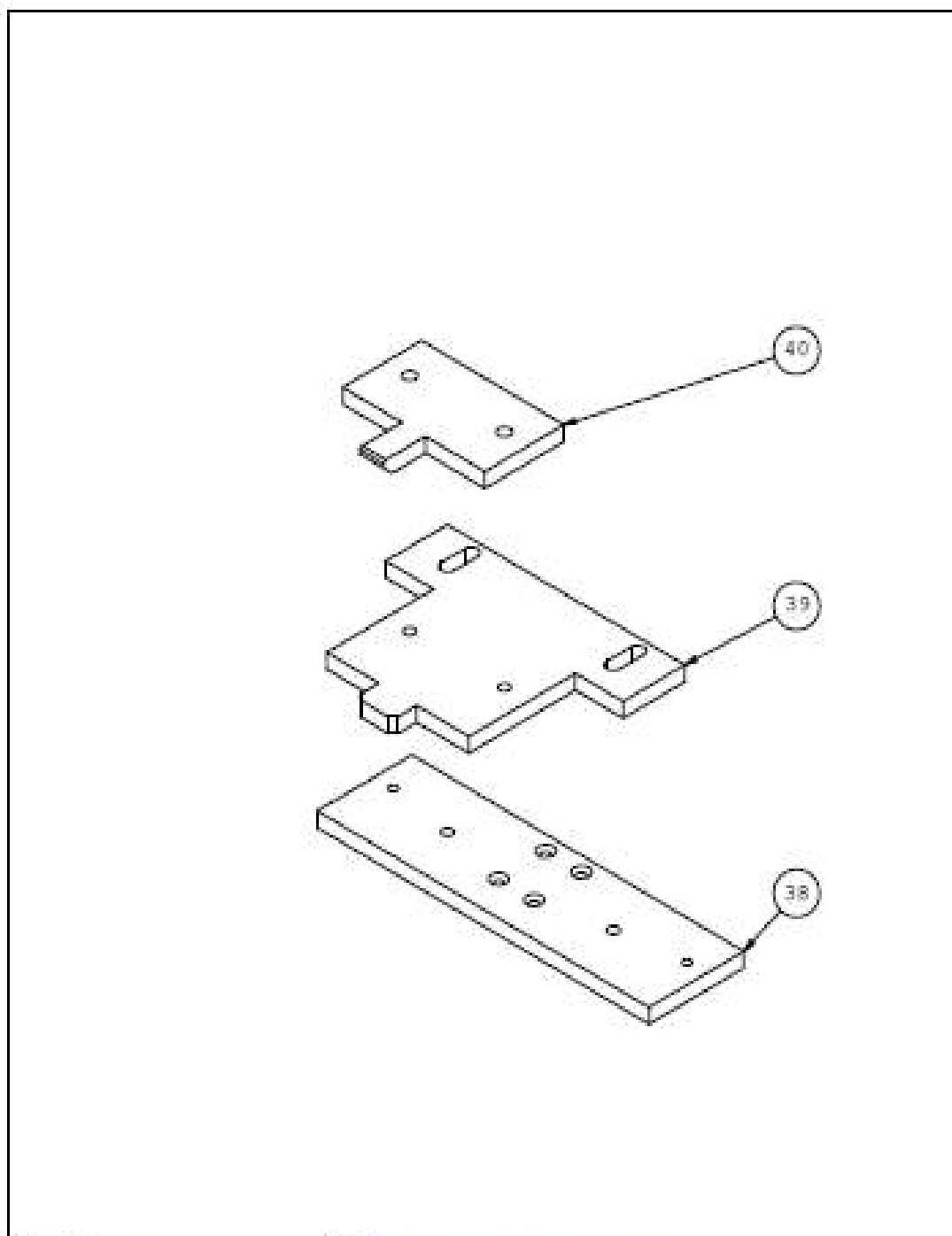
APÊNDICE 01 – Desenho dos Subconjuntos do Equipamento



APÊNDICE 02 – Desenho do Subconjunto Encosto Limitador da Placa

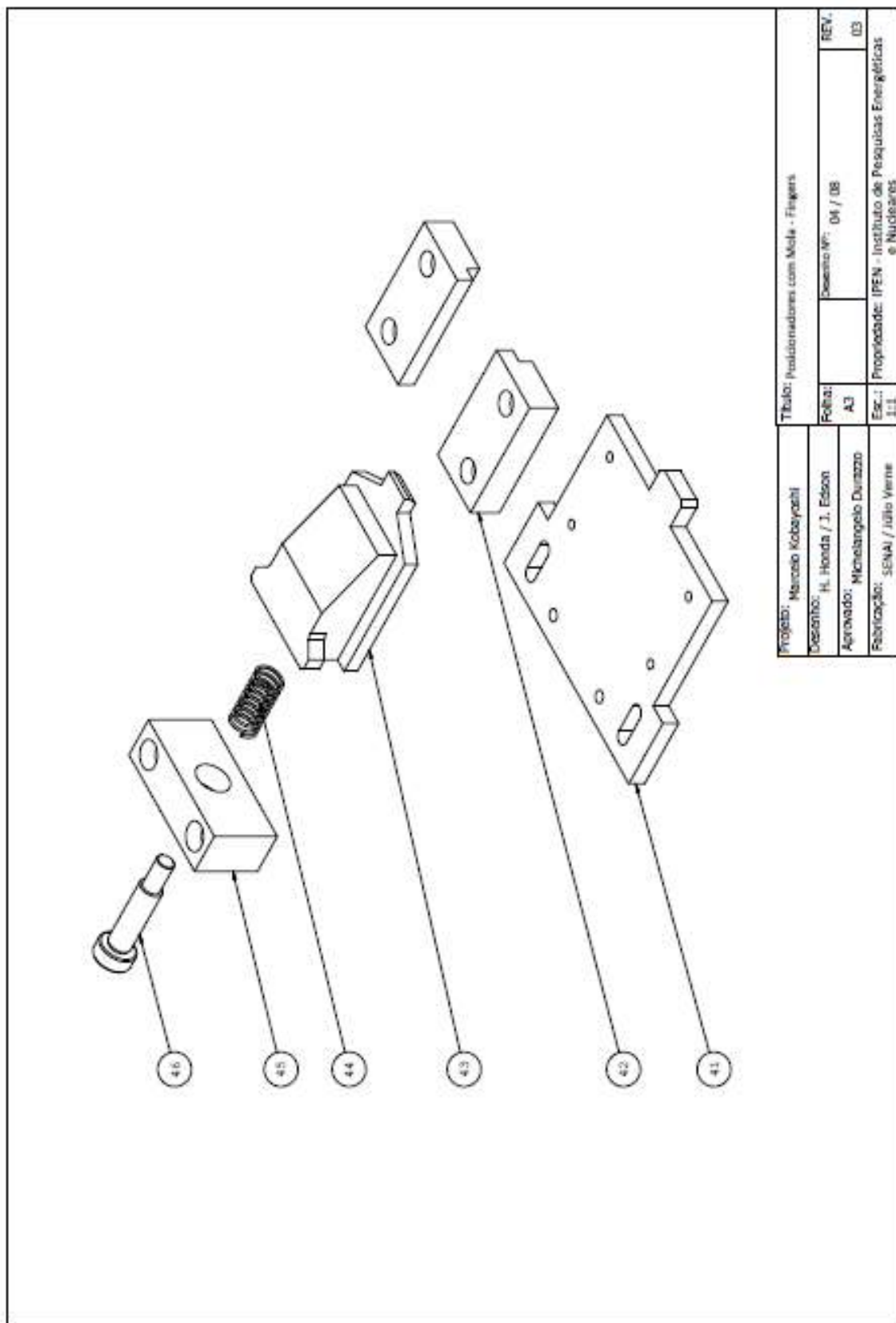


APÊNDICE 03 – Desenho do Subconjunto Posicionador Fixo da Placa



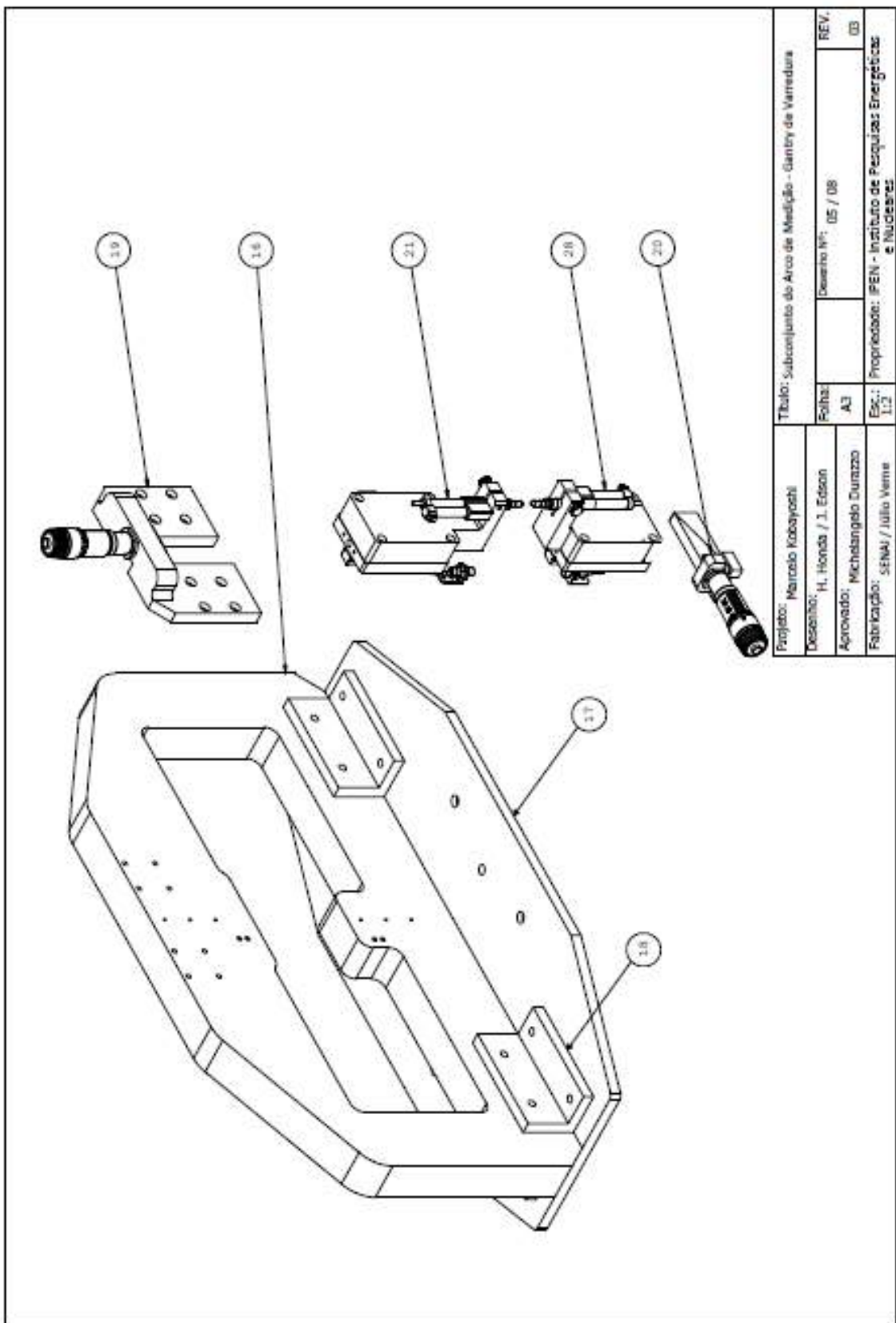
| | | | | |
|-------------|----------------------|---------------------------------------|--|------|
| Projeto: | Marcelo Kobayashi | Título: Posicionadores Fixos da Placa | | |
| Desenho: | H. Honda / J. Edson | Folha: | Desenho Nº: | REV. |
| Aprovado: | Michelangelo Durazzo | A4 | 03 / 08 | 03 |
| Fabricação: | SENAI / Júlio Verne | Esc.: 1:1,5 | Propriedade: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares | |

