



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Uso do FMEA para Análise do Sistema de Detecção de Falhas em uma Prensa na Indústria de Latas de Alumínio

Autor: Marcos Christian Alves Ferreira
Orientador: Prof. Dr. André Murilo de Almeida Pinto
Coorientador: Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira

Brasília, DF
2020



Marcos Christian Alves Ferreira

Uso do FMEA para Análise do Sistema de Detecção de Falhas em uma Prensa na Indústria de Latas de Alumínio

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. André Murilo de Almeida Pinto
Coorientador: Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva Teixeira

Brasília, DF

2020

Marcos Christian Alves Ferreira

Uso do FMEA para Análise do Sistema de Detecção de Falhas em uma Prensa na Indústria de Latas de Alumínio

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 14 de Dezembro de 2020:

**Prof. Dr. André Murilo de Almeida
Pinto**
Orientador

**Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva
Teixeira**
Coorientador

**Professor Dr. Fábio Cordeiro de
Lisboa**
Convidado 1

Eng. Raifran Lima Silva Junior
Convidado 2

Brasília, DF
2020

Este trabalho é dedicado a todos os meus familiares, amigos e professores, pelo apoio incondicional e incentivo ininterrupto. Em especial, aos meus pais, João Batista e Floripes Emília, que sempre foram, para mim, exemplos de perseverança e honestidade.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar o dom da vida e a força para superar todas as adversidades.

À meus pais, João Batista e Floripes Emília. Sem eles, a realização deste sonho não seria possível.

À toda a minha família e amigos, que sempre me apoiaram e estavam presentes nos momentos de dificuldade.

À Universidade de Brasília por garantir que fosse possível colocar em prática todo o conhecimento teórico adquirido.

Aos professores André Murilo de Almeida Pinto e Evandro Leonardo Silva Teixeira, pelo acompanhamento, profissionalismo e competência empregados na execução do trabalho acadêmico.

Ao Me. Paulo Guilherme Marques Flávio e ao Eng. Raifran Lima Silva Junior, por terem possibilitado a realização do trabalho no ambiente da empresa e por terem acreditado na minha capacidade para encarar tal desafio.

Aos professores do curso de Engenharia Automotiva que não mediram esforços para dar apoio e orientar os passos a seguir durante o curso.

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar e propor melhorias para o sistema de detecção de falhas em uma prensa de dupla ação dentro da linha de produção de latas de alumínio. A metodologia do FMEA (*Failure Mode and Effect analysis* – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos) foi implementada para nortear as atividades desenvolvidas. O trabalho foi embasado nas literaturas que buscaram implementar a metodologia em equipamentos, projetos ou sistemas em situações de falha. Após a aplicação, foi possível identificar aspectos construtivos, operacionais e de projeto que antes eram desconhecidos, possibilitando a análise dos mesmos. A partir dos dados do FMEA, foram projetadas e construídas bancadas para realização de experimentos envolvendo componentes do sistema. O estudo mostrou que o sistema de detecção da falha é composto não somente pelo sensor que faz a medição, e sim por uma série de fatores que influenciam no funcionamento do sistema como os componentes utilizados, o plano de manutenção da empresa e a atenção às especificações fornecidas pelos fabricantes dos componentes e da prensa.

Palavras-chaves: FMEA. Cupper. Latas de Alumínio.

Abstract

This work was developed with the objective of analyzing and proposing improvements to the failure detection system in a double-action press within the aluminum can production line. The FMEA methodology (Failure Mode and Effect analysis) was implemented to guide the activities developed. The work was based on the literature that sought to implement the methodology in equipment, projects or systems in situations of failure. After application, it was possible to identify constructive, operational and design aspects that were previously unknown, allowing for their analysis. From the FMEA data, benches were designed and built to carry out experiments involving system components. The study showed that the failure detection system is composed not only by the sensor that makes the measurement, but also by a series of factors that influence the functioning of the system such as the components used, the company's maintenance plan and the attention to the specifications provided components and press manufacturers.

Key-words: FMEA. Copper. Aluminum Cans.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Dinâmica de Implementação do FMEA	16
Figura 2 – Pilares da TPM	21
Figura 3 – Copo Produzido pela <i>Cupper</i>	31
Figura 4 – Fluxograma da Linha de Produção	32
Figura 5 – Evolução da Conformação da Lata	33
Figura 6 – Máquina de Lavagem e Secagem das Latas de Alumínio	34
Figura 7 – Impressora de Rótulos em Latas de Alumínio	34
Figura 8 – Forno de Pinos	35
Figura 9 – Conjunto Bico e Pistola de Pulverização	35
Figura 10 – Parte Traseira da <i>Cupper</i>	36
Figura 11 – Montagem do <i>Inner</i> e <i>Outer</i>	37
Figura 12 – Corte da chapa Realizado pelo (<i>outer</i>)	37
Figura 13 – Conformação do <i>blank</i>	38
Figura 14 – Sistema Pneumático <i>BlowOff</i>	38
Figura 15 – Transportador de Copos da <i>Cupper</i>	39
Figura 16 – Posicionamento do Relógio Comparador na Medição do Paralelismo	41
Figura 17 – Sensor de Detecção da <i>Shut Height Failure</i> Posicionado à Frente da Placa	42
Figura 18 – Localização do Sensor (Parte Frontal da <i>Cupper</i>)	42
Figura 19 – Localização do Sensor (Parte de Trás da <i>Cupper</i>)	43
Figura 20 – Especificação do Sensor no Esquema Elétrico da Prensa	50
Figura 21 – Sensor Indutivo Ifm IG5593	50
Figura 22 – Montagem do Sensor Indutivo na <i>Cupper</i>	51
Figura 23 – Método de Aproximação da Peça	51
Figura 24 – Gráfico de Comutação e Desligamento	52
Figura 25 – Distancias de Comutação Padrão	52
Figura 26 – Sistema Fuso Trapezoidal	53
Figura 27 – Sistema de Controle do Motor	54
Figura 28 – Bancada Montada	55
Figura 29 – Fatores de Correção para Diferentes Tipos de Metal	55
Figura 30 – Posição Inicial da Peça Alvo	56
Figura 31 – Representação Esquemática das Variáveis	57
Figura 32 – Medição das variáveis Componentes de D_x	58
Figura 33 – Representação Esquemática das Variáveis	58
Figura 34 – Medição das variáveis Componentes de D_y	59
Figura 35 – Teste Padrão da frequência de Comutação	60
Figura 36 – Bancada de Teste Dinâmico	61

Figura 37 – Fluxograma para Medição da Quantidade de Pulsos	62
Figura 38 – Tipos de Medições do Paquímetro	64
Figura 39 – Paquímetro Digital MTX	65
Figura 40 – Tacômetro Digital Minipa	66
Figura 41 – Fluxograma 1 para Cálculo de Incertezas de Medição	67
Figura 42 – Fluxograma 2 para Cálculo de incertezas de medição	68
Figura 43 – Diagrama de Ishikawa para FMEA	76
Figura 44 – Gráfico Ensaio Estático	79
Figura 45 – Regulagem em Milímetros	83

Lista de tabelas

Tabela 1 – Distâncias de Acionamento e Desligamento Padrão	80
Tabela 2 – Quantidade de Pulsos pelo RPM colocado	81

Lista de quadros

Quadro 1 – As 12 Etapas de Desenvolvimento da TPM	23
Quadro 2 – Modo de Falha com a Abordagem Funcional	26
Quadro 3 – Modo de Falha com a Abordagem Estrutural	26
Quadro 4 – Passos para Aplicação do FMEA	28
Quadro 5 – Representação da Escala para Definição de Prioridades	29
Quadro 6 – Exemplo de Formulário do FMEA	30
Quadro 7 – Fatores que Influenciam na Falha	40
Quadro 8 – Critérios para Avaliação do NPR	45
Quadro 9 – Incertezas de Medição do Paquímetro Digital MTX	65
Quadro 10 – Incertezas de medição do Tacômetro Digital Minipa	66
Quadro 11 – Resultado 1 do Questionário que Compõe o FMEA	75
Quadro 12 – Resultado 2 do Questionário que Compõe o FMEA	75
Quadro 13 – Formulário do FMEA Preenchido	76

Lista de abreviaturas e siglas

FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
GPM	Golpes Por Minuto
Hp	<i>Horse Power</i>
O	Ocorrência
S	Severidade
D	Detecção
NPR	Número de Prioridade de Risco