APÊNDICE 04 – Desenho do Subconjunto Posicionador com Mola da Placa



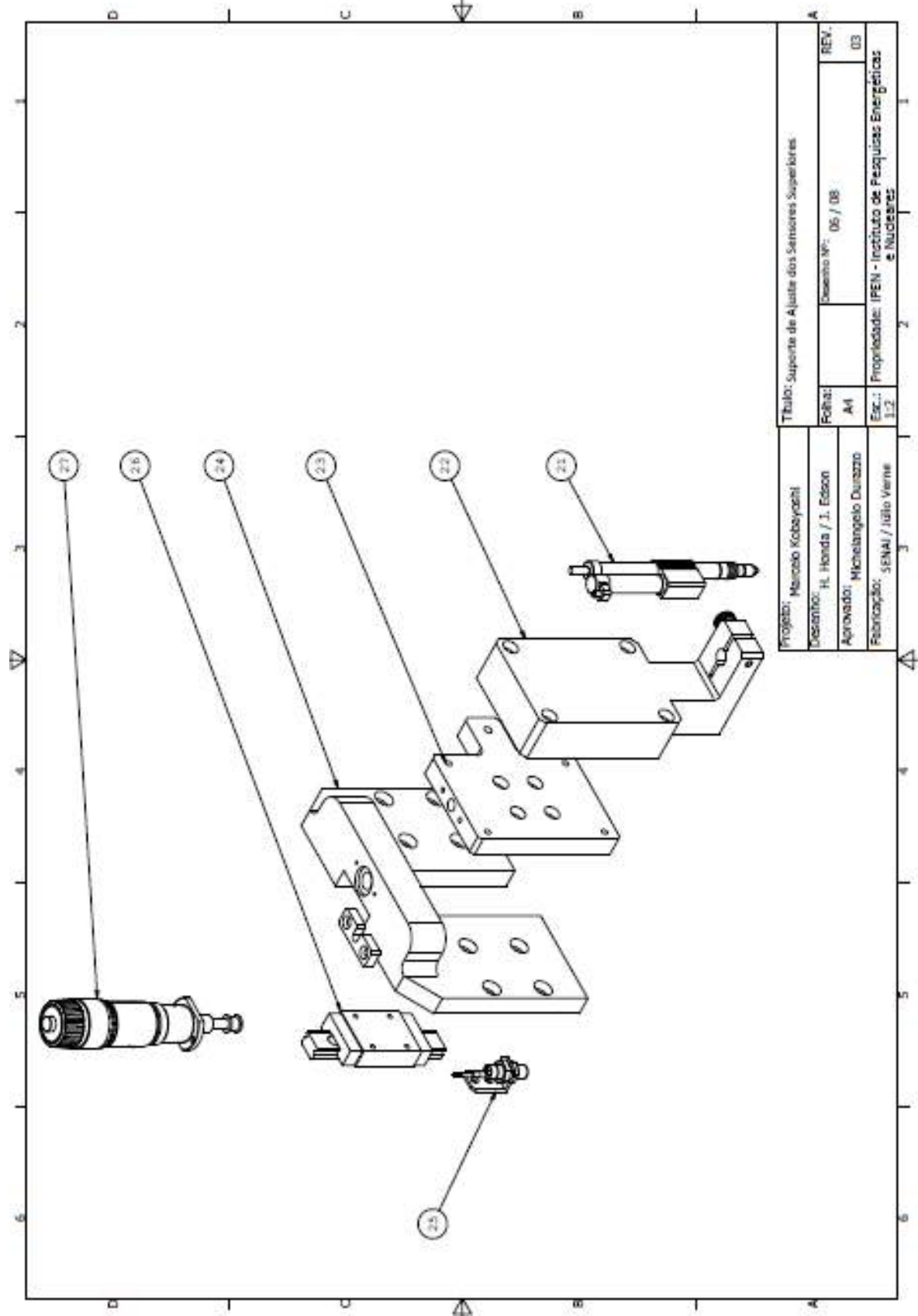
| | | | |
|---------------------------------|-----------|--|---------|
| Projeto: Marcelo Kobayashi | | Título: Posicionadores com Mola - Fingers | |
| Desenho: H. Honda / J. Edson | Folha: A3 | Desenho Nº: 04 / 08 | REV: 03 |
| Aprovado: Michelangelo Durazzo | Esc.: 1:1 | Propriedade: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares | |
| Fabricação: SENAI / Julio Verne | | | |

APÊNDICE 05 – Desenho do Subconjunto do Arco de Medição



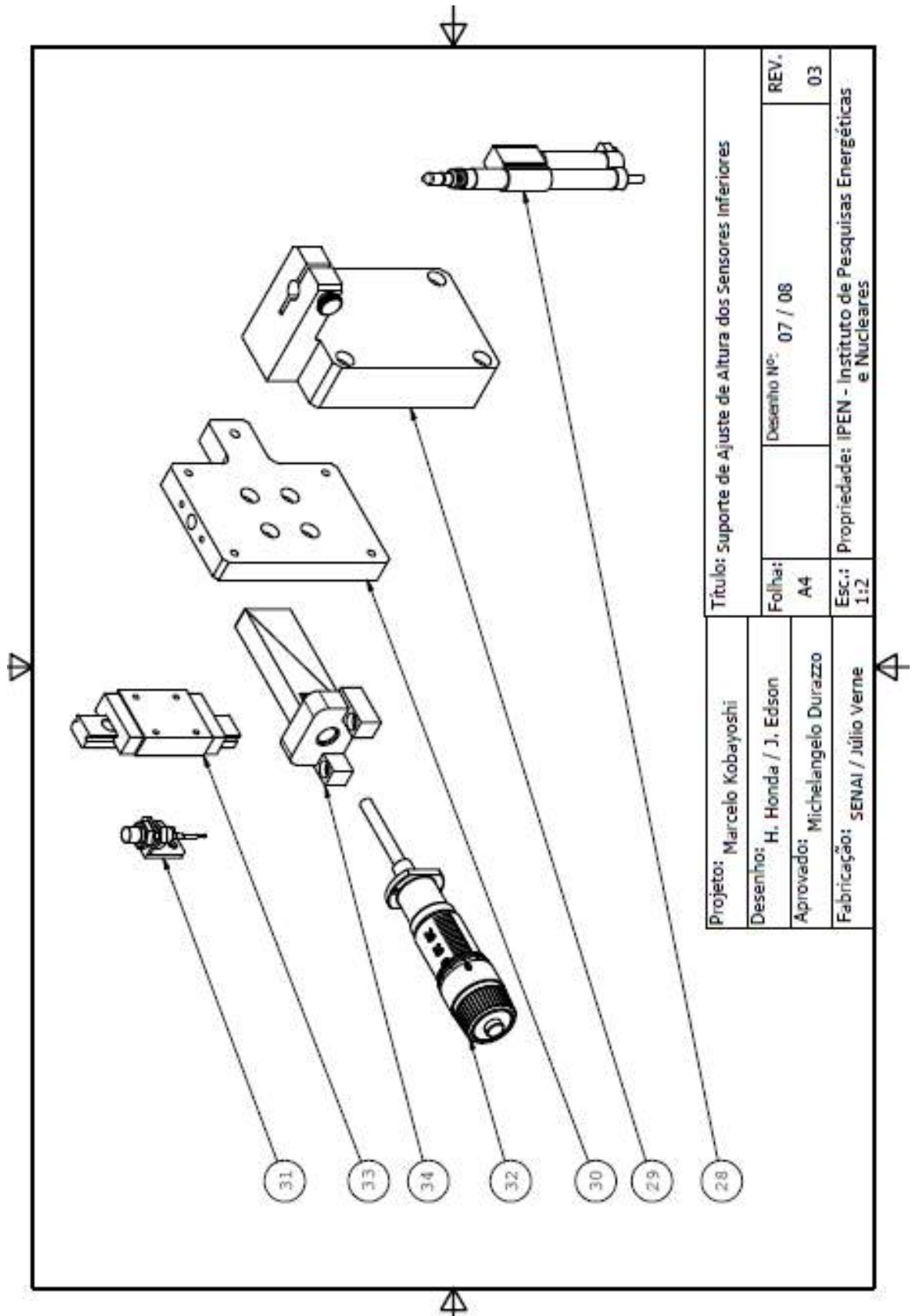
| | | | |
|---------------------------------|--|--|---------|
| Projeto: Marcelo Kobayashi | Título: Subconjunto do Arco de Medição - Gantry de Varredura | | |
| Desenho: H. Honda / J. Edison | Folha: | Desenho Nº: 05 / 08 | REV: 03 |
| Aprovado: Michelangelo Durazzo | A3 | | |
| Fabricação: SENAI / Júlio Verne | Esc.: 1:2 | Propriedade: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e NUCLEBRIS | |

APÊNDICE 06 – Desenho do Subconjunto do Suporte de Ajuste de Altura do Sensor Superior



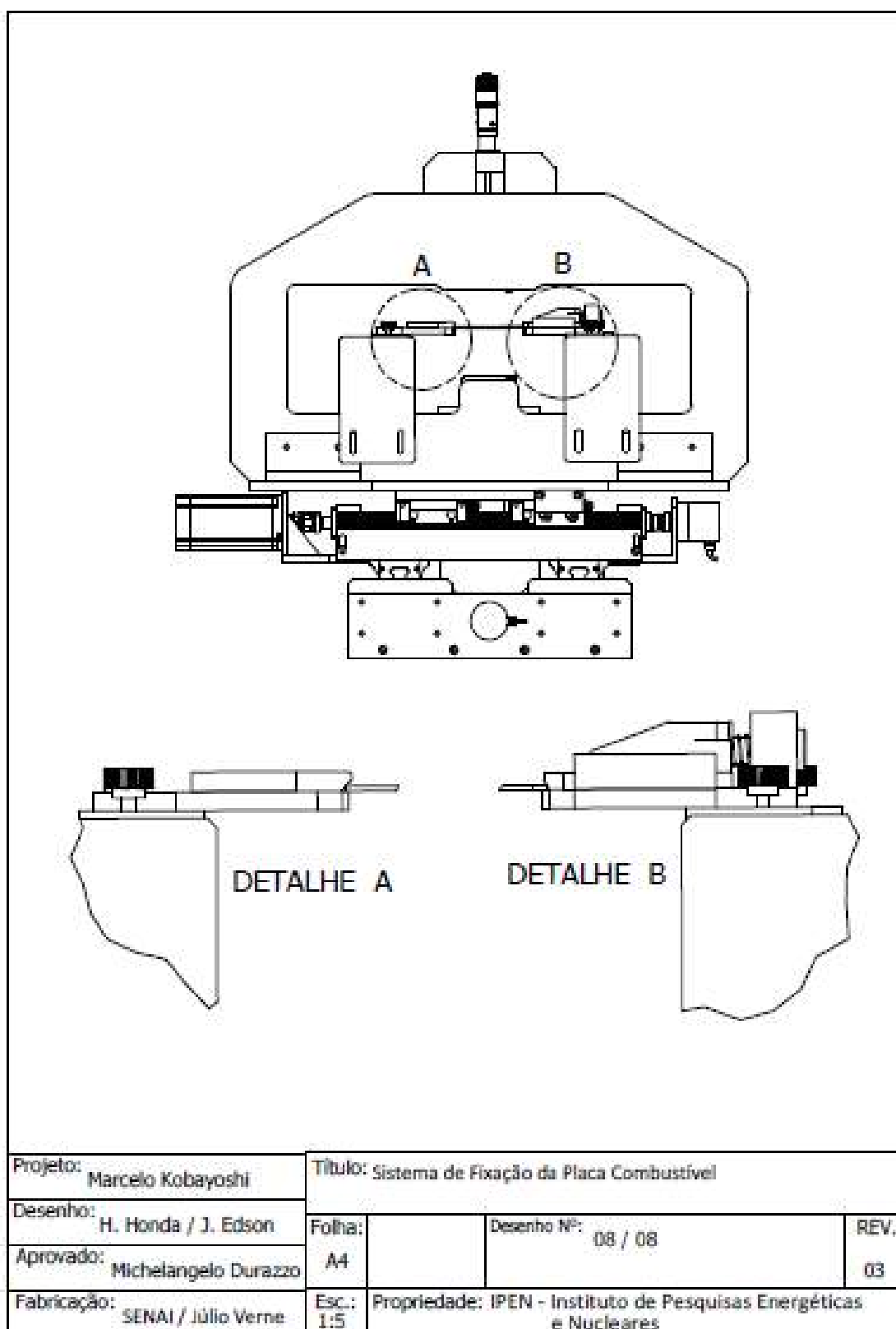
| | | | |
|--------------------------------|--|--|---------------------|
| Projeto: Marcelo Kobayashi | | Título: Suporte de Ajuste dos Sensores Superiores | |
| Desenho: H. Honda / J. Edson | | Folha: A4 | Desenho Nº: 05 / 08 |
| Aprovado: Michelangelo Durazzo | | REV: 03 | |
| Realizado: SENAI / João Verne | | Esc.: Propriedade: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares | |
| | | 1 | 2 |

APÊNDICE 07 – Desenho do Subconjunto do Suporte de Ajuste de Altura do Sensor Inferior



| | | | |
|---------------------------------|--|--|---------------------|
| Projeto: Marcelo Kobayoshi | | Título: Suporte de Ajuste de Altura dos Sensores Inferiores | |
| Desenho: H. Honda / J. Edson | | Folha: A4 | Desenho Nº: 07 / 08 |
| Aprovado: Michelangelo Durazzo | | REV. 03 | |
| Fabricação: SENAI / Júlio Verne | | Esc.: Propriedade: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares | |

APÊNDICE 08 – Desenho dos Subconjuntos de Fixação das Placas



APÊNDICE 09 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição N° Si 1097

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 10 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1097
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1097
- 1.5- Número de Série: Si 1097

2 - Objetivo da Medição:

- Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos.

3 - Normas de referência:

- IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 105 dados adquiridos e analisados.
- Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 10 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1097

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,484 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,470 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,029 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 178$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20°C.

. Início da Medição Horário: 10h00 Temperatura: 19,5 °C

. Término da Medição Horário: 10h20 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 11 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 01/02

Medição Realizada em 39 pontos com 5 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1097

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 10 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1097
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1097
- 1.5- Número de Série: Si 1097

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 39 dados por ciclo, em um total de 195 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 12 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 02/02

Medição Realizada em 39 pontos com 5 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição N° Si 1097

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,486 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,470 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,029 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 106$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
 - . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
 - . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,5°C.
- | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| . Início da Medição | Horário: 11h00 | Temperatura: 20,0 °C |
| . Término da Medição | Horário: 11h40 | Temperatura: 21,0 °C |

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 13 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 01/02

Medição Realizada em 75 pontos com 5 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição N° Si 1097

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 10 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1097
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1097
- 1.5- Número de Série: Si 1097

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 75 dados por ciclo, em um total de 375 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 14 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 02/02

Medição Realizada em 75 pontos com 5 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1097

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,487 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,470 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,029 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 106$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 21°C.

. Início da Medição Horário: 13h00 Temperatura: 20,5 °C

. Término da Medição Horário: 14h00 Temperatura: 21,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 15 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 2 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 2 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 42 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 16 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 2 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição N° Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,004) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,004) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,004) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,004) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,2$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 12$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20°C.

. Início da Medição Horário: 09h00 Temperatura: 19,5 °C

. Término da Medição Horário: 09h20 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 17 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 3 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 3 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 63 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 18 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 3 ciclos de repetição

2 de 2

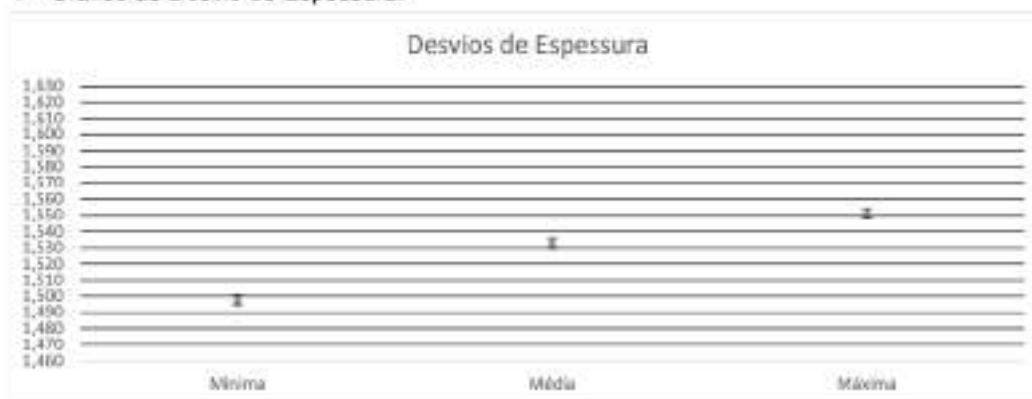


Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,052 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

. A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 87$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

. As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

. A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,25°C.

. Início da Medição Horário: 10h00 Temperatura: 20,0 °C

. Término da Medição Horário: 10h20 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 19 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 4 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023.

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 4 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 84 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 20 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 4 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição N° Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 216$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 21°C.

. Início da Medição Horário: 11h00 Temperatura: 20,5 °C

. Término da Medição Horário: 11h20 Temperatura: 21,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 21 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº SI 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de fevereiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 5 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 105 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 22 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 5 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 725$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 19,75°C.

. Início da Medição Horário: 13h00 Temperatura: 19,5 °C

. Término da Medição Horário: 13h20 Temperatura: 20,0 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 23 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 6 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 6 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 126 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 24 – Relatório de Medição da Placa Si 1097 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 6 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 1.065$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,25°C.

. Início da Medição Horário: 14h00 Temperatura: 20,0 °C

. Término da Medição Horário: 14h30 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 25 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 7 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 7 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 147 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 26 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 7 ciclos de repetição

2 de 2

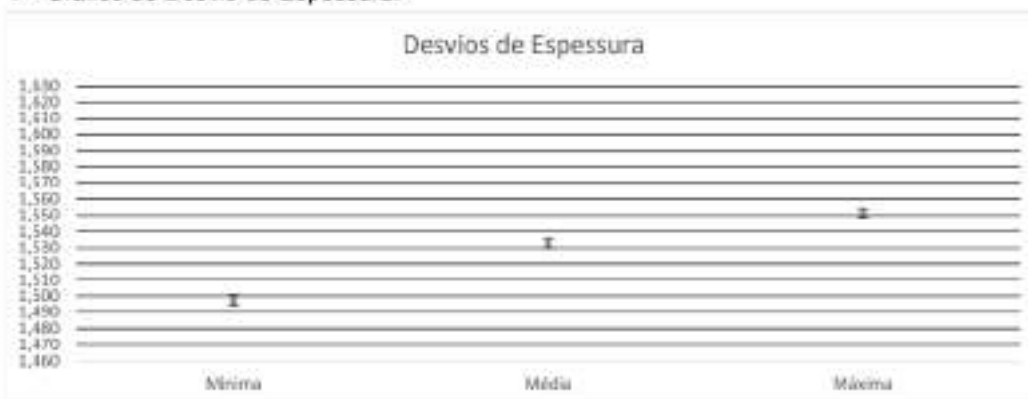


Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 2.240$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 21,25°C.

. Início da Medição Horário: 15h00 Temperatura: 21,0 °C

. Término da Medição Horário: 15h30 Temperatura: 21,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 27 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 8 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 8 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 168 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 28 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 8 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº SI 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 2.383$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 21,25°C.

. Início da Medição Horário: 16h00 Temperatura: 21,5 °C

. Término da Medição Horário: 16h40 Temperatura: 21,0 °C

Metrologista Responsável: Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 29 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 9 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 9 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 189 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 30 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 9 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{\text{eff}} = 2,445$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,75°C.

. Início da Medição Horário: 17h00 Temperatura: 21,0 °C

. Término da Medição Horário: 17h40 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 31 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 10 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 10 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 210 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 32 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 10 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 1.567$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,25°C.

. Início da Medição Horário: 18h00 Temperatura: 20,5 °C

. Término da Medição Horário: 18h50 Temperatura: 20,0 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 33 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 11 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 11 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 231 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 34 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 11 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição N° Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 1.481$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 19,75°C.

- | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| . Início da Medição | Horário: 19h00 | Temperatura: 20,0 °C |
| . Término da Medição | Horário: 20h00 | Temperatura: 19,5 °C |

Metrologista Responsável: Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 35 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 12 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de Janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 12 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 252 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 36 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 12 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,053 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 1.195$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20°C.

. Início da Medição Horário: 08h00 Temperatura: 19,5 °C

. Término da Medição Horário: 08h50 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear

Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária

São Paulo - SP

APÊNDICE 37 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 13 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 13 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 273 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 38 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 13 ciclos de repetição

2 de 2

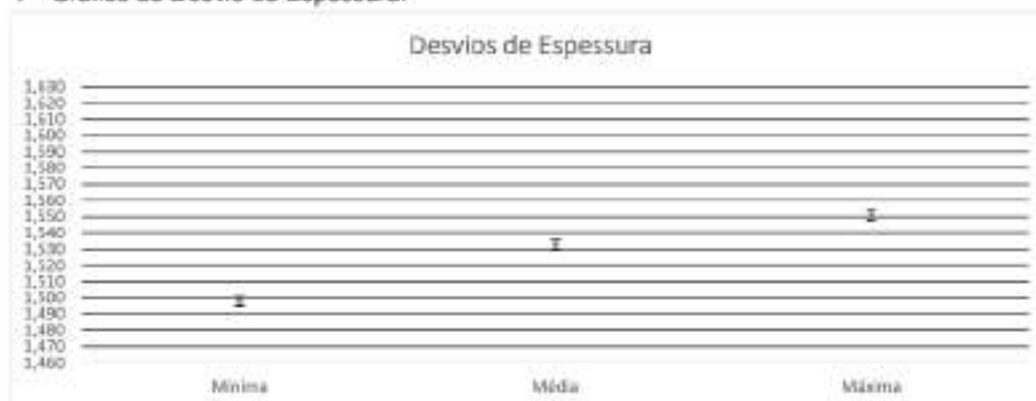


Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 1.450$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
 - . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
 - . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,5°C.
- | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| . Início da Medição | Horário: 09h00 | Temperatura: 20,0 °C |
| . Término da Medição | Horário: 09h50 | Temperatura: 21,0 °C |

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 39 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 14 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 14 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 294 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 40 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 14 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 2.007$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 21,25°C.

. Início da Medição Horário: 10h00 Temperatura: 21,0 °C

. Término da Medição Horário: 10h50 Temperatura: 21,5 °C

Metrologista Responsável: Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 41 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 15 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº SI 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 18 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: SI 1099
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: SI 1099
- 1.5- Número de Série: SI 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 15 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 315 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 42 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 15 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,551 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 2.036$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 21°C.

. Início da Medição Horário: 11h00 Temperatura: 21,5 °C

. Término da Medição Horário: 12h00 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 43 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 16 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição N° Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 16 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 336 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 44 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 16 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição N° Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,552 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2.0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{\text{eff}} = 1.809$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,75°C.

. Início da Medição Horário: 13h00 Temperatura: 20,5 °C

. Término da Medição Horário: 14h00 Temperatura: 21,0 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 45 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 17 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 17 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 357 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 46 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 17 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,552 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{\text{eff}} = 2.060$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
 - . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
 - . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,75°C.
- | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| . Início da Medição | Horário: 14h00 | Temperatura: 20,5 °C |
| . Término da Medição | Horário: 15h00 | Temperatura: 21,0 °C |

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 47 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 18 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº SI 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECON - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 18 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 378 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 48 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 18 ciclos de repetição

2 de 2

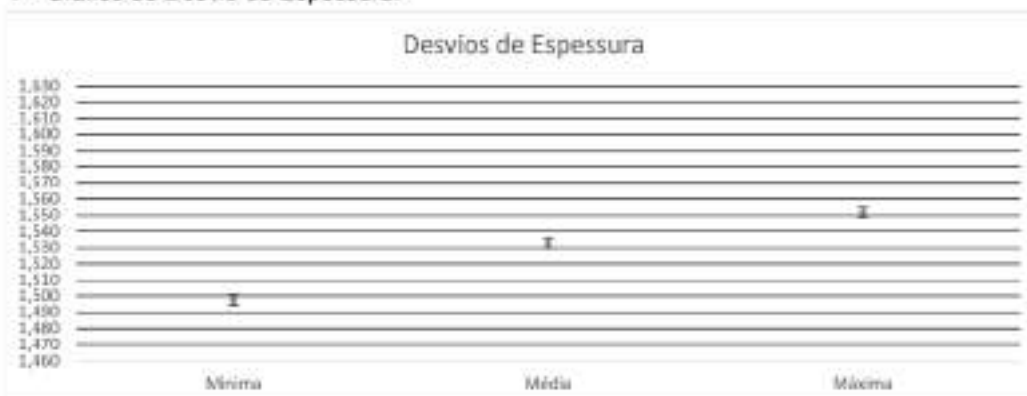


Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,552 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 2.375$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,75°C.

. Início da Medição Horário: 16h00 Temperatura: 21,0 °C

. Término da Medição Horário: 17h10 Temperatura: 20,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 49 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 19 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº SI 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: SI 1099
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: SI 1099
- 1.5- Número de Série: SI 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 19 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 399 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 50 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 19 ciclos de repetição

2 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,552 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:

- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 2.984$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 20,25°C.