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Principal	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Manutenção Industrial	18
2.1.1	Manutenção Corretiva	18
2.1.1.1	Manutenção Corretiva Não Planejada	19
2.1.1.2	Manutenção Corretiva Planejada	19
2.1.2	Manutenção Preventiva	19
2.1.3	Manutenção Preditiva	20
2.2	<i>Total Productive Maintenance - TPM</i>	20
2.2.1	Conceitos e Características da TPM	20
2.2.2	Objetivos da TPM	22
2.2.3	Implementação da TPM	22
2.3	Análise de Modos e Efeitos de Falha - FMEA	24
2.3.1	Definições	26
2.3.2	Tipos de FMEA	27
2.3.3	Procedimento Para a Execução do FMEA de Produto	27
2.3.4	Número de Prioridade de Risco (NPR)	28
2.4	Aplicação do FMEA	29
3	ESTUDO DE CASO	31
3.1	Processo de Fabricação de Latas de Alumínio	31
3.1.1	Conformação Mecânica	33
3.1.2	Processo de Lavagem das Latas de Alumínio	33
3.1.3	Impressão dos Rótulos e Revestimento Externo	34
3.1.4	Revestimento Interno	35
3.1.5	Formação do Pescoço da Lata e Paletização	36
3.2	Cupper	36
3.2.1	Detalhamento do Problema	40
3.2.2	Caracterização da Folga Máxima	40
3.2.3	Método de Detecção da Falha	41

4	METODOLOGIA	44
4.1	Aplicação do FMEA na Empresa	44
4.1.1	Aquisição de Dados do FMEA	45
4.1.1.1	<i>Brainstorming</i>	45
4.1.1.2	Elaboração do Questionário	47
4.1.2	Análise de Dados do FMEA	48
4.2	Bancadas de Teste do Sensor Indutivo	49
4.2.1	Bancada de Teste Estático	50
4.2.2	Procedimento de Medição para Bancada de Teste Estático	56
4.2.2.1	Deslocamento Lateral D_x	57
4.2.2.2	Distância do sensor até a peça alvo D_y	58
4.2.3	Bancada de Teste Dinâmico	60
4.2.4	Procedimento de Medição para Bancada de Teste Dinâmico	62
4.3	Cálculo das Incertezas de Medição	63
4.3.1	Instrumentos de Medição	63
4.3.1.1	Paquímetro Digital MTX	64
4.3.1.2	Tacômetro Digital Minipa	65
4.3.2	Procedimento para Cálculo das Incertezas de Medição	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1	FMEA	74
5.2	Experimentos	77
5.2.1	Ensaio Estático	78
5.2.2	Ensaio Dinâmico	80
5.3	Discussão dos Resultados	82
5.3.1	FMEA	82
5.3.2	Elemento Sensor Incapaz de Realizar as Medidas com Sensibilidade e Precisão Suficientes	82
5.3.3	Regulagem da Distância do sensor em Relação à Peça Alvo	83
5.3.4	Vibração no Cabo do Sensor	84
5.3.5	Sujeira	84
6	CONCLUSÃO	85
6.1	Limitações do Trabalho	85
6.2	Recomendações a Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS	87

APÊNDICES	91
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA REALIZAÇÃO DO FMEA	92
APÊNDICE B – MONTAGEM DO CIRCUITO COM ARDUÍNO E CÓDIGO EM C++	102
APÊNDICE C – MEDIDAS E IMPRESSÃO DA BANCADA DE TESTES ESTÁTICOS	105
APÊNDICE D – BANCADA ELETRO-HIDRÁULICA	106
APÊNDICE E – PEÇA DE SUPORTE PARA ENSAIO DINÂMICO	109
APÊNDICE F – PRGRAMAÇÃO NO SOFTWARE TIA V12 PARA CONTROLE DO CLP	110
APÊNDICE G – PLANILHA DE CÁLCULOS PARA TESTE ES- TÁTICO	112

1 Introdução

O mercado competitivo e as exigências dos consumidores têm feito com que as empresas busquem a melhoria contínua em seus produtos, reduzindo custos e melhorando a qualidade com o objetivo de alcançar a satisfação dos clientes. Para que estes quesitos sejam alcançados, [Sakurada \(2001\)](#) argumenta ser necessária a implementação de soluções utilizando programas de qualidade e confiabilidade na produção.

A confiabilidade é definida por [Dias \(1997\)](#) como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo, visando assim fornecer um produto de qualidade. Para garantir confiabilidade e qualidade de um produto segundo [Souza et al. \(2014\)](#) deve-se haver investimentos expressivos, pois a não qualidade e não confiabilidade resulta em gastos muito maiores.

Uma das formas de aplicar um programa de melhoria na confiabilidade e qualidade do produto é a identificação e prevenção das falhas ocorridas nos equipamentos da linha de produção. [Capetti \(2005\)](#) cita em sua obra que é importante o aumento da disponibilidade dos equipamentos, principalmente daqueles que constituem os gargalos. Para isso, um bom planejamento de manutenção é essencial. A manutenção ineficaz e tempos de manutenção corretiva elevados levam ao aumento das perdas de produção e redução de lucros. Para garantir a disponibilidade dos equipamentos, os autores [Guimaraes, Nogueira e Silva \(2012\)](#) utilizaram a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis - Análises de Modos de Falhas e Efeitos*).

Segundo [Krum \(2014\)](#), o FMEA é uma ferramenta que busca evitar que ocorram falhas no projeto do produto ou processo. Com sua utilização, se está diminuindo as chances do produto ou o processo falhar, ou seja, buscando aumentar sua confiabilidade. Com o uso do FMEA será possível verificar os modos de falhas, seus efeitos e tentar identificar causas com o intuito de evitar paradas desnecessárias, gastos humanos e despesas em manutenções não programadas.

Com o uso do FMEA será possível verificar os modos de falhas, seus efeitos e suas causas a fim de encontrar uma solução adequada para que sejam evitadas paradas desnecessárias e despesas com manutenções não programadas. Esta ferramenta será aplicada em uma indústria de latas de alumínio.

Na linha de produção existe uma única prensa hidráulica responsável por cortar e estampar o alumínio, processo essencial realizado antes da formação do corpo da lata. Considerando estes fatores se faz necessária a melhoria contínua e o emprego de ferramentas para estudar e eliminar falhas.

FMEA

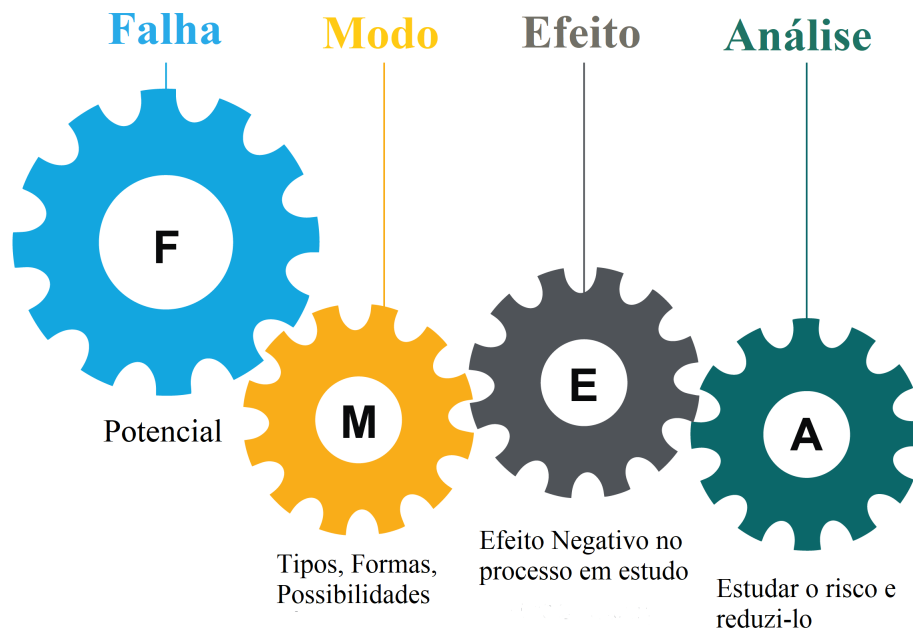


Figura 1 – Dinâmica de Implementação do FMEA

Fonte: [Quest \(2019\)](#)

1.1 Justificativa

Na primeira etapa da produção da lata de alumínio está o processo de corte e estampagem para fazer peças no formato de cinzeiro denominado copo, que posteriormente se transformará no corpo da lata. A máquina que faz o corte e estampagem do alumínio na linha de produção é a prensa de dupla ação *Cupper*. Esta apresentou uma falha denominada "*Shut Height Failure*". A fabricante implementa um sistema que detecta esta falha. Nesta ocasião, o sistema de detecção falhou, resultando em aumento no tempo de parada e aumento nos custos envolvidos.

O FMEA foi implementado para suprir a necessidade de se utilizar um método difundido no meio industrial e documentado no meio acadêmico para a análise dos modos de falha presentes no sistema de detecção e conseqüentemente encontrar as suas causas. Proporcionando meios de adquirir conhecimentos sobre o histórico da falha, diminuir ou eliminar a probabilidade da ocorrência futura e diminuir custos, pela eliminação de paradas não programadas.