. Início da Medição Horário: 17h30 Temperatura: 20,5 °C

. Término da Medição Horário: 18h40 Temperatura: 20,0 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 51 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 01/02

Medição Realizada em 21 pontos com 20 ciclos de repetição

1 de 2



Relatório de Medição Nº Si 1099

Laboratório de Metrologia do Centro do Combustível Nuclear - CCN

São Paulo, 20 de janeiro de 2023

1 - Objeto da Medição:

- 1.1- Tipo da Placa: IEA-R1 - Interna
- 1.2- Identificação: Si 1099
- 1.3- Fabricante: CECOM - IPEN
- 1.4- Código do Fabricante: Si 1099
- 1.5- Número de Série: Si 1099

2 - Objetivo da Medição:

- . Determinar os valores de espessura e expressar a incerteza dos resultados obtidos

3 - Normas de referência:

- . IT-CCN-1001.01 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IEA-R1
- . IT-CCN-1001.02 Metrologia e Controle do Processo do Elemento Combustível para o Reator IPEN/MB-01

4 - Método da Medição:

- . Foram executados 20 ciclos de medição com a aquisição de 21 dados por ciclo, em um total de 420 dados adquiridos e analisados.
- . Foi aplicada a velocidade de deslocamento de 100 mm / segundo, com velocidade de medição de 20 mm / segundo, tempo de aquisição de dados de 2 segundos e tempo de estabilização do sistema de 2 segundos.

5 - Padrões Utilizados na Medição:

- . Sensor Superior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor Inferior Baseado em Codificador Linear por Transmissão Fotoelétrica
Marca Mitutoyo, Modelo LGB2, Série XXXXXX - Certificado de Calibração XXXXXX
- . Bloco Padrão de Referência, em Aço, Classe 0, marca Mitutoyo, Código 611641-021
Certificado de Calibração XXXXXX
- . Sensor de Temperatura Ambiental Marca NNNNNN Modelo NNNNN, Série XXXX
Certificado de Calibração XXXXXX

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
São Paulo - SP

APÊNDICE 52 – Relatório de Medição da Placa Si 1099 – 02/02

Medição Realizada em 21 pontos com 20 ciclos de repetição

2 de 2

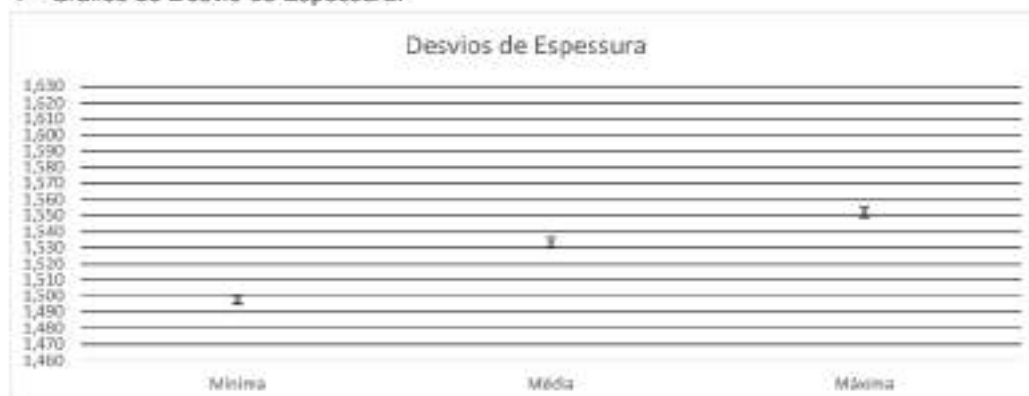


Relatório de Medição Nº Si 1099

6 - Resultados:

- . Espessura Média: (1,533 +/- 0,003) mm
- . Espessura Mínima: (1,498 +/- 0,003) mm
- . Espessura Máxima: (1,552 +/- 0,003) mm
- . Variação de Espessura: (0,054 +/- 0,003) mm

7 - Gráfico de Desvio de Espessura:



8 - Notas:


- . A incerteza expandida dos resultados de espessura é declarada como a incerteza padrão combinada da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,0$, o qual, para uma distribuição t com $\nu_{\text{eff}} = 3,444$ graus de liberdade efetivos, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . As incertezas expandidas dos resultados de comprimento e largura são declaradas com base no erro estatístico histórico destas medições, calculados a partir do desvio padrão do valor médio médio, assumindo-se uma distribuição gaussiana com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
- . A medição foi executada no Equipamento para a Medição Automatizada de Placas Combustíveis através da aplicação de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica, realizada a uma temperatura média de 19,75°C.

. Início da Medição Horário: 19h00 Temperatura: 20,0 °C


. Término da Medição Horário: 20h15 Temperatura: 19,5 °C

Metrologista Responsável : Marcelo Kobayoshi
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Centro do Combustível Nuclear
 Avenida Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
 São Paulo - SP

APÊNDICE 53 – Proposta de Nova Instrução de Trabalho (IT) – 01 / 04

|  | | |
|---|-----------------------|-----------|
| Título | Código | Rev. |
| Metrologia e Controle de Processo do Elemento Combustível | IT-CCN-XXXX.XX | 00 |
| ANEXO X – ANÁLISE DIMENSIONAL DE ESPESSURA DA PLACA COMBUSTÍVEL | | |
| Atividade a serem executadas | | |
| <p>1- O processo de análise dimensional de espessura é monitorado através de relatórios de medição, emitidos automaticamente pelo sistema de processamento do "equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis através de sensores baseados em codificadores lineares por transmissão fotoelétrica", e atende às placas internas e externas dos elementos combustíveis para os reatores IEA-R1 e IPEN/MB-01</p> | | |
| <p>2 - Verificar se a temperatura ambiente do laboratório está dentro da faixa de (20 ± 1) °C. Verificar se as placas a serem medidas estão termicamente estabilizadas a esta faixa de temperatura a pelo menos 2 horas.</p> | | |
| <p>3 - Fazer uma limpeza geral do equipamento para a medição automatizada de placas combustíveis. Limpar, com um pano umedecido com álcool isopropílico as esferas de contato dos sensores de medição e os pontos de apoio da placa, localizados no encosto limitador, nos posicionadores fixos e nos posicionadores com mola.</p> | | |
| <p>4 – Acionar a chave geral do equipamento e verificar se foram ligados o CLP, a IHM, o Sensor de Fibra Óptica e o Módulo de Comunicação dos Sensores.</p> | | |
| <p>5 – Verificar se há pressão na linha de ar comprimido e liberar o fornecimento de ar para a rede do laboratório através do manípulo localizado ao lado da máquina de medição por coordenadas tridimensionais. Verificar no manômetro da parede atrás do equipamento se a pressão de fornecimento do ar está regulada em 4,0 bar. Verificar no manômetro localizado no equipamento se a pressão de trabalho está regulada em 3,0 bar.</p> | | |
| <p>6 – Ligar o sistema de processamento e carregar o programa de aquisição de dados e o software Excel. De acordo com as características dimensionais da placa a ser medida, selecionar e carregar o arquivo de tratamento matemático dos dados e emissão dos certificados. Preencher na planilha aberta com os dados de identificação da placa e os demais dados de medição solicitados.</p> | | |
| <p>7 – Na IHM, selecionar a tela de medição de espessuras e, de acordo da placa a ser medida, introduzir os seguintes dados:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Comprimento da placa (em milímetros); – Largura da placa (em milímetros); – Dimensão* do bloco padrão de referência (em milímetros). <p>*Observar que o valor nominal do bloco padrão de referência deve ser igual ou o mais próximo possível da espessura da placa a ser medida,</p> | | |
| <p>8- Introduzir na IHM os seguintes parâmetros de medição:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Número de colunas (a serem medidas na largura) = 3; – Número de linhas (a serem medidas no comprimento) = 13 (ou 25 para estudos de novos processos); – Número de repetições (tamanho amostral por ponto) = 5; – Velocidade de deslocamento = 100 mm/s; – Velocidade de medição = 20 mm/s; – Tempo de aquisição (de dado do sensor) = 2 segundos; – Tempo de estabilização = 2 segundos. | | |
| 1 de 4 | | |
| <p style="font-size: small;">É proibida a duplicação ou reprodução deste volume ou de parte de mesmo, sob quaisquer meios, sem autorização expressa de ipen Verifique a LISTA MESTRA de Documentos do CCS de ipen em http://www.ccsn.gov.br Certifique-se de que este seja o versão vigente antes de utilizar este documento. Cópias impressas com a identificação "CCN/CIA/INSTRUÇ.01" não são controladas e não devem ser utilizadas em projetos operacionais.</p> | | |

APÊNDICE 54 – Proposta de Nova Instrução de Trabalho (IT) – 02 / 04

|  | | |
|--|-----------------------|-----------|
| Título | Código | Rev. |
| Metrologia e Controle de Processo do Elemento Combustível | IT-CCN-XXXX.XX | 00 |
| ANEXO X – ANÁLISE DIMENSIONAL DE ESPESSURA DA PLACA COMBUSTÍVEL | | |
| Atividade a serem executadas | | |
| 9 – Posicionar o bloco padrão de referência no suporte de ajuste e verificar se ele está bem apoiado. | | |
| 10 – Posicionar a placa combustível devidamente laminada e cortada nas suas dimensões finais no berço de medição. Verificar se a gravação de identificação da placa está posicionada para cima e do lado oposto ao encosto limitador. Apoiar a extremidade oposta a gravação de identificação da placa no encosto limitador, apoiar a sua lateral nos posicionadores fixos e ajustar a outra lateral nos posicionadores com mola. | | |
| 11 - Verificar se a placa está bem apoiada, sem a existência de movimentos ou folgas. Verificar se não há nenhuma obstrução na área de trabalho que possa atingir aos sensores ou às demais partes móveis do equipamento. Em dúvidas não iniciar a medição. | | |
| 12 – Acionar na IHM o comando "HOME" que iniciará a movimentação automatizada do equipamento até o ponto de origem do sistema de coordenadas do equipamento denominado ponto zero máquina. | | |
| 13 – Acionar na IHM o comando "ADJUST" que iniciará a movimentação automatizada do equipamento até a posição de ajuste (ou preset) dos sensores. | | |
| 14 -Uma vez na posição de ajuste dos sensores e com o bloco padrão devidamente apoiado, acionar na IHM o comando "PRESET". Confirmar se o valor de indicação na IHM é o mesmo valor nominal do bloco padrão selecionado. Caso positivo acionar o comando "OK", caso negativo, refazer a operação. | | |
| 15 – Com os sensores devidamente ajustados, acionar na IHM o comando "ZERO", que iniciará a movimentação nos eixos X e Y, para efetuar a detecção das extremidades frontal e lateral da placa através dos sinais captados pelo sensor de tangência por fibra óptica. Um vez determinados estes sinais emitem um comando para o registro das coordenadas correspondentes ao ponto de origem do sistema de coordenadas da placa, denominado ponto zero placa. | | |
| 16 – Com o ponto zero da placa definido, acionar na IHM o comando "MEAS", que iniciará a movimentação do equipamento através do sistema de coordenadas da placa, posicionando os sensores nas coordenadas de medição definidos segundo os dados anteriormente fornecidos. | | |
| 17 – De maneira automática, em cada ponto de medição programado, o CLP irá comandar o movimento das hastes dos sensores de medição superior e inferior e enviará ao sistema de processamento os valores relativos à espessura da placa (de forma diferencial A+B), correlacionando-os com as de coordenadas X e Y da placa. | | |
| 18 – Obtidos os valores das coordenadas espaciais da placa, ou seja, a espessura, a coordenada em X e a coordenada em Y de cada ponto medido, o sistema irá processar os dados e, através da repetição de ciclos de medições, o algoritmo desenvolvido irá executar os cálculos e apresentar os resultados das medições juntamente com a expressão de suas incertezas, analisadas conforme as diretrizes do GUM (JCGM, 2008). | | |
| 19 - Além dos resultados das medições obtidas e suas respectivas incertezas de medição, o sistema também irá gerar de maneira automática o relatório de medição e de um modelo gráfico com representações de variações cromáticas da curva de resposta de variação da espessura da placa. | | |
| 2 de 4 | | |
| <small>É proibida a duplicação ou reprodução deste volume ou de parte do mesmo, sob quaisquer meios, sem autorização expressa do ipen Verifique a LISTA MESTRA de Documentos do DQ do ipen em http://intranet.ipen.br Certifique-se de que está aqui a versão vigente antes de utilizar este documento. Cópias impressas sem a identificação "CÓPIA CONTROLADA" não são controladas e não devem ser utilizadas com propósito operacional.</small> | | |

APÊNDICE 55 – Proposta de Nova Instrução de Trabalho (IT) – 03 / 04

|  | | |
|---|-----------------------|-----------|
| Título | Código | Rev. |
| Metrologia e Controle de Processo do Elemento Combustível | IT-CCN-XXXX.XX | 00 |
| ANEXO X – ANÁLISE DIMENSIONAL DE ESPESSURA DA PLACA COMBUSTÍVEL | | |
| Atividade a serem executadas | | |
| 20 – Finalizada a medição, salvar os dados das medições, juntamente com os relatórios gerados, nomeando-os com o código de identificação da placa e salvando-os no diretório designado. | | |
| 21 – Retirar o bloco padrão de referência de espessura, proceder a sua limpeza com álcool isopropílico e protegê-lo com vaselina líquida, acondicionando-o em estojo próprio. | | |
| 22 – Retirar a placa combustível do berço de medição do equipamento, soltando primeiramente os posicionadores com mola. Em seguida proceder a sua limpeza com éter e acondicioná-la no seu devido estojo. | | |
| 23 - Acionar na IHM o comando "HOME" posicionando o equipamento no ponto de origem do sistema de coordenadas (ponto zero máquina). | | |
| 24 – Fechar o software Excel e o programa de aquisição de dado, desligar o computador através do sistema operacional, desligar a chave geral do equipamento e fechar o fornecimento de ar para a rede do laboratório através do manipulo localizado ao lado da máquina de medição por coordenadas tridimensionais. | | |
| 25 - Fazer uma limpeza geral do equipamento. Caso esteja previsto ficar um tempo longo sem a sua utilização, sugere-se que os sensores de medição sejam removidos, limpos e acondicionados em estojo próprio. | | |
| 26 - Quando os valores de análise obtidos estiverem contidos nos intervalos de aceitação descritos nos desenhos técnicos e especificação da placa combustível, a placa combustível será considerada aprovada para a próxima etapa do processo. | | |
| 27 – Verificar os resultados obtidos, relacionando-os à zona de aceitação** de cada placa, estes valores estarão registrados nos relatórios de medição e deverão ser tratados da seguinte forma: ** Não confundir com zona de conformidade <u>Ser retrabalhada</u> (ajustar) quando ocorrer uma das situações abaixo: <ul style="list-style-type: none"> - Espessura > 1,62 mm (para IEA-R1) - Espessura > 1,37 mm (para IPEN/MB-01) <u>Ser aprovada</u> quando ocorrer uma das situações abaixo: <ul style="list-style-type: none"> - 1,47 mm ≤ Espessura ≤ 1,62 mm (para IEA-R1) ou - 1,33 mm ≤ Espessura ≤ 1,37 mm (para IPEN/MB-01) <u>Ser rejeitada</u> (descartar) quando ocorrer uma das situações abaixo: <ul style="list-style-type: none"> - Espessura < 1,47 mm (para IEA-R1) - Espessura < 1,33 mm (para IPEN/MB-01) | | |
| 28 - O relatório de medição emitido pelo sistema deve ser impresso e despachado para Setor de Garantia da Qualidade que fará o encaminhamento necessário ao tratamento, se necessário, de não-conformidades pelo cliente CEN (Centro de Engenharia Nuclear), definindo a aprovação ou rejeição da placa combustível em questão. | | |
| 3 de 4 | | |
| <small>É proibida a duplicação ou reprodução deste volume ou de parte do mesmo, sob qualquer meio, sem autorização expressa do ipen Verifique a LISTA MESTRA de Documentos do SGT do ipen em http://sistemas.ipen.br Certifique-se de que esta seja a versão vigente antes de utilizar este documento. Cópias impressas sem a identificação "CCNA CONTROLADA" não são controladas e não devem ser utilizadas com propósito operacional.</small> | | |

APÊNDICE 56 – Proposta de Nova Instrução de Trabalho (IT) – 04 / 04

| Título | Código | Rev. |
|--|-----------------------|-----------|
| Metrologia e Controle de Processo do Elemento Combustível | IT-CCN-XXXX.XX | 00 |
| <p>Observações:</p> <p>Versão 00 – Sujeita a revisão – Aguardando aprovação</p> | | |

É proibida a duplicação ou reprodução deste volume ou de parte do mesmo, sob quaisquer meios, sem autorização expressa do ipen.
Verifique a LISTA MESTRA de Documentos da SOI do ipen em <http://www.ipen.br>.
Certifique-se de que este seja o versão vigente antes de utilizar este documento.
Cópias impressas sem a identificação "CÓPIA CONTROLADA" são não controladas e não devem ser utilizadas com propósitos operacionais.

4 de 4


12 ANEXOS

ANEXO 1 – Especificação dos Sensores de Medição Mitutoyo LGB-2

Mitutoyo - Slim Head Linear Gauge LGB

Mitutoyo

Slim Head Linear Gauge LGB
Item number: 542-230



Description

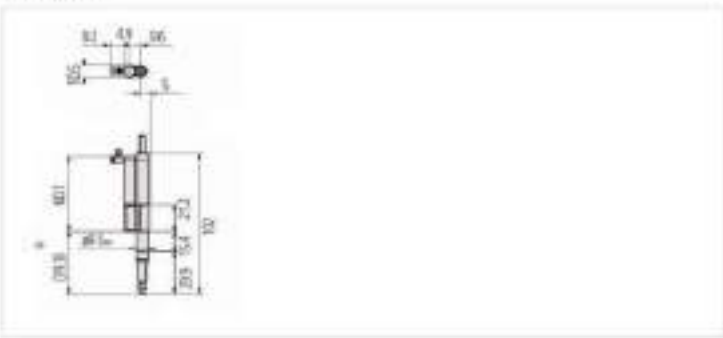
This is an extra slim linear gauge that offers you the following benefits:

- Its differential square-wave signal output allows you to use it for a wide range of applications.
- It is very long lasting due to linear ball bearings in the spindle unit.

Features

| | |
|---------------------------|---|
| Accuracy: | 2 µm |
| Measuring force: | 0.8 N with spindle down, 0.75 N spindle horizontal, 0.7 N spindle upwards |
| Scale: | Photoelectric linear encoder |
| Stroke: | 8 mm |
| Max. response speed: | 900 mm/s |
| Contact point: | Ø3 mm carbide ball, thread: M 2.5 x 0.45 |
| Resolution: | 0,001 mm |
| Signal pitch: | 4 µm |
| Cable length: | 2 m |
| Power supply: | 5 V (4.5 V to 5.2 V) |
| Remarks: | w/pneumatic cylinder, 0.3 to 0.8 MPa |
| Output signal: | 90° phase difference, differential square wave (RS-422A equivalent) |
| Environmental conditions: | 0°C to 40°C, (20% to 80% rel. humidity, no condensation) °C |
| Bearing type: | Linear ball bearing |

Dimensions



[https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyo/Data/FR/542-230/data-sheet.shtml?sessionId=39801A062E4E7241DE47E...](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/$catalogue/mitutoyo/Data/FR/542-230/data-sheet.shtml?sessionId=39801A062E4E7241DE47E...)

ANEXO 2 – Especificação do Módulo Integrado Mitutoyo EH-102P

Mitutoyo - Linear Gauge Counter EH



Linear Gauge Counter EH

Item number: 542-071D



Description

Multi-functional Counter

- The standard RS-232C and USB interface allows easy communication with an external PC (the USB can only be used with SENSORPAK).
- The built-in networking function allows you to easily create a multi-point measuring system (RS link, max. 32 Counter).
- The 3-gauge input type can calculate additions and subtractions between two gauges.

Features

| | |
|--|---|
| Resolution: | 0,0001/0,001/0,01 mm |
| Digital data output: | Yes |
| ON/OFF: | Yes |
| Power supply: | Via AC Adapter (12-24 V DC, 700 mA No. 527428 Standard Accessories) |
| SCD output: | Yes |
| External HOLD: | Yes |
| MAX / MIN / Difference measurement: | Yes |
| Min / inch switching: | Yes |
| Max. input frequency: | 2,5 MHz (2-phase square wave), response speed depends on gauge specifications |
| RS link: | Yes |
| Input signal type: | Differential square-wave |
| Applicable gauge: | LGF, LGM, LGB, LG, LGM, LGH (excluding LGF-Z with reference point, LGH with 0.01 µm resolution), LG100 with connector adapter plug Z1HZA105 |
| Gauge inputs: | 2 |
| ZERO SET: | Yes |
| PRESET: | Yes |
| Factory tolerance set (when a PC is used): | Yes |
| Counting direction switchable: | Yes |
| External RESET / ZERO: | Yes |
| Tolerance judgement display: | LED display (3 steps : Amber, Green, Red/5 steps : Amber, Amber flashing, Green, Red flashing, Red) |

[https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyo/Data/PR/542-071D/datasheet_xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/$catalogue/mitutoyo/Data/PR/542-071D/datasheet_xhtml)

ANEXO 3 – Especificação .do Sensor Amplificador Autonics BF4R



7 Pin: 1Vcc 2GND 3+ 4- 5Vcc 6+ 7-

Autonics

BF4R

Type: Standard type
 Light source: Red LED(660nm)
 Response time: Frequency 1: Max. 0.5ms
 Frequency 2: Max. 0.5ms
 Power supply: 12-24VDC (11~24VDC max. P-P max. 10%)
 Operation mode: Light ON/Dark OFF (set by ON/OFF button)
 Control output: NPN open collector

CE RoHS

[Price inquiry](#) [Add to shopping cart\(0\)](#)

[Compare](#) [View model specifications](#)

Data sheet


| | |
|-----------------------------------|--|
| Type | Standard type |
| Light source | Red LED(660nm) |
| Response time | Frequency 1: Max. 0.5ms Frequency 2: Max. 0.5ms |
| Power supply | 12-24VDC (11~24VDC max. P-P max. 10%) |
| Current consumption | Max. 40mA |
| Operation mode | Light ON/Dark OFF (set by ON/OFF button) |
| Control output | NPN open collector |
| Timer function | OFF Delay(0.5s) |
| Sensitivity adjustment | Manual |
| Development_Autonet number(s) | Height Max. 11.20mm, Insertion-hole long. Max. 3.00mm (insertion hole) |
| Development_Autonet for operation | -10 to 50°C, storage: -20 to 70°C |
| Development_Autonet handy | 20 to 25% RH, storage: 25 to 65% RH |
| Major influence parameter | Switch differential frequency mode (frequency 1: normal mode, max. 0.5ms, Frequency 2: max. 0.5ms) |
| Non-digital output | ON state under suitable illumination (by logic stays for 300ms or suitable level) ON state when control output is about smaller Load voltage: Max. 30VDC Load current: Max. 50mA Load voltage - Max. Forward current: 50mA, 0.5s |
| Material | Case: Heat-conductive epoxy resin (heat-conductive system), Cover: Polycarbonate |
| Case specification | Ø19mm, 4-pin, 2xKAG22, core diameter: Ø19mm, radius of case: R0, insertion cut diameter: Ø12.0mm |
| Accessories | Plug bracket, 3Pin, 4Pin |
| Weight | Approx. 120g(approx. 4.5g) |

* The weight includes packaging. The weight is approximate at the end only.
 * The temperature or humidity measurement at Development validation is only for the purpose of information.

<https://www.autonics.com/stock/A17000007>

ANEXO 4 - Especificação do Cabo de Fibra Óptica Autonics FT-320-05R


Autonics



* Image may differ

FTS2-320-05

Type : SUS type(SUS length 45mm)
Sensing distance : 150mm
Min. sensing target : Ø0.5mm
Allowable bend radius : R10(SUS part R10)
Cable length : 2m
Adapter : Adapter
Environment_Ambient temperature : -40 to 70°C



[Price Inquiry](#) [Add to interested products](#)

[Compare](#) [View model specifications](#)

Data sheet

| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Type | SUS type(SUS length 45mm) |
| Sensing distance | 150mm |
| Min. sensing target | Ø0.5mm |
| Allowable bend radius | R10(SUS part R10) |
| Cable length | 2m |
| Free cut | Free cut |
| Adapter | Adapter |
| Environment_Ambient temperature | -40 to 70°C |
| Sensing type | Through-beam type |

※The sensing distance is a standard for red LED of BF4 Series and 10% of red LED is applied when it is green LED. It is applied to 40% of sensing distance for BF3RX.
 ※Min. sensing target is a value measured on opaque material in accurate output status, and the sensing distance is different with the rated sensing distance.
 ※Free cut type's sensing distance can be shortened about max. 30% than the normal according to condition of the cable. (FC-3) should be used for cutting fiber cable.
 ※FT-425-13 was discontinued. FT-425-12B is replacement.
 ※Glass type is for BF5, BF4 Series.