A partir dos dados do FMEA, justifica-se a realização de experimentos, discussões e ações acerca das causas apontadas com o intuito de eliminar ou reduzir a ocorrência da falha.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Implementar a metodologia FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis* - Análises de Modos de Falhas e Efeitos) para analisar os modos de falha do sistema que detecta a falha na prensa Cupper e identificar suas potenciais causas. Após identificadas as causas, realizar experimentos para aferição da capacidade de componentes e discutir sobre procedimentos de manutenção a fim de eliminar a ocorrência do modo de falha.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos serão apresentados com o intuito de embasar e nortear o estudo como um todo visando o objetivo principal. São eles:

- Implementar o FMEA em um problema real e de interesse de uma empresa.
- Validar as conclusões do FMEA com experimentos e discussões sobre procedimentos de manutenção.
- Projetar e construir bancadas para realização dos experimentos.
- Propor medidas de melhorias técnicas e administrativas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este texto será estruturado da seguinte forma: No capítulo 2, será apresentada toda a teoria embasada na bibliografia das ferramentas e processos envolvendo os diferentes tipos de manutenção industrial; No capítulo 3, serão apresentadas as características da linha de produção, o detalhamento da máquina e o sistema abordado; No capítulo 4, a metodologia será apresentada, detalhando a forma como a ferramenta foi implementada na empresa, os procedimentos de construção das bancadas e realização dos experimentos, bem como os cálculos necessários para se obterem os resultados e as incertezas de medição; No Capítulo 5, os resultados da metodologia FMEA serão apresentados e conseqüentemente todos os aspectos abordados nas causas da falha proposta. Serão também discutidos estes resultados para uma melhor compreensão e detalhamento dos mesmos; No capítulo 6, se dará a conclusão do documento, ressaltando todos os aspectos importantes, os benefícios e as dificuldades de se realizar a pesquisa.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão apresentados os diferentes tipos de manutenção industrial e sua importância para as cadeias produtivas de hoje. Logo após, os conceitos de Manutenção Produtiva Total, do inglês *Total Productive Maintenance* (TPM) serão apresentados e mostrarão o funcionamento de uma filosofia de manutenção total dentro de uma empresa focada em seus clientes, atuando em todos os níveis, do gerente geral até os operadores das máquinas. Por fim, será apresentada, detalhada e exemplificada a ferramenta que é utilizada de acordo com os autores estudados para que a TPM seja implementada. Esta ferramenta se denomina *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA).

2.1 Manutenção Industrial

De acordo com [Guimaraes, Nogueira e Silva \(2012\)](#) a manutenção industrial sofreu grandes mudanças após a segunda guerra mundial para atender a demanda do mercado. Segundo [Kardec e Nascif \(2007\)](#), devido a conjuntura econômica nesta época, a produtividade não era prioritária, resultando na não necessidade de uma manutenção sistemática, como serviços de limpeza, lubrificação e reparo após a quebra, ou seja, havia somente uma manutenção fundamentalmente corretiva.

Ainda segundo os autores [Kardec e Nascif \(2007\)](#) a partir da década de 70, a paralisação da produção que causava perdas na capacidade produtiva e aumentos de custos além de afetar a qualidade dos produtos, era uma preocupação generalizada em todos os setores da indústria. O crescimento da automação e mecanização industrial passou a indicar que a confiabilidade e a disponibilidade se tornaram pontos-chave nos setores industriais, demonstrando a necessidade de se aplicar novos métodos de manutenção.

Segundo [Viana \(2002\)](#), os tipos de manutenção são as formas de encaminhar as intervenções nos instrumentos de produção, ou seja, nos equipamentos de uma determinada planta. Sendo assim, observa-se que existe um consenso quanto aos tipos de manutenção. Os principais tipos estão descritos nas seções subsequentes.

2.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva ocorre em duas situações: quando o equipamento apresenta um desempenho abaixo do esperado ou quando ocorre a falha no mesmo. Verifica-se então, que sua principal função é corrigir as condições de funcionamento de um determinado equipamento ou sistema. Baseando-se nessa definição, a manutenção corretiva se divide em: Não Planejada e Planejada.

2.1.1.1 Manutenção Corretiva Não Planejada

Este é o tipo de manutenção que segundo [Viana \(2002\)](#) acontece após a falha do equipamento sem que haja tempo para a preparação dos serviços, trazendo prejuízos enormes para as empresas, implicando em altos custos causados pela interrupção da produção.

Um dos maiores desafios dos setores responsáveis pela manutenção dentro das indústrias é conseguir evitar este tipo de manutenção, que mesmo trazendo consigo vários transtornos, ainda é muito praticada até os dias de hoje.

2.1.1.2 Manutenção Corretiva Planejada

Neste tipo de manutenção se utiliza as informações do acompanhamento preditivo para prever quando a falha vai ocorrer, possibilitando assim um planejamento das atividades com o intuito de reduzir os custos e o tempo gastos na manutenção.

Segundo [Kardec e Nascif \(2007\)](#) é a correção da falha ou perda de desempenho, por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função do acompanhamento preditivo.

2.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva segundo [Viana \(2002\)](#), ao contrário da corretiva, visa evitar a falha. É realizada em equipamentos que estejam operando em perfeitas condições. Funciona definindo o período de parada para que a manutenção ocorra antes da falha acontecer. Desta forma podem-se ter duas situações: a primeira é quando o equipamento é parado bem antes do necessário; a segunda é a falha do mesmo, por estimar o período de reparo de maneira incorreta.

Considerando estas duas situações é importante ressaltar que o período de parada tem que ser previsto por pessoas experientes, que conheçam o equipamento a ser mantido, seguindo as recomendações do fabricante e considerando as condições climáticas de operação, que podem de alguma maneira alterar o seu comportamento operacional.

A manutenção preventiva traz a desvantagem de poder introduzir defeitos não existentes no equipamento devido a:

- Falhas humanas.
- Falha nos componentes sobressalentes.
- Contaminações em sistemas do equipamento.
- Falhas ocasionadas durante partidas e paradas dos equipamentos.
- Falhas nos procedimentos de manutenção.

2.1.3 Manutenção Preditiva

Este tipo de manutenção nada mais é do que uma manutenção preventiva baseada na condição do equipamento. Permite o acompanhamento do equipamento através de medições realizadas enquanto ele está em pleno funcionamento, o que garante maior disponibilidade, já que este vai sofrer intervenção somente quando estiver próximo de um limite estabelecido pela equipe de manutenção. [Viana \(2002\)](#) argumenta que a manutenção preditiva prediz a falha, e quando a intervenção para o reparo acontece, ocorre na verdade uma manutenção corretiva programada.

As condições básicas para que seja implementado este tipo de manutenção, são as seguintes:

- O equipamento, sistema ou instalação deve permitir algum tipo de monitoramento.
- O equipamento, sistema ou instalação deve ter a escolha por este tipo de manutenção justificada pelos custos envolvidos.
- As falhas devem ser originadas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada.

2.2 *Total Productive Maintenance* - TPM

Para [Wyrebski \(1997\)](#), a TPM, deve ser encarada como uma filosofia de gestão empresarial centrada na disponibilidade total do equipamento para a produção. Tal filosofia deve ser seguida por todos os segmentos da empresa, desde a alta gerência até o operador do equipamento. De acordo com [Kardec e Nascif \(2007\)](#), os pilares do TPM estão representados na figura 2.

Autores como [Wyrebski \(1997\)](#), [Kardec e Nascif \(2007\)](#) concordam que esta filosofia tem princípios e metas estabelecidas, porém, divergem na forma de apresentar seus conceitos no que diz respeito a classificação ou à nomenclatura.

2.2.1 Conceitos e Características da TPM

A definição da TPM, proposta em 1971 pela [JIPM \(1989\)](#), foi revista em 1989, estabelecendo-se uma nova exposição, que é constituída dos cinco itens seguintes:

- Tem como objetivo a constituição de uma estrutura empresarial que busca a máxima eficiência do sistema de produção (eficiência global).
- Constitui no próprio local de trabalho, mecanismos para prevenir as diversas perdas, atingindo “zero de acidente, zero de defeito e zero de quebra/falha”, tendo como objetivo o ciclo total de vida útil do sistema de produção.

- Estrutura envolvendo todos os departamentos, começando pelo departamento de produção e se estendendo aos setores de desenvolvimento, vendas, administração etc.
- Deve contar com a participação de todos, desde a alta cúpula até os operários de primeira linha.
- Atinge a perda zero por meio de atividades sobrepostas de pequenos grupos.