<http://www.autonics.com/mcode/A170000006>

ANEXO 5 – Especificação dos Transdutores de Deslocamento Fagor MX

INCREMENTAL

M series

LINEAR



General specification

| | |
|-----------------------|--|
| Measurement | By means of graduated glass scale, with 20 µm etching pitch |
| Maximum speed | 60 m/min |
| Maximum vibration | 3 g |
| Moving thrust | < 5 N |
| Operating temperature | 0 °C...50 °C |
| Storage temperature | -20 °C...30 °C |
| Weight | 0.58 kg ± 0.6 kg/m |
| Relative humidity | 20...30% |
| Protection | IP 53 (standard) IP 64 (DIN 40050) using pressurized air in these models at 0.8 ± 0.2 bar |
| Reader head | With detachable cable connector (except MKT and MOK) |

Designed for applications on standard machines with travels up to 1540 mm. With reference marks every 60 mm or distance-coded and detachable cable connector built into the reader head (except the MK series where the reader head comes standard with a 3-meter attached cable).

Measuring lengths in millimeters

40 (*) • 70 • 120 • 140 • 170 • 220 • 270 • 320 • 370 • 420 • 470 • 520 • 520 • 725 • 770 • 820 • 920 • 1020 • 1140 • 1240 • 1340 • 1440 • 1540

(*) On MT and MX models.

Specific characteristics

| | MT MDT | MTD | MKT | MX MIX | MKX | MP MOP |
|----------------------------|--------------------------------|---|------|---------------------|---------|-------------------------------|
| Accuracy | | ± 10 µm | | ± 5 µm | ± 10 µm | ± 1 µm |
| Resolution | | 5 µm | | | 1 µm | up to 0.1 µm |
| Reference marks (L) | | MKT and MOK: L every 60 mm MT, MTD, MX and MP: L every 60 mm MDT, MDR and MOP: Distance-coded L | | | | |
| Output signals | | L/T TL | | L/T TL differential | | ~L, 1 Vpp |
| T period of output signals | | 20 µm | | 4 µm | | 20 µm |
| Limit frequency | | 60 kHz | | 200 kHz | | 30 kHz |
| Maximum cable length | 20 m | 50 m | 20 m | 30 m | | 100 m |
| Supply voltage | 24 V ± 5%, 100 mA without load | | | | | 5V ± 5%, < 100 mA (with load) |

ANEXO 6 – Especificação do Motor de Passo Kalatec Nema 23 HT23-402.8

Motor de Passo Nema 23 – Torque 3Nm – Kalatec Automação

Motor de Passo Nema 23 – Torque 3Nm

Inicio » Motor de Passo Nema 23 – Torque 3Nm



Motor de Passo 30 kg.cm

Cerca metade das falhas em processos de **automação industrial** acontecem porque as empresas fazem escolhas erradas durante o desenvolvimento. Escolha empresa que tenha experiência; **Kalatec Automação**, mais de 150.000 Motores de Passo vendidos.

Aplicações:

Motores de passo HT23-402.8 é o motor mais forte da categoria 56mm e permite opcionais como **reductor planetário integrado**. Indicado para pequenas máquinas router com uso de **cremalheiras** ou polias dentadas.

Informações

Motor de Passo HT23-402.8

- Código Kalatec: KTC-HT23-402.8 (4626)
- Modelo: Nema: 23
- Flange: 56mm
- Comprimento da carcaça: 112mm
- Passo em Angulo: 1,8°
- Resolução: 200PPR
- Torque Estático Bipolar: 3.0Nm
- Quantidade de Fios: 04
- Ligações possíveis: Bipolar Serie
- Corrente : 3,0A/fase
- Temperatura de Operação: -20 a +50 °C
- Classe de isolamento: Classe B (130 °C)
- Diâmetro do eixo: 8 mm
- Inércia: 800 g.cm2

- Peso do Motor: 1.5kg
- Curva de Performance Torque x Velocidade – ST70 com 3,14A e 30VDC



<https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-nema-23-3nm/>

ANEXO 7 – Especificação do Driver Kalatec Modelo STR8.

Drive de Motor de Passo STR8

Início » Drive de Motor de Passo STR8



Drive de Motor de Passo

Cerca metade das falhas em processos de **automação industrial** acontecem porque as empresas fazem escolhas erradas durante o desenvolvimento. Escolha empresa especialista, **Kalatec Automação**, mais de 100.000 motores de passo vendidos no Brasil. Reconhecido como Fornecedor TopFive pela Thomas Register.

Veja as características do drive STR8

- Corrente de 2,35 a 8,0A
- Alimentação de 24 à 75VDC
- Resolução: 200 / 400 / 2000 / 5000 / 12800 / 20.000 PPR
- Emulação de Micro-passo;
- Sinal de Pulso e Direção; 5 – 24V (NPN / PNP)
- Alarmes; 7 tipos de alarmes
- Proteções Internas: Curto-circuito, baixa tensão e alta tensão
- Filtro Digital Interno (150KHz ou 2MHz)
- Redução Automática da Corrente para evitar aquecimento do motor quando motor está em stand-by;
- Ajuste Simples e sem necessidade de Softwares;
- Certificação CE ,RoHS , UL

Vantagens exclusivas do STR8

Um driver para quem busca performance e robustez. O driver preferido pelos melhores fabricantes de máquinas Router, Plasma , Rotuladeiras do mercado. Único Drive do Brasil com **02 anos de garantia**. Ideal para motores de passo NEMA 34, NEMA 42 e NEMA 56 e com certificações para operação em países da Europa, Mercado Americano e países asiáticos.

Projeto desenvolvido pela Applied Motion Products (AMP), empresa do vale do Silício adquirida recentemente pela líder mundial de fabricação de motores de passo MOONS.

ANEXO 8 – Especificação do Servo Motor Delta ECMA-C20604

Servo Delta ECMA-C20604 – Kalatec Autorização

Servo Delta ECMA-C20604

Modelo - Servo Delta ECMA-C20604



Informações

Servo Motor ECMA-C20604

- Código: ECMA-C20604-RS (5768)
- Código Antigo: ECMA-20604-ES
- Potência : 400W
- Torque Nominal : 1,27Nm
- Torque de Pico: 3,82Nm
- Velocidade Nominal: 3000 RPM
- Velocidade de Pico: 5000 RPM
- Encoder Incremental de 17 Bits (160.000 PPR)
- Temperatura de Operação: 0 a 40 °C
- Flange: 60mm
- Diâmetro do eixo: 14mm
- Indicação de redutor planetário: WPF-060
- Driver Recomendado: ASD-B2-0421-B ou ASD-A2-0421-M
- Cabo de Potência ASD-B2 sem freio 5m: ASDBCAPW0205
- Cabo de Encoder ASD-B2 5m: ASDBCAEN0005

Opcionais e Acessórios:

- Servo Motor com Freio: ECMA-C20604-SS (6054)
- Cabo de Potência ASD-B2 com Freio: ASD-ABPW0105
- Conector Avulso de Potência ASD-B2: ASDBCAPW0000
- Conector Avulso de Encoder ASD-B2: ASDBCAEN0000

<https://www.kalatec.com.br/servo-motor-delta-ecma-c20604/>

Servo Delta ECMA-C20604

O **Servo Motor** ECMA-C20604 oferece 400W possui um Torque Nominal de 1,27Nm com 3000 RPM. Encoder de 17Bits oferece alta precisão e confiabilidade em seu projeto.

Cerca de **metade das falhas** em processos de **automação industrial** acontecem porque as empresas fazem escolhas erradas durante o desenvolvimento. Escolha empresa que tenha experiência: **Kalatec**, mais de **26.000 servos motores instalados** no Brasil.

Vantagens exclusivas

Cliente kalatec usufrui vantagens exclusivas. Curso Completo de Parametrização **plataforma EAD** e Encontros e treinamentos presenciais com especialistas. Suporte Técnico gratuito por telefone.

ANEXO 9 – Especificação do Driver Delta Modelo ASD-A2-0421-M

Estabelecido - Driver Delta ASD-A2-0421-M - Frente Estreita

Driver Delta ASD-A2-0421-M

Início - Driver Delta ASD-A2-0421-M

- Informações
- Adicionais
- Downloads
- Outros



Drive Delta ASD-A2-0421-M

Com o avançar da tecnologia de microprocessador se torna mais avançada, os custos da tecnologia de fabricação de ímãs permanentes para servo motor e dispositivos de semicondutores de alta potência tomam-se mais aprimoradas.

Os motores recebem um sinal de controle do **drive ASD-A2** e avançam com velocidade e precisão a posição desejada. Um avançado algoritmo de malha fechada é utilizado para garantir a precisão da posição do eixo.

Portanto, o servo motor CA e o sistema de controle servo CA tomaram-se as técnicas básicas para a realização da tecnologia de controle de automação no campo atual da indústria.

Os driver de servo motor de corrente alternada ASDA são fornecidos com um processador de sinal digital superior (DSP), que representa um desempenho de alta velocidade do circuito do circuito de controle. Além disso, os outros recursos da série Delta ASDA, incluindo ajuste de ganho, operação suave do motor e análise de software / função de monitor, também fornecem controle de movimento de alta velocidade e alta precisão para uma ampla gama de aplicações de automação industrial.

Com resolução ajustável até 20 Bits, Os drivers **ASD-A2** oferece a melhor precisão. Os motores giram em movimento proporcional aos sinais recebidos do driver. Cada pulso é um micro movimento e por isso a assertividade no controle de posição.

Características Drive Delta ASD-A2-0421-M

- Potência 400W
- Alimentação: AC 220 Monofásico ou Trifásico
- Resolução do encoder: 20Bits
- Resolução: 1.280.000 pulsos por revolução
- Interface de Comunicação: RS232, rs485 e USB 1.1
- Protocolos de comunicação: CANopen e MODBUS
- Suporte Protocolos DS301 e DS402
- Taxa de comunicação acima de 1Mbps
- I/Os digitais: 15 entradas e 05 saídas parametrizáveis
- I/Os analógicas: 02 entradas e 02 saídas
- Frequência de Entrada de Pulso: 200Kpps (Coletor aberto) ou 500Kpps / 4Mpps (L.D)

Vantagens Servo Drive ASD-A2

- Supressão automática de vibrações de baixa frequência
- Dois filtros anti-vibração para minimizar a vibração nas extremidades da máquina de forma automática.
- Programa em modo PR 64 posições programáveis
- Função CAM eletrônico para E-CAM e corte em voo.
- 720 pontos de E-CAM
- 35 modos de HOME disponíveis

Cabo de Potência padrão: ASD-ABPW0005

Cabo de Encoder padrão: ASD-ABEN0005

Conector Padrão de I/Os: ASD-CN5C0050

Opcionais:

Kit de extensão de I/Os para Trilho DIN ASD-BM-50A

Conector Frontal - fixação por pressão ASD-IF-5C5020

Conector para Comunicação RS485: ASD-CNIEOB06

<https://www.estabec.com.br/servo-motor-delta-asd-a2-0421-m-400w/>

ANEXO 10 – Especificação do CLP Delta AS324 MT-A

CLP AS300 - Novo Atualização

CLP AS300

Novo CLP AS300



CLP AS300

A nova linha de CLP Delta AS300 é um Controlador Multitarefa de alto desempenho projetado para todos os tipos de equipamentos automatizados. Possui uma CPU de 32 Bits de desempenho excelente Delta para melhorar a velocidade de execução (40k passos/ms) e suporta até 32 módulos de expansão utilizando uma capacidade de até 1.024 entradas / saídas. A Série da Linha de CLP AS300 oferece controle preciso de posicionamento de até 0,01 graus via rede CANOpen e até 96 vezes através de Controle de Pulsos/Direção com saídas de 2000Hz. É amplamente utilizado em diversos equipamentos automatizados como fabricação de eletrônicos, rotulagem, embalagem de alimentos e máquinas têxteis.