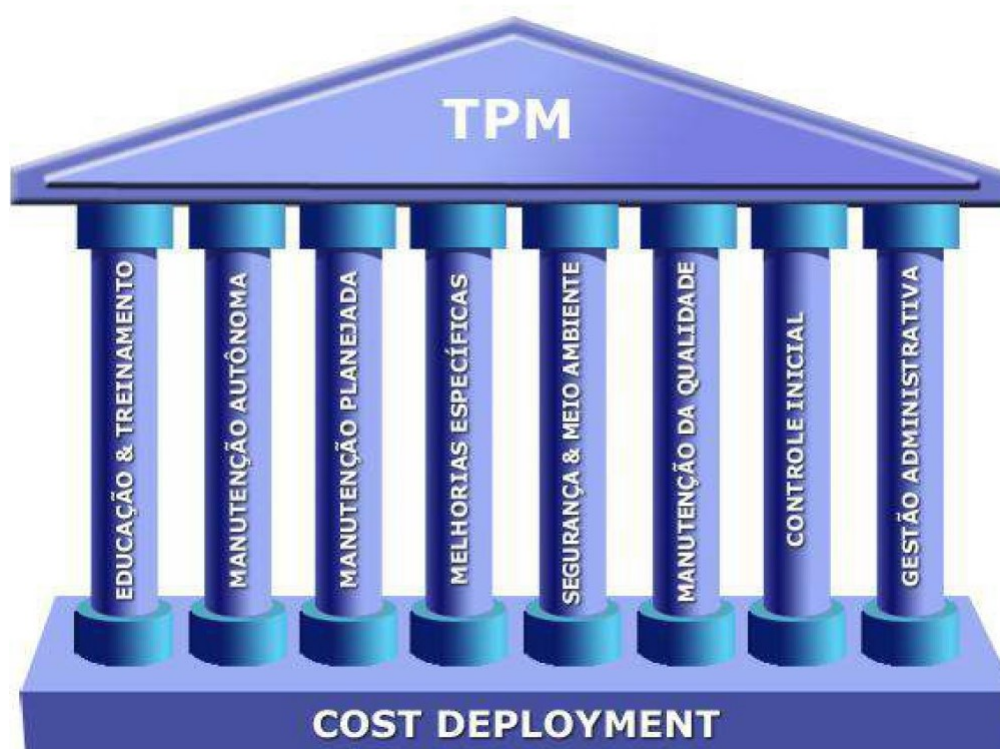


Figura 2 – Pilares da TPM
Fonte: Kardec e Nascif (2007)

A partir da definição proposta por [Tahashi e Osada \(1993\)](#), pode-se delinear algumas características que diferenciam a TPM de movimentos tradicionais como o da manutenção do sistema de produção.

- A busca da economicidade - a manutenção produzida deve proporcionar lucros.
- Um sistema integrado - todos os setores da empresa devem ser incluídos e devem trocar informações entre si.
- Manutenção espontânea executada pelo próprio operador - atividade de pequenos grupos.

Partindo da definição da JIPM (1989), verifica-se, portanto, que “a manutenção produtiva total é o envolvimento dos operários nos trabalhos de prevenção e correção dos defeitos em seus equipamentos”.

2.2.2 Objetivos da TPM

De acordo com Tahashi e Osada (1993), o objetivo da TPM é “a melhoria da estrutura empresarial mediante a melhor da qualidade de pessoal e de equipamento”. Melhoria da qualidade de pessoal significa a formação de pessoal adaptado à era da Automação Fabril. Mediante a melhoria da qualidade de pessoal realiza-se a melhoria da qualidade do equipamento, que inclui atingir a eficiência global dos mesmos.

Para atingir a eficiência global dos equipamentos, a TPM visa a eliminação das perdas que a prejudicam. Tradicionalmente a identificação das perdas era realizada ao se analisar estatisticamente os resultados dos usos dos equipamentos, só então eram investigadas as causas. O método adotado pela TPM examina a produção de *inputs* (homem, máquina, materiais e métodos). Ele é mais proativo do que reativo, uma vez que corrige as deficiências do equipamento, do operador e o conhecimento do administrador em relação ao equipamento. Deficiências de *input* são consideradas perdas e o objetivo é a eliminação das mesmas.

Segundo Tahashi e Osada (1993), as seis grandes perdas são:

- Por parada devido à quebra/falha.
- Por mudança de linha e regulagens.
- Por operação em vazio e pequenas paradas.
- Por queda de velocidade.
- Por defeitos gerados no processo de produção.
- No início da operação e por queda de rendimento.

2.2.3 Implementação da TPM

Na figura 2, o autor apresenta os oito pilares da TPM, estes são conceitos que devem ser seguidos por todo o corpo empresarial para a filosofia se consolidar internamente. O autor Yamaguchi (2005) apresenta etapas a serem seguidas para que a TPM seja completamente implementada. A implementação está dividida em quatro fases, cada uma com suas etapas estabelecidas. O quadro 1 apresenta as doze etapas.

FASES	ETAPAS	PONTOS PRINCIPAIS
Preparação para a introdução.	1. Manifestação da alta direção sobre a decisão de introduzir o TPM	Essa manifestação deve acontecer nun encontro interno da empresa sobre TPM, e deve ser publicada nun boletim interno da empresa.
	2. Campanha de divulgação e treinamento para introdução do TPM.	Executivos: Realizam estudos em grupo, conforme os cargos que ocupam. Funcionários em geral: passam por seções orientadas por projeção de "slides" ou outros recursos.
	3. Estrutura para implantação do TPM	Comissão ou grupos de estudo por especialidade.
	4. Estabelecimento de diretrizes básicas e metas para TPM.	Benchmark e metas: previsão dos resultados.
	5. Elaboração do plano diretor para implantação do TPM.	Desde os preparativos para introdução até os detalhes da implantação.
Início da Introdução	6. Início do programa de TPM	Convidar os clientes, empresas relacionadas e empresas colaboradoras.
Implementação	7. Aperfeiçoamento individualizado nos equipamentos para melhorar o rendimento operacional.	Seleção de um equipamento modelo: organização de uma equipe de projetos.
	8. Estruturação da manutenção por iniciativa própria.	Método de evolução passo a passo, diagnóstico e aprovação.
	9. estruturação da manutenção programada pelo departamento de manutenção.	Manutenção periódica, manutenção preditiva, controle de construções, peças sobressalentes, ferramentas e desenhos.
	10. Treinamento para melhoria do nível de capacitação da operação e da manutenção.	Treinamento concentrado dos líderes: treinamento das outras pessoas envolvidas.
	11. Estruturação do controle da fase inicial de operação dos equipamentos.	Projeto MP: controle de flutuação na fase inicial.
Consolidação	12. Execução total do TPM e elevação do nível geral	Recebimento do premio PM: busca de maior desafio através de objetivos cada vez mais ambiciosos.

Quadro 1 – As 12 Etapas de Desenvolvimento da TPM

Fonte: Yamaguchi (2005)

O autor apresenta as etapas e nelas constam as melhorias dos equipamentos. Especificamente na fase de implementação, observa-se que a sétima etapa se dedica ao aperfeiçoamento individualizado nos equipamentos para melhorar o rendimento operacional. Ainda de acordo com Yamaguchi (2005), esta etapa é aplicada da seguinte maneira:

Selecionando um equipamento e com a equipe de projeto composta pelo pessoal da engenharia de processo e da manutenção, supervisores de linha de produção e operários, é possível efetuar as melhorias individualizadas destinadas a elevar o rendimento dos equipamentos e comprovar os efeitos positivos do TPM.

Como equipamento alvo, deve ser escolhido aquele que seja um gargalo na produção e/ou que tenha sofrido perdas nos últimos três meses, sendo assim, após a implementação, os resultados serão satisfatoriamente relevantes.

Para consolidar o procedimento, deve-se escolher qual das 6 grandes perdas (por parada devido à quebra/falha, por mudança de linha e regulagens, por operação em vazio e pequenas paradas, por queda de velocidade, por defeitos gerados no processo de produção, no início da operação e por queda de rendimento), é a que melhor atende à necessidade de redução de perdas.

Já em relação às melhorias individuais, é necessário utilizar todos os métodos relevantes, tais como a engenharia industrial, o controle de qualidade, engenharia de confiabilidade, ou outros. Para eliminar perdas crônicas em um equipamento, pode-se utilizar uma das metodologias conhecidas da engenharia de confiabilidade.

2.3 Análise de Modos e Efeitos de Falha - FMEA

O FMEA, do inglês *Failure Mode and Effects Analysis*, de acordo com Lafraia (2001), é uma ferramenta indutiva, estruturada e lógica que permite identificar potenciais falhas de um sistema, projeto e/ou processo, classificando-as conforme a criticidade obtida e tendo como objetivo eliminar ou minimizar os riscos associados a cada modo de falha. Os autores Kardec e Nascif (2007) expõem que com a utilização do FMEA, se estão diminuindo as chances do produto ou processo falhar, buscando aumentar sua confiabilidade, produtividade e disponibilidade.

De acordo com Sakurada (2001), o FMEA se originou em nove de novembro de 1949, no exército norte americano, em forma de um procedimento militar. Inicialmente o procedimento chamado de MIL-P-1629 (*Military Procedure MIL-P-1929*) serviu para delimitar uma técnica para demonstrar falhas em equipamentos e análise de sua criticidade. As falhas eram classificadas de acordo com o sucesso das missões, do contingente e do equipamento.

Em meados de 1960, o FMEA foi utilizado pela NASA (*National Aeronautics*

and Space Administration) nos Estados Unidos, nas viagens espaciais, tecnologia nuclear e nas missões Apolo. Segundo Dailey (2004), o método vem sendo utilizado no ramo Automobilístico desde 1976, a fim de evitar que problemas na linha de produção chegassem até o consumidor.

De acordo com Krum (2014), o FMEA é aplicado para:

- Diminuir a probabilidade da ocorrência de erros em produtos ou processos que já estão em operação.
- Diminuir a ocorrência de falhas que ainda não tenham ocorrido (falhas potenciais).
- Diminuir a ocorrência de falhas em projetos de produtos ou processos.
- Aumentar a qualidade em procedimentos técnicos e administrativos.

O autor Stamatis (1995) definiu alguns benefícios que o uso da ferramenta traz:

- Estabelece uma prioridade de ações de melhoria de projeto.
- Identificação das características críticas ou significativas.
- Ajuda a identificar e eliminar os problemas potenciais de segurança.
- Estabelece uma prioridade de ações corretivas.
- Redução significativa dos custos.
- Auxilia nas análises dos fluxos de trabalho.
- Melhoria da qualidade.
- Ajuda a alcançar e superar as expectativas dos clientes.
- Melhor desempenho das equipes.
- Reduz o tempo de desenvolvimento dos produtos.
- Melhora a imagem da empresa.
- Ajuda a identificar antecipadamente as falhas, no desenvolvimento do produto.

2.3.1 Definições

Segundo a [Ford \(1997\)](#), FMEA é uma técnica analítica utilizada por um engenheiro ou um time, como uma maneira de garantir que, até a extensão possível, os modos potenciais de falha e suas causas/mecanismos associados tenham sido considerados e localizados.

Para [Sakurada \(2001\)](#) deve-se ter total conhecimento sobre o que é modo de falha e seus efeitos, para compreender completamente a ferramenta. O mesmo autor, utilizando o dicionário [Michaelis \(2000\)](#), Definiu:

- MODO é a “Forma ou maneira de ser ou manifestar-se uma coisa”; “Maneira ou forma particular de fazer as coisas, ou de falar”; “meio, via”.
- FALHA: “Defeito”, “Desarranjo, enguiço” ou “ato ou efeito de falhar”, sendo que FALHAR está descrito como “Não dar o resultado desejado, não ser como se esperava”.

Desta forma, [Sakurada \(2001\)](#), define MODO DE FALHA como sendo: “a forma do defeito”, “maneira na qual o defeito se apresenta”. Define também que o modo de falha é uma propriedade inerente a cada item. Por exemplo, um eixo pode ter como modo de falha, ruptura, empenamento e desgaste.

Para levantar os modos de falha, [Sakurada \(2001\)](#) utiliza duas abordagens. A Funcional e a Estrutural. A abordagem funcional descrita no quadro 2 é genérica, não necessita de especificações de projeto ou de engenharia.

Componente	Função	Modo de falha
Eixo	Transmitir movimento, torque.	Não transmite movimento, não transmite torque.

Quadro 2 – Modo de Falha com a Abordagem Funcional

Fonte: [Sakurada \(2001\)](#)

Componente	Função	Modo de falha
Eixo	Transmitir movimento, torque.	Ruptura, empenamento, desgaste

Quadro 3 – Modo de Falha com a Abordagem Estrutural

Fonte: [Sakurada \(2001\)](#)

O autor define que tanto na abordagem funcional como na abordagem estrutural, é muito importante que se tenha, bem definida, a função do componente, pois é a referência para se verificar quando o item está em falha ou não.

Já em relação ao termo EFEITOS do modo de falha, [Sakurada \(2001\)](#), define como sendo os resultados produzidos quando a falha ocorre. São as consequências do modo de falha. Em outras palavras, o efeito é a forma ou maneira de como o modo de falha se manifesta ou como é percebido em nível de sistema. O modo de falha ocorre internamente, em nível de componentes, subsistemas, gerando efeitos externos.

2.3.2 Tipos de FMEA

A ferramenta é classificada em dois tipos de acordo com o Instituto de Qualidade Automotiva (IQA):

- **FMEA de processo.** São consideradas as falhas no planejamento e execução do processo, o objetivo desta análise é evitar falhas do processo, tendo como referência as não conformidades do produto com as especificações do projeto.
- **FMEA de produto.** Analisa as falhas que poderão ocorrer com o produto dentro das especificações do projeto. O objetivo desta análise é eliminar falhas no produto ou nos processos decorrentes do projeto. É conhecida também como FMEA de projeto.

Autores como [Stamatis \(1995\)](#) e [Villacourt \(1992\)](#) argumentam que um FMEA pode ser desenvolvido por uma equipe. No entanto, [Palady \(2004\)](#) diz que o FMEA pode e vem sendo desenvolvido individualmente, porém, concorda que é mais eficiente quando utilizado em esforço de equipe.

2.3.3 Procedimento Para a Execução do FMEA de Produto

Os autores [Slack, Chambers e Harrison \(1987\)](#), expõem os passos para se aplicar um tipo de FMEA. Sendo utilizado por eles em um sistema, subsistema ou componente que não estão em fase de projeto, ou seja, em fase de operação. Os passos para execução do método estão descritos no quadro 4.

O autor [Sakurada \(2001\)](#) se aprofunda nestes passos em sua obra, pois cada autor referenciado para exemplificar as aplicações e os tipos de FMEA, tem uma abordagem diferente e estas estão em constante mudança com o tempo. [Slack, Chambers e Harrison \(1987\)](#) são bem diretos ao apresentar os procedimentos para o FMEA proposto. Os autores também detalham o procedimento para obtenção do NPR (Número de Prioridade de Risco), este é o valor numérico que indicará quais modos de falha serão considerados prioridade para ações corretivas nas etapas finais do uso da ferramenta.

1	Identificar todos os sistemas, subsistemas e componentes do processo/equipamentos em análise.
2	Listar todas as formas possíveis segundo as quais os componentes poderiam falhar (os modos de falhas).
3	Identificar os efeitos possíveis das falhas (tempo parado, insegurança, necessidade de ajustes e/ou consertos, efeitos para os clientes).
4	Identificar as causas possíveis das falhas para cada modo de falha.
5	Avaliar os índices de ocorrência da falha, a severidade dos efeitos da falha e a probabilidade de detecção.
6	Identificar o número de prioridade de risco (NPR).
7	Desenvolver e implementar ações para minimizar as falhas identificadas.

Quadro 4 – Passos para Aplicação do FMEA
Fonte: Slack, Chambers e Harrison (1987)

2.3.4 Número de Prioridade de Risco (NPR)

O autor Puente et al. (2002) divide o procedimento para aplicação do FMEA em dois grandes estágios. No primeiro estágio, os possíveis modos de falhas de um processo, produto ou serviço são identificados e relacionados com suas respectivas causas e efeitos. Este estágio engloba o passo um, dois, três e quatro do procedimento apresentado por Slack, Chambers e Harrison (1987), como mostrado no quadro 4.

O segundo estágio, ainda de acordo com Puente et al. (2002), consiste na determinação dos níveis críticos, ou seja, a pontuação de risco destas falhas que posteriormente serão ordenadas em ordem de prioridade. No quadro 5, está representado como se define o número de cada índice. De acordo com Brand et al. (2013), cada causa, terá seu respectivo valor de cada índice.

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), o método utilizado para priorizar os componentes mais sujeitos às falhas é a multiplicação dos três fatores (Severidade, Ocorrência e Detecção), e a partir desta multiplicação é calculado o RPN (*Risk Priority Number*) ou NPR (*Numero de Prioridade de Risco*).

2.4 Aplicação do FMEA

A aplicação do FMEA como representado no quadro 4, se dá na forma de formulários físicos ou digitais. Nestes formulários, reúnem-se todas as informações relevantes, são feitas análises e interpretações Ross et al. (2013). O quadro 6 demonstra o formulário utilizado por este autor para representar o uso da ferramenta desenvolvida em uma empresa do setor de transportes de passageiros, visando identificar as causas dos estouros de pneus nos veículos da frota.