CLP AS300 – Acesso Diacloud

- Máximas I/Os: 1024
- Máxima capacidade de Módulos: Total de 32 módulos (sendo no máximo 16 módulos analógicos e 4 módulos de comunicações)
- Saídas rápidas: 00 eixos de 2000Hz (modelos AS321T-A ou AS322P-A) ou 02 eixos de 4Mbps + 04 eixos de 2000Hz (modelo AS324MT-A)
- Entradas rápidas: 06 canais de 2000Hz (modelos AS321T-A ou AS322P-A) ou 02 entradas de 4Mbps + 04 entradas de 2000Hz (modelo AS324MT-A)
- Capacidade de Programação: 128k Steps
- Registrados: 50K Words
- Velocidade de execução: 40k steps / ms
- Iniciação (atraso I/O) : 25ns
- Iniciação de aplicação (MOV) 0,1%
- Expansões disponíveis: Módulos de I/Os, módulos I/Os analógicos, Módulos eixos de carga, Módulos de Comunicações e Módulos de Temperatura
- Comunicação Padrão da CPU: Modbus (32 portas RS-485) e Ethernet/IP
- Recursos Disponíveis (até 15 cartões escravos totalizados no máximo de 32 módulos)

<http://www.delta.com.tw/pdf/2011/20110101.pdf>

Informações Adicionais

Modelos dos CLP AS300

- Modelo AS321P-A - CLP AS300 16x/16out Transistor PNP (conector I/Os para "flex cable")
- Modelo AS321T-A - CLP AS300 16x/16out Transistor NPN (conector I/Os para "flex cable")
- Modelo AS324MT-A - CLP AS300 12x/12out NPN + 04x/04out Diferenciais (conector I/Os para "flex cable")
- Modelo AS320T-B - CLP AS300 4x/12out Transistor NPN (conector de I/Os de mala)
- Modelo AS300S-A - CLP AS300 sem I/Os

Borneira e Flex cable para a linha AS332

- UB-90-ED-16A - Box Trilho DIN com 16 (nº 19 out (4412)
- UC-ET010-24D - Cabo Flex cable de 1 metro (4356)

Para a linha AS324 ou AS332, utilize-se 02 Box Trilho DIN UB-90-ED-16A e 01 Cabo UC-ET010-24D

Principais Módulos de Expansão:

- AS16AN10N-A - Módulo de 16 entradas - Conector a medida (M10)
- AS16APT1P-A - Módulo de 8 entradas e 88 saídas PNP e Transistor (4300)
- AS16AN10T-A - Módulo de 16 saídas PNP e Transistor (4415)
- AS6AN10N-A - Módulo de 64 entradas Digitais (4410)
- AS3AND-A - Módulo de 04 entradas analógicas de 16bits (4418)
- AS24DA-A - Módulo de 04 saídas analógicas (4417)
- AS06SA-A - Módulo de 04 saídas analógicas, 12 bits e 02 saídas (4419)

Cartão de Expansão (Board Card)

- AS-F485 - Card para Comunicação RS485 (4420)
- AS-FCOM - Card para Comunicação CANopen (4421)
- AS-F2AD - Card para 02 entradas analógicas (4422)
- AS-F2DA - Card para 02 saídas analógicas (4423)

A linha AS300 permite o uso de 02 BD-Card na CPU

ANEXO 11 – Especificação da IHM DOP-107EV

IHM DOP-107EV - Kalatec Automação - Linha Completa IHM Delta

IHM DOP-107EV

Novo > IHM DOP-107EV

IHM DOP-107EV



A DOP-107EV é uma IHM de 7 polegadas série DOP-100 com porta Ethernet. Possui todas as ferramentas de programação da linha DOP-B e novos recursos exclusivos da DOP-100.

Vantagens exclusivas

Ao adquirir o CLP Delta com a KALATEC tenha vantagens exclusivas como curso completo de programação via plataforma EAD e encontros presenciais Masterclass para sanar dúvidas remanescentes.

Informações

Adicionais

Conheça melhor a IHM DOP-107EV:

- DOP-107EV (8186)
- Tamanho: 7 polegadas
- Resolução: 800x480
- Cores: 65.536 Cores TFT
- Processador: Cortex-A8 800MHz
- 512 MB RAM
- 256 MB ROM
- Ethernet incorporada
- 2 x porta COM / 1 expansão porta COM
- Introdução de dados multi-idiomas
- USB Principal
- USB Cliente
- Certificação: CE / UL
- Temperatura de Operação: 0°C a 50°C
- Temperatura de armazenagem: -20°C a 60°C
- Quantidade de toques na tela: >10.000.000 de vezes
- Cabo de Programação: DOP-CAUSBAB (2236) ou LC-PRG015-02A (8546)
- Cabo de Comunicação CLP DVP com IHM DOP: DOP-CA232DP ou LC-MS030-06A (2237)

Novas funcionalidades!

1. FTP Server
2. Envio de e-mails
3. Acesso Remoto VNC Viewer
4. Novo display de LCD e Melhor contraste
5. Processador com maior velocidade
6. Auto reconhecimento do CLP na porta serial
7. Leitor de PDF incorporado (Manual da Máquina)
8. Novo software DOPSOFT v4.0 com novos recursos
9. Novas funções de Alarme, com filtros e valor de processo em tempo real
10. Incorporado norma 21 CFR part 11 – Rastreabilidade e Histórico de operações de usuário

<https://www.kalatec.com.br>

ANEXO 12 – Especificação do Desktop Dell Modelo Vostro 3470 – 01 / 02


**DELL Vostro 3470 I5-9400 SFF Intel® Core™ i5 8 GB DDR4-SDRAM
256 GB SSD Windows 10 Pro PC Preto, Cinza, Vermelho**

Marca : DELL

Família do produto: Vostro

 Código do produto:
3470-1564

Nome do produto : 3470

DELL Vostro 3470. Frequência do processador: 2,9 GHz, Família do processador: Intel® Core™ i5. Modelo de processador: i5-9400. Memória interna: 8 GB, Tipo de memória interna: DDR4-SDRAM, Velocidade de memory clock: 2666 MHz. Capacidade total de armazenagem: 256 GB. Armazenamento: SSD. Tipo de drive ótico: DVD-RW. Modelo de adaptador gráfico a bordo: Intel® UHD Graphics 630. Sistema operacional instalado: Windows 10 Pro. Arquitetura do sistema operacional: 64-bit. Fonte de alimentação: 200 W. Tipo de chassis: SFF. Tipo de produto: PC



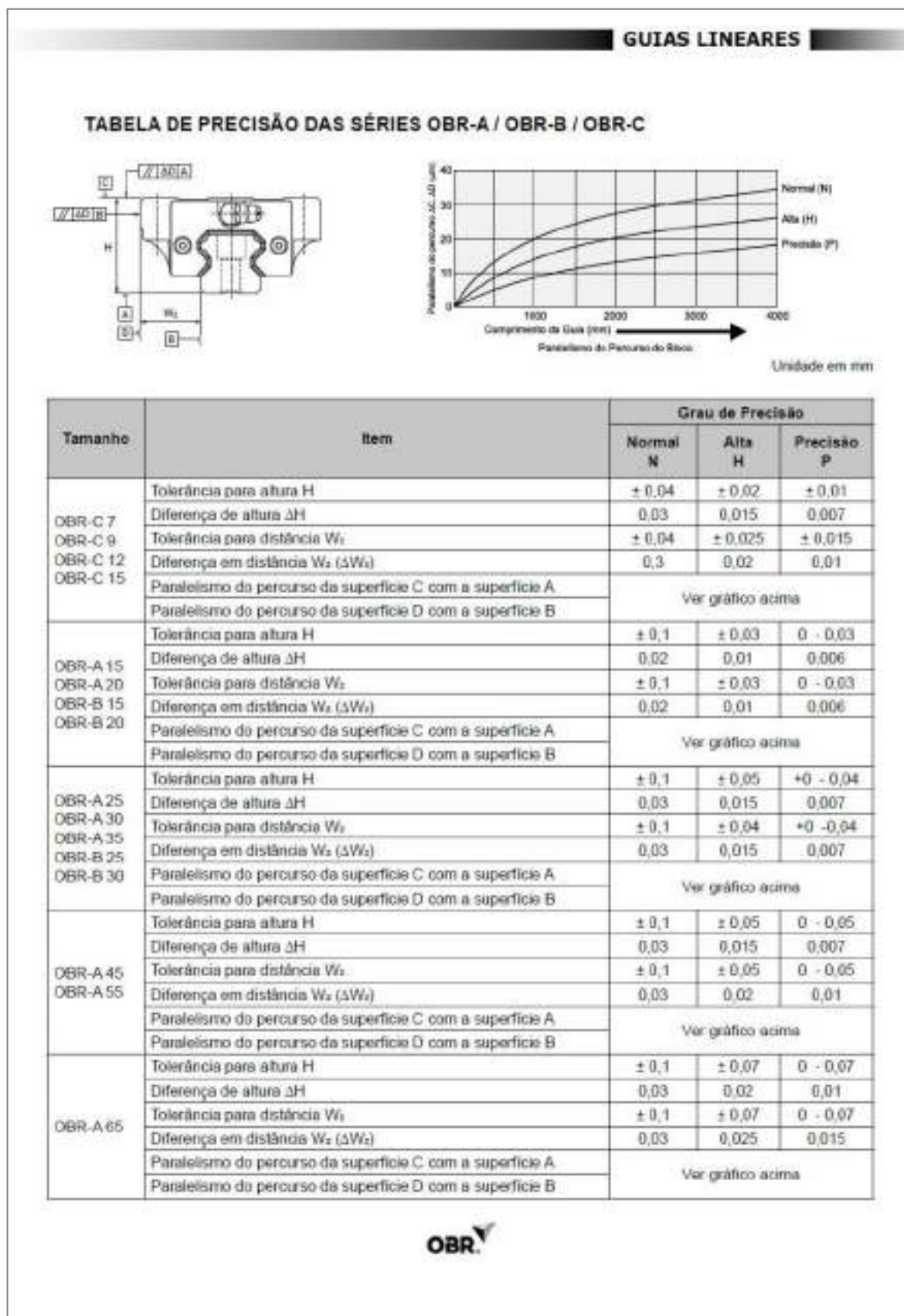
| Processador | | Design | |
|---|-------------------------|--|--------------------------|
| Fabricante do processador * | Intel | Tipo de chassis * | SFF |
| Geração do processador | 9th gen Intel® Core™ i5 | Posições suportadas | Vertical |
| Modelo de processador * | i5-9400 | Fechamento de segurança | ✓ |
| Família do processador * | Intel® Core™ i5 | Tipo slot de cadeado anti-fraude | Kensington |
| Processador das unidades de controle | 6 | Cor do produto * | Preto, Cinza, Vermelho |
| Frequência do processador * | 2,9 GHz | Desempenho | |
| Frequência turbo (max) do processador | 4,1 GHz | Chipset de placa-mãe | Intel® H370 |
| Socket do processador | LGA 1151 (Socket H4) | Sistema de áudio | Ilaves MaxAudio Pro |
| Processador cache | 9 MB | Saída para canais de áudio | 5.1 canais |
| Tipo de cache do processador | Smart Cache | Tipo de produto * | PC |
| Threads de processamento | 6 | Software | |
| Taxas de bombardeio de sistema | 8 GT/s | Sistema operacional instalado * | Windows 10 Pro |
| Tipo de bus | DMI3 | Arquitetura do sistema operacional | 64-bit |
| Litografia do processador | 14 nm | Linguagem do sistema operacional | Portuguesa |
| Modos de operação do processador | 64-bit | Software de trial | Microsoft Office; McAfee |
| Codinome do processador | Coffee Lake | Recursos especiais do processador | |
| Thermal Design Power (TDP) | 65 W | Intel® 64 | ✓ |
| Junção em T | 100 °C | Tecnologia aperfeiçoada Intel SpeedStep | ✓ |
| Versão dos slots PCI Express | 3.0 | Opções incorporadas disponíveis | ✗ |
| Número máximo de entradas PCI Express | 16 | Tecnologia de Intel® InTru™ 3D | ✓ |
| Configuração PCI Express | 1x8+2x4, 1x16, 2x8 | Intel Clear Video HD Technology | ✓ |
| Número de processadores instalados | 1 | Tecnologia Intel Clear Video | ✓ |
| Memória interna máxima suportada pelo processador | 128 GB | Intel VT-x com EPT | ✓ |
| Tipos de memória suportados pelo processador | DDR4-SDRAM | Intel TSX-N | ✗ |
| | | Estados ociosos | ✓ |
| | | Tecnologias de monitoramento térmico | ✓ |

Publication date: 11-MAR-2019. Prints or copies of information are only valid on the printed Publication date