Índice	Severidade	Ocorrência	Detecção
1	Mínima	Remota - dificilmente ocorre a causa que leva à falha	Muito grande - Certamente será detectado
2 3	Pequena - ligeira deteriorização no desempenho	Pequena - ocorre a causa da falha em pequena escala	Grande - Grande probabilidade de ser detectado
4 5 6	Moderada - Deterioração significativa no desempenho de um sistema	Moderada - às vezes ocorre a causa que leva a falha	Moderada - Provavelmente será detectado
7 8	Alta - o sistema deixa de funcionar	Alta - ocorre a causa da falha com certa frequência	Pequena - Provavelmente não será detectado
9 10	Muito Alta - idem ao anterior, porem afeta a segurança	Muito Alta - ocorre a causa da falha em vários momentos	Muito Pequena - Certamente não será detectado

Quadro 5 – Representação da Escala para Definição de Prioridades
Fonte: Brand et al. (2013)

FMEA - Análise de Efeitos e Modos de Falhas									
Descrição:		Departamento / Nome:		Abreviações:		Página 1 de 1			
Análise dos pneus dos veículos de transporte de passageiros		Qualidade/ Pessoal		SEV / Severidade		Original: 09/2006			
		Técnico/ Pessoa 2		OCO / Ocorrência		Modificado: 10/2006			
		Técnico/ Pessoa 3		DET / Detecção		Modificação n°: 01			
		Técnico/ Pessoa 4		NRP / N° Prioritário de Risco		Número do FMEA: 02			
Função	Modo de	Efeito	SEV	Causa	OCO	Controle	DET	NPR	Ação Recomendada
Não Estourar	Estourar	Atraso na hora de chegada. Insatisfação do cliente.	6	Arrastes laterais	4	Não se aplica	5	120	Treinamento motorista
			6	Choques transversais	4	Não se aplica	7	168	Treinamento motorista
			6	Aquecimento do bloco do topo	2	Não se aplica	5	60	
			6	Golpes na montagem ou desmontagem	1	Não se aplica	6	36	
			6	Infiltração na zona baixa do pneu, por quebra da borracha do talão	2	Não se aplica	8	96	
			6	Montagem de pneu sem câmara em roda de pneu com camara	1	Não se aplica	1	6	
			6	Aquecimento por uso excessivo do freio ou freio mal regulado	1	Não se aplica	8	48	
			6	Infiltração por perfuração, reparo ou quebra dos talões na montagem	1	Não se aplica	7	42	
			6	Excesso de peso	1	Não se aplica	3	18	
			6	Impacto em obstáculo	4	Não se aplica	8	192	Treinamento motorista
			6	Perfuração sem reparo	1	Não se aplica	6	36	
			6	Reparo em mau estado	1	Não se aplica	5	30	
			6	Pressões insuficientes	4	Não se aplica	7	168	Treinamento motorista
			6	Sujeira ou oxidação da roda na região de assentamento do pneu	1	Não se aplica	8	48	
6	Danos providos da roda de alumínio	5	Não se aplica	7	210	Empregar rodas de ferro			

Quadro 6 – Exemplo de Formulário do FMEA

Fonte: Ross et al. (2013)

Autores como Ross et al. (2013) e Oliveira, Paiva e Almeida (2010), citam que após aplicarem a ferramenta FMEA para seus casos específicos, as empresas obtiveram não somente retorno financeiro imediato como também obtiveram resultados significativos para reduzir a quantidade e a severidade das falhas em seus equipamentos e/ou processos. O próximo capítulo aprestará o processo de fabricação das latas de alumínio, especificará os componentes e o funcionamento da máquina e por último a falha e o método detecção da mesma, que é o objeto de estudo deste trabalho.

3 Estudo de Caso

Neste capítulo, primeiramente será detalhado o processo de fabricação das latas de alumínio. Posteriormente, a máquina alvo do estudo (Cupper) será detalhada. Prosseguindo, haverá o detalhamento do problema estudado, tudo acerca da falha do sistema de detecção. Por razões contratuais, aspectos e informações sobre o processo podem ser omitidos e fotos reais da máquina ou equipamentos foram cedidas pela empresa.

3.1 Processo de Fabricação de Latas de Alumínio

Para se ter uma lata de alumínio é necessário que a empresa processe a matéria prima, a folha de alumínio, ela não é encontrada na natureza na sua forma utilizável. Para que se possa utilizá-la e preciso extrair o minério bauxita, após o seu processamento em fornos de alta temperatura, se transforma em alumínio, em uma proporção de cinco toneladas de bauxita para uma tonelada de alumínio [Souza et al. \(2014\)](#).

Com a bobina de alumínio já produzida e dentro do processo de fabricação das latas, é colocada no desbobinador que alimenta a primeira etapa da produção, a prensa de dupla ação chamada *cupper*. Esta prensa corta a folha em vários discos e através do processo de estampagem forma o copo. Um copo pode ser visto na figura 3.



Figura 3 – Copo Produzido pela *Cupper*
Fonte: Autor

Acompanhando o fluxograma representado na figura 4, de acordo com [Abralatas \(2019\)](#), os copos seguem para a segunda prensa, a *BodyMaker*. O passo seguinte é a lavagem da lata, por dentro e por fora. Na fase de impressão, os rótulos são feitos e

podem receber até oito cores ao mesmo tempo, são duas *printers* na linha. O próximo passo é a aplicação do verniz externo e o forno para cura. Logo depois, o revestimento interno e um outro forno para cura, a última etapa de fabricação é a moldagem do perfil da boca da lata (*Necker*), para que a tampa, após envase possa ser encaixada e recravada. As latas prontas passam pelo controle de qualidade, feito por pessoas qualificadas e por meios automatizados, que incluem câmeras de alta velocidade que detectam imperfeições como furos e falta de verniz em cada lata produzida no processo. O último passo do processo é a paletização e armazenamento.

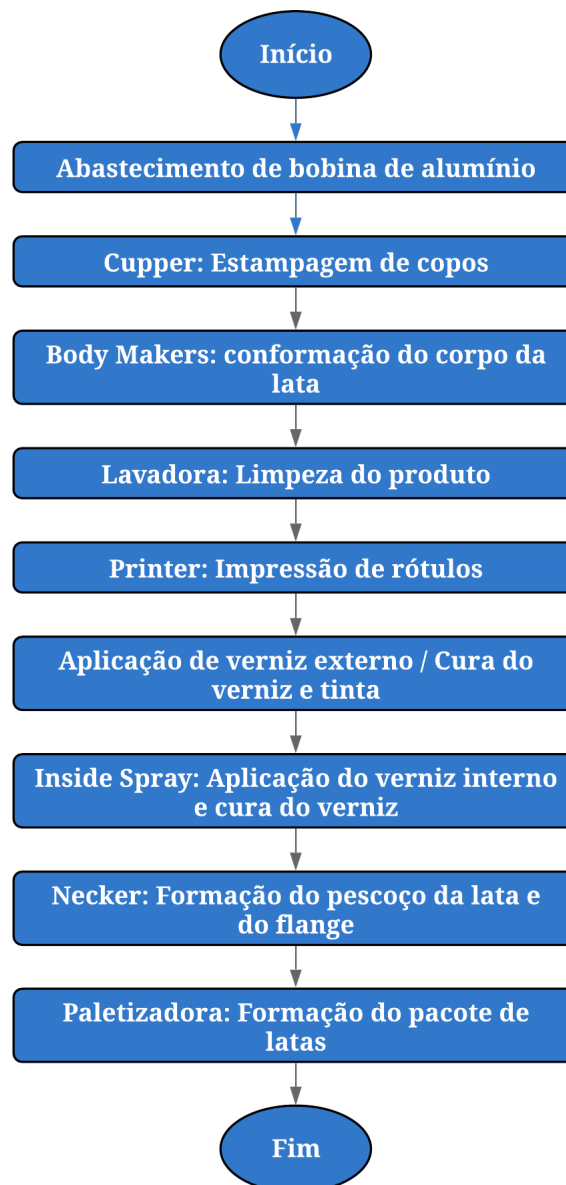


Figura 4 – Fluxograma da Linha de Produção
Fonte: Santos (2013)

3.1.1 Conformação Mecânica

O autor [CIMM \(2019\)](#) argumenta que a conformação mecânica é o processo pelo qual se aplica uma força externa a matéria-prima para que a mesma adquira o formato projetado de deformação plástica. O volume e a massa da matéria-prima se mantêm, mas a geometria do material é alterada através de forças aplicadas por ferramentas adequadas projetadas para gravar a forma desejada. Em função da temperatura e do material utilizado, a conformação pode ser classificada como trabalho a frio, a morno e a quente. No caso da indústria de embalagens de alumínio a conformação se dá a frio.

No processo de fabricação das embalagens, o corte e a estampagem da folha de alumínio se inicia na *Cupper* que faz os copos e finaliza na segunda prensa, a *bodymaker*, formadora do corpo da lata. A sequência é mostrada na Figura 5.



Figura 5 – Evolução da Conformação da Lata
Fonte: [Rekas et al. \(2015\)](#)

Nas primeiras etapas, segundo [Martins \(2017\)](#), as prensas trabalham com velocidades elevadas. A precisão nos ajustes mecânicos de folgas e alinhamentos devem ser asseguradas para não danificar as máquinas e garantir maior qualidade do produto conformado.

3.1.2 Processo de Lavagem das Latas de Alumínio

A figura 6 mostra um exemplo da máquina que realiza a limpeza das latas e aplica um tratamento sobre sua superfície preparando-as para as etapas posteriores. O processo de limpeza é realizado com a ação dos tensoativos, do ácido sulfúrico e do ácido fluorídrico.

O processo de tratamento é realizado com a aplicação de flúor zircônio, que é transformado em fosfato zircônico. É aplicado também uma camada de tensoativo orgânico chamado de *Mobility*. A finalidade dessa parte do processo é de tratar a superfície da lata, uma vez que é aplicada uma camada de proteção química à superfície, protegendo-a

contra oxidação que ocorre no processo de pasteurização na envasadura. O *Mobility* é aplicado para facilitar a mobilidade da lata dentro dos transportadores. [Abralatas \(2019\)](#).



Figura 6 – Máquina de Lavagem e Secagem das Latas de Alumínio
Fonte: [Cincinnati \(2019\)](#)

3.1.3 Impressão dos Rótulos e Revestimento Externo

As latas de alumínio limpas e secas entram na fase de impressão dos rótulos, feita por meio de um processo de flexografia (litografia) que pode utilizar até oito cores aplicadas à lata ao mesmo tempo. Em seguida, quase que simultaneamente, a lata recebe uma camada externa de verniz incolor, para aprimorar o acabamento e proporcionar brilho, além de evitar que a tinta descasque, e outra camada no fundo, para garantir a mobilidade da lata. O processo fica comprometido se o verniz de fundo não for aplicado corretamente. [Abralatas \(2019\)](#).

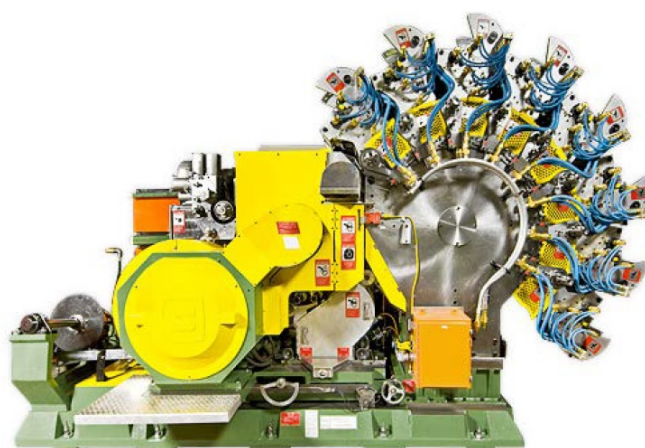


Figura 7 – Impressora de Rótulos em Latas de Alumínio
Fonte: [Stole \(2019\)](#)

A impressora da figura 7 pode aplicar até oito cores e mais o revestimento do verniz externo a uma velocidade de 2200 latas por minuto com alta resolução de imagem [Stole \(2019\)](#).

Acoplado a impressora existe um forno de pinos, responsável por fazer uma pré-secagem da impressão para que a mesma não se danifique no transporte até as máquinas de revestimento interno e cura dos vernizes interno e externo ITS (2019).

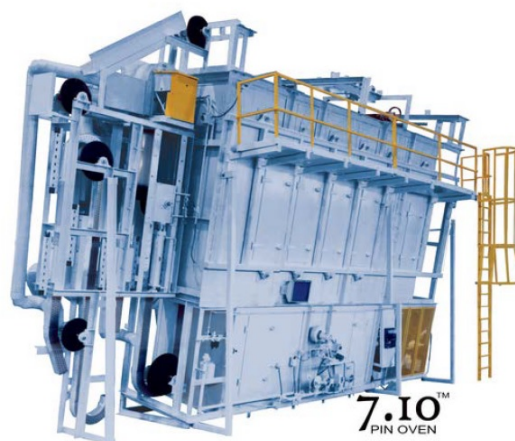


Figura 8 – Forno de Pinos
Fonte: ITS (2019)

3.1.4 Revestimento Interno

É o processo de revestimento por pulverização para as superfícies internas das latas de alumínio. As latas recebem uma camada de verniz interno de forma a evitar o contato do produto envasado diretamente com o alumínio, prevenindo mudanças de sabor ou de características químicas do líquido envasado. O material de revestimento líquido é pulverizado com precisão na superfície do interior utilizando bicos de injeção e pistolas de pulverização de alta velocidade CMB (2019), como mostra a figura 9. A pistola de pulverização é acionada eletronicamente após o sensor de presença de lata ser acionado.

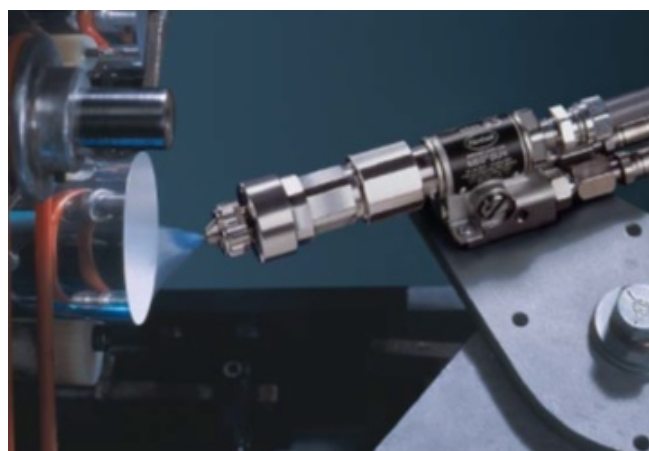


Figura 9 – Conjunto Bico e Pistola de Pulverização
Fonte: Nordson (2019)

3.1.5 Formação do Pescoço da Lata e Paletização

A última etapa de fabricação é a moldagem do pescoço e do perfil da borda para o encaixe da tampa. O pescoço da lata, além de lhe conceder uma maior resistência de coluna, reduz o diâmetro da boca, o que permite o uso de uma tampa menor, diminuindo o custo da embalagem. Depois de pronta, a lata passa pelo controle de qualidade automático, que é executado através de testes com câmeras. Finalmente, as latas são paletizadas na paletizadora, armazenadas e transportadas. [Turner e Thayer \(2001\)](#).

3.2 Cupper

A Cupper é uma prensa com força de estampagem de cento e cinquenta toneladas, utilizada para fabricar peças no formato de um cinzeiro de alumínio denominado copo, como mostra a figura 5. É o primeiro estágio da fabricação da lata. Utiliza uma folha de alumínio bobinada como matéria-prima que é posicionada na parte de traz como mostra a figura 10.



Figura 10 – Parte Traseira da Cupper
Fonte: Autor

A bobina tem cerca de dez quilômetros de comprimento, 1727mm de largura e sua espessura é de aproximadamente 0,25mm. Sua troca é necessária a cada 6 horas. Estes

valores podem variar dependendo de parâmetros externos.

A Cupper é uma prensa excêntrica de dupla ação, ou seja, de dois martelos sendo um dentro do outro como mostra a figura 11. O martelo de fora (*outer*) corta a lâmina de alumínio em formato de um disco circular (*blank*), e o de dentro (*inner*) força o *blank* por entre uma pequena matriz (*die*) para formar o copo, como mostram as figuras 12 e 13

Vira Brequim

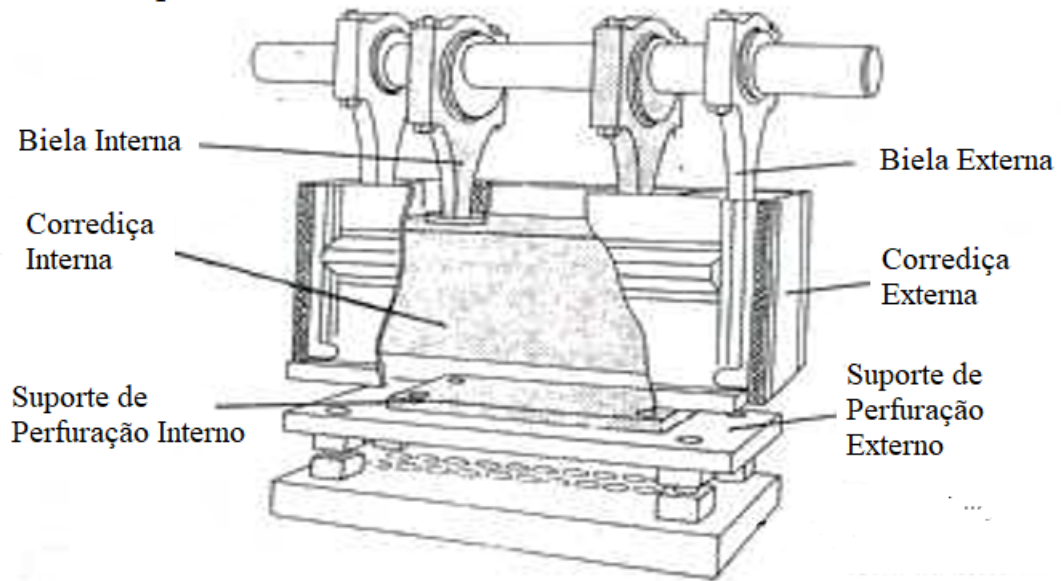


Figura 11 – Montagem do *Inner* e *Outer*
Fonte: Minster (2019)