ANEXO 12 – Especificação do Desktop Dell Modelo Vostro 3470 – 02 / 02

| Processador | | Recursos especiais do processador | |
|---|-------------------------------------|--|-------------------------|
| Velocidades da memória suportada pelo processador | 2666 MHz | Intel Stable Image Platform Program (SIPP) | ✗ |
| Largura de banda (máx.) de memória suportada pelo processador | 41,6 GB/s | Instruções novas de Intel® AES (Intel® AES-NI) | ✓ |
| Memória | | Chave segura de Intel® | ✓ |
| Memória interna * | 8 GB | OS Guard | ✓ |
| Memória interna máxima * | 32 GB | Tecnologia de execução segura Intel | ✗ |
| Tipo de memória interna | DDR4-SDRAM | Desativador de bit executável | ✓ |
| Configuração da memória (slots e dimensões) | 1 x 8 GB | Intel Enhanced Halt State | ✓ |
| Slots de memória | 2x DIMM | Intel Software Guard Extensions (Intel SGX) | ✓ |
| Velocidade de memory clock | 2666 MHz | Tecnologia Intel Clear Video para HD | ✓ |
| Armazenamento | | Tamanho do pacote do processador | 37,5 x 37,5 mm |
| Leitor de cartão integrado | ✓ | Guios de instrução suportados | AVX 2.0, SSE4.1, SSE4.2 |
| Capacidade total de armazenagem * | 256 GB | Escalabilidade | 15 |
| Armazenamento * | SSD | Configuração do CPU (máx.) | 1 |
| Tipo de drive ótica * | DVD-RW | Especificações das soluções térmicas | PCG 2015C |
| Número de drives de armazenamento instaladas | 1 | Tecnologia de virtualização Intel® para E/S direcionada (VT-d) | ✓ |
| Capacidade total de SSDs | 256 GB | Versão da tecnologia de proteção da identidade de Intel | 1.00 |
| Número de SSDs instalados | 1 | Versão estável do programa da plataforma da imagem de Intel (SIPP) | 0.00 |
| Capacidade do SSD | 256 GB | Versão da tecnologia Intel Secure Key | 1.00 |
| Fator de forma SSD | M.2 | Tecnologia de Virtualização de Intel (VT-x) | ✓ |
| Gráficos | | Versão de Intel TSX-NI | 0.00 |
| Placa gráfica discreta * | ✗ | Processador ARK ID | 134888 |
| Modelo de adaptador gráfico discreto * | Não disponível | Tecnologia Intel® Turbo Boost | 2.0 |
| Placa gráfica on-board * | ✓ | Tecnologia Intel Hyper-Threading | ✗ |
| Modelo de adaptador gráfico a bordo * | Intel® UHD Graphics 630 | Intel® Quick Sync Video Technology | ✓ |
| Frequência de base da placa gráfica integrada | 350 MHz | Tecnologia de proteção da identidade de Intel® (Intel® IPT) | ✓ |
| Frequência dinâmica (máx.) da placa gráfica integrada | 1050 MHz | Energia | |
| Memória máxima da placa gráfica integrada | 64 GB | Fonte de alimentação * | 208 W |
| Número de cores suportados pela placa gráfica integrada | 3 | Voltagem de entrada da fonte de alimentação | 100 - 240 V |
| Versão do DirectX da placa gráfica integrada | 12.0 | Frequência de entrada da fonte de alimentação | 50/60 Hz |
| Versão do OpenGL da placa gráfica integrada | 4.5 | Sustentabilidade | |
| ID da placa gráfica integrada | 0X3E98x92 | Certificados de sustentabilidade | ENERGY STAR |
| Networking | | Dimensões e peso | |
| Ethernet LAN * | ✓ | Largura * | 92,6 mm |
| Taxa de dados Ethernet LAN | 10,100,1000 Mb/s | Profundidade * | 293 mm |
| Tecnologia de cabeamento | 10/100/1000Base-T(x) | Altura * | 396 mm |
| Wi-Fi * | ✓ | Peso * | 4,8 kg |
| Padrão Wi-Fi | Wi-Fi 4 (802.11n) | Costeado de embalagem | |
| Padrões de Wi-Fi | 802.11b, 802.11g, Wi-Fi 4 (802.11n) | Display incluído * | ✗ |
| Modelo do controlador de WLAN | Dell Wireless 1707 | Mouse incluído apenas em mercados selecionados | ✓ |
| Tipo de antena | 1x1 | Teclado incluído apenas em mercados selecionados | ✓ |
| Bluetooth | ✓ | Manual | ✓ |
| Portas e interface | | Fio de eletricidade incluído | ✓ |
| Número de portas USB 2.0 * | 4 | Outros recursos | |
| Quantidade de portas USB 3.2 Gen 1 (3.1 Gen 1) Tipo A * | 2 | Número de drives óticas | 1 |
| Número de portas VGA (D-Sub) | 1 | | |
| Porta DVI | ✗ | | |
| Número de portas HDMI * | 1 | | |

ANEXO 13 – Especificação das Guias Lineares Séries OBR-A e OBR-C



ANEXO 14 – Especificação do Aço SAE 1045 para a Construção da Base




COMPOSIÇÃO QUÍMICA

| C | Mn | Si | Cr | Al | P | S |
|-------------|------|------|------|-----|------|------|
| 0,43 - 0,51 | 0,30 | 0,30 | --- | --- | 0,03 | 0,03 |
| 0,50 - 0,55 | 0,30 | 0,30 | --- | --- | 0,03 | 0,03 |
| 0,45 - 0,50 | 0,15 | 0,30 | 0,02 | --- | 0,03 | 0,02 |
| 0,40 - 0,50 | 0,35 | 0,30 | 0,05 | --- | 0,03 | 0,04 |

SIMILARIDADES
SAE 1045 • WNr. 1.1191
DIN C 45E / CK45 • UNS G10450
VT45 • GERDAU 1045

CONDIÇÕES DE FORNECIMENTO
Sem tratamento térmico /
Normalizado / Alívio de tensão
Dureza até – 260HB

CORES DE IDENTIFICAÇÃO



Generalidades

O aço GGD 1045 é um aço para beneficiamento com temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal, não recomendando seu uso para seções superiores a 60 mm. Possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. É utilizado em geral com durezas de 180 a 300 HB. Para grandes seções utilizar o tratamento térmico de normalização.

Aplicações

É utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior a dos aços de baixo carbono convencionais. Aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolhos, parafusos, grampos, brachadeiras, peças, cilindros, pregos, colunas, entre outros.

Forjamento

O aço GGD 1045 deve ser forjado na temperatura mínima de 870°C e máxima de 1240°C.

Tratamento Térmico

Recozimento: O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 800 – 850°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar lentamente no forno.

Normalização: O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 880 – 900°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar ao ar. Em casos especiais pode-se utilizar ar forçado.

Têmpera: Austenizar em temperaturas entre 820 – 850°C. Aquecer por 1 hora para cada 25 mm de espessura. Resfriar em água ou polímero. Para refrutamento em óleo (seções menores do que 10 mm) temperar a partir de 840 – 860°C.

Revenimento: Deve ser realizado imediatamente após a têmpera quando a temperatura atingir cerca de 70°C. A temperatura de revenimento deve ser selecionado de acordo com a dureza especificada para o componente. Para isto utilizar a curva de revenimento orientativa. Manter na temperatura de revenimento por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de espessura e utilizar no mínimo por duas horas. Resfriar em ar calmo.



Curva de Temperabilidade



Curva de Revenimento. Têmpera a partir de 850°C.

Nitretação: Este aço pode ser nitretado para elevar a resistência ao desgaste pelo endurecimento superficial. A dureza máxima depende da condição prévia de tratamento térmico. Nitretar com Camada Branca. Componentes beneficiados antes da nitretação terão melhor característica de endurecimento atingindo dureza máxima próxima de 600 HV. Recomenda-se profundidade de endurecimento entre 0,30 e 0,60 mm.

Têmpera Superficial: Aquecer rapidamente até a temperatura de 820 – 860°C e resfriar em água ou óleo. As condições de tratamento dependem do tamanho e geometria da peça, bem como da dureza desejada e das características do equipamento.

ANEXO 15 – Especificação da Liga Al Mg Si 6351 T6 para a Usinagem do Arco de Medição

GGD 6351 T6

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

| Si | Mg | Fe | Cu | Mn | Outros |
|------|------|------|------|------|--------|
| 1,00 | 0,80 | 0,40 | 0,10 | 0,45 | 0,10 |

CONDIÇÕES DE FORNECIMENTO
Redondo de 12,7mm a 270mm

CORES DE IDENTIFICAÇÃO
Sem cor

Características

- Ótima usabilidade;
- Alta resistência mecânica;
- Boa conformabilidade;
- Alta resistência à corrosão;
- Adequada para anodização.

Aplicações

• Componentes diversos para construção mecânica: engrenagens, buchas, coroados, mancais, etc.

Propriedades Mecânicas

| | | |
|--------------------------------|-----|------|
| Limite de escoamento | Mpa | ~260 |
| Limite de resistência à tração | Mpa | ~300 |
| Alongamento | % | ~10 |
| Dureza | HB | ~95 |

Propriedades Físicas

| | | |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Densidade | g/cm ³ | 2,75 |
| Módulo de elasticidade | Gpa | 68,7 |
| Calor específico (0-100°C) | (cal/g.°C) | 0,21 |
| Coefficiente de expansão linear | (l / °C) | 24,0x10 ⁻⁶ |
| Condutividade térmica (0,25°C) | (cal/cm.s.°C) | 0,42 |
| Condutividade elétrica | (ACS)% | ~40 |

Nota: Propriedades T6 são apenas valores aproximados para condutividade térmica e elétrica, dependendo das características de composição química e processo de fabricação.

11 04/2011

Todas as informações contidas neste documento são confidenciais. Qualquer uso não autorizado sem a permissão da GGD é proibido.

www.ggdmetal.com.br

43

ANEXO 16 – Especificação da Liga Al Zn 7075 para Usinagem dos Componentes das Partes Móveis

GGD 7075 T651

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

| Zn | Mg | Cu | Fe | Cr | Mn | Si | Ti |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5,00 | 2,30 | 1,00 | 0,35 | 0,23 | 0,20 | 0,30 | 0,30 |

CONDIÇÕES DE FORNECIMENTO

Chapas de 12mm a 150mm.
Carteiros sob encomenda obedecendo as dimensões do projeto.

CORES DE IDENTIFICAÇÃO

Características

- O mais alto valor de resistência mecânica;
- Média resistência à corrosão;
- Boa forjabilidade;
- Boa usinabilidade;
- Dureza 150 a 180HB;
- Rápida resposta ao polimento

Aplicações

- Indústria aeronáutica;
- Peças sujeitas ao max. alto esforço mecânico;
- Indústria Militar;
- Máquinas e equipamentos;
- Moldes para injeção de plástico;
- Desenvolvimento de Ferramentas;

Propriedades Mecânicas

| | | |
|--------------------------------|-----|---------|
| Limite de escoamento | Mpa | 390-490 |
| Limite de resistência à tração | Mpa | 480-540 |
| Alongamento | % | -4 |
| Dureza | HB | 150-180 |

Propriedades Físicas

| | | |
|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Densidade | g/cm ³ | 2,75 |
| Módulo de elasticidade | Gpa | 71 |
| Calor específico (0-100°C) | (cal/g.°C) | 0,22 |
| Coefficiente de expansão linear | (L / °C) | 23,4x10 ⁻⁶ |
| Condutividade térmica (25°C) | (cal/cm.s.°C) | 0,35 |
| Condutividade elétrica | (ACS)% | -40 |

Nota: Propriedades Físicas podem variar, principalmente para condutividade térmica e elétrica, dependendo das concentrações de composição química e processo de fabricação.

Propriedades Tecnológicas

| | |
|--|-------------------|
| Estabilidade dimensional | B-4 |
| Usinagem | I |
| Soldagem - Gás TIG MIG Resistência EB | 6 4 6 2 5 |
| Resistência a Corrosão - Água Salgada Intemperie Indú | 5 5 5 |
| Utilização a temperatura - Max. °C a intervalo longo curto | 90 120 |
| Anodização - Técnica decorativa dura | 4 6 0 |
| Polimento | I |
| Texturização | I |
| Contato com alicerces | Não |

Legenda: (I) = Excelente | Indú = Indústrias

16 045230

*A informação contém uma coleção de orientações, dependendo da natureza da tarefa e do contexto de uso.

www.usinamais.com.br

45

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