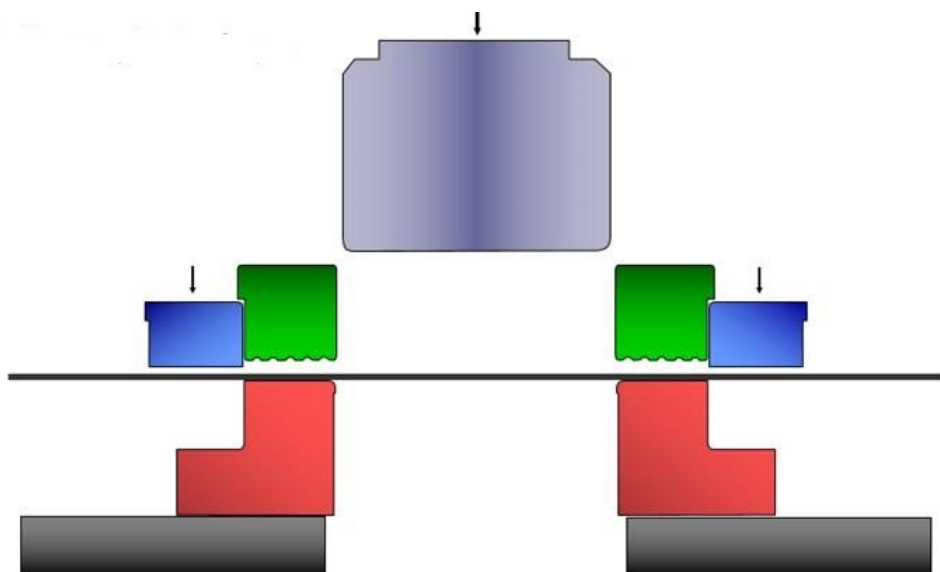


Figura 12 – Corte da chapa Realizado pelo (*outer*)
Fonte: Minster (2019)

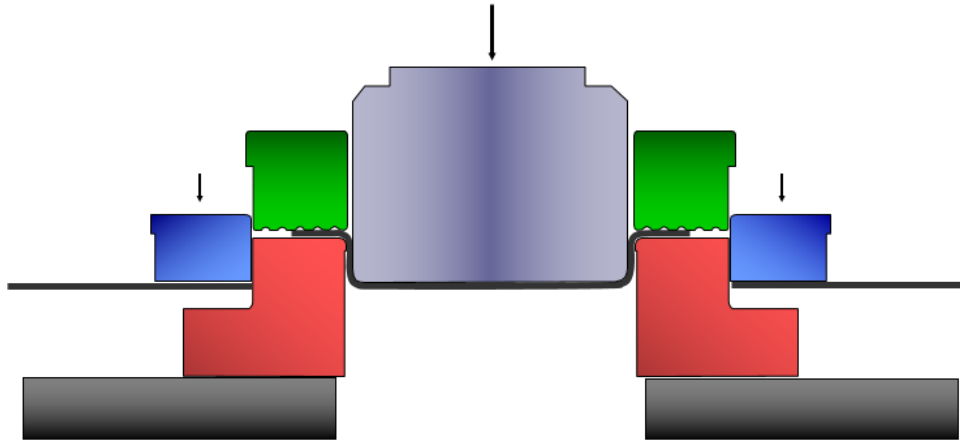


Figura 13 – Conformação do *blank*
Fonte: [Minster \(2019\)](#)

O controle de cada ciclo de produção é feito por um CLP (Controlador Lógico Programável) acoplado a um *resolver* que faz papel de *link* mecânico e elétrico no equipamento. Solenoides de sopro de ar (*BlowOff*) são utilizadas para retirar o copo do feramental e enviá-lo para o transportador a vácuo como mostram as figuras 14 e 15.



Figura 14 – Sistema Pneumático *BlowOff*
Fonte: Autor

- A seta 1 demonstra as válvulas do sistema *BlowOff*.

O modelo da Cupper utiliza um conjunto de dezesseis ferramentais matriz/punção, ou seja, ela tem a capacidade de produzir dezesseis copos por golpe. A velocidade de

operação máxima é de duzentos e quarenta golpes por minuto (240 GPM). É acionada por um motor elétrico principal de 100Hp que varia a velocidade por escorregamento magnético através de uma embreagem interna ao motor e também uma embreagem hidráulica que acopla o virabrequim ao motor.

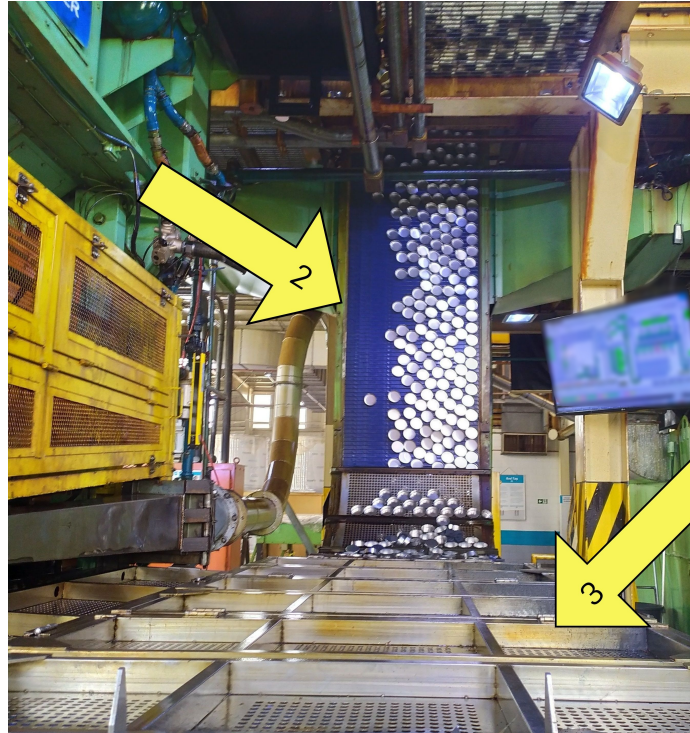


Figura 15 – Transportador de Copos da Cupper
Fonte: Autor

- As setas 2 e 3 demonstram o transportador a vácuo.

A prensa possui um sistema de lubrificação que é importante para a estampagem e deve ser monitorado para garantir que não ocorram defeitos no copo. O sistema monitora o fluxo de cada tubulação através de pressostatos. Um sistema a vácuo interno retira as sobras cortadas (*scrap*) do esqueleto de alumínio que se forma após a estampagem dos discos. Alguns fatores importantes no processo de formação dos copos são:

- Boa qualidade do corte (sem rebarbas).
- Correto *setup* do ferramental (dimensões e desgaste).
- Aplicação do lubrificante.
- Planicidade da placa de apoio.
- Paralelismo do *outer* e *inner*.

3.2.1 Detalhamento do Problema

O ciclo de operação consiste em um golpe dos dois martelos que executam o processo descrito acima. Cada martelo tem um curso de operação específico, ou seja, quanto cada um desliza verticalmente nas guias. De acordo com o manual operacional [Minster \(2019\)](#), o curso de operação do *outer* é de duas polegadas e o curso do *inner* é de cinco polegadas. O método que a equipe de manutenção deve utilizar para medir o paralelismo é especificado no manual e será mostrado na seção seguinte.

A falha é indicada como “*Shut Height Failure*” e acontece quando o sistema da prensa identifica o desalinhamento horizontal dos martelos em relação à placa de apoio e/ou a força excessiva do golpe que executa a estampagem. O manual operacional especifica alguns fatores que podem afetar o paralelismo e as causas possíveis de cada uma, bem como as ações corretivas. Como mostra o quadro 7.

Fatores que possivelmente afetam o Paralelismo	Possíveis causas	Ações Corretivas
Placa de poio desnivelada	Poeira, tinta, limálias sob a placa de apoio.	Remover as placas, fazer a limpeza e verificar o nivelamento.
Placa de apoio frouxa	Não especificado.	Reapertar os parafusos de fixação da placa.
Rolamentos desgastados ou danificados	Desgaste normal, squecimento excessivo devido a falta de lubrificação, <i>Shut Height Failure</i> .	Verificar as folgas dos rolamentos e buchas, se a folga for excessiva, efetuar a troca dos rolamentos.

Quadro 7 – Fatores que Influenciam na Falha

Fonte: [Minster \(2019\)](#)

Caso a falha venha a ocorrer, as consequências podem ser defeitos no copo, parada de produção e em casos mais graves, quebra do ferramental.

3.2.2 Caracterização da Folga Máxima

A “*Shut Height Failure*” acontece quando os martelos interno e externo estão desalinhados com o suporte de perfuração abaixo. Este paralelismo deve ser garantido visando a perfeição das peças produzidas. A fabricante especifica em seu manual de operação, o procedimento que deve ser feito para medir este paralelismo. O valores da folga devem sempre estar dentro da tolerância e são medidos periodicamente de acordo com o planejamento de manutenção vigente.

O Procedimento de medição do paralelismo consiste em posicionar um relógio comparador para efetuar as medições e confirmar se o regime de trabalho está dentro da tolerância especificada. A figura 16 ilustra a posição que o relógio comparador é posicionado.

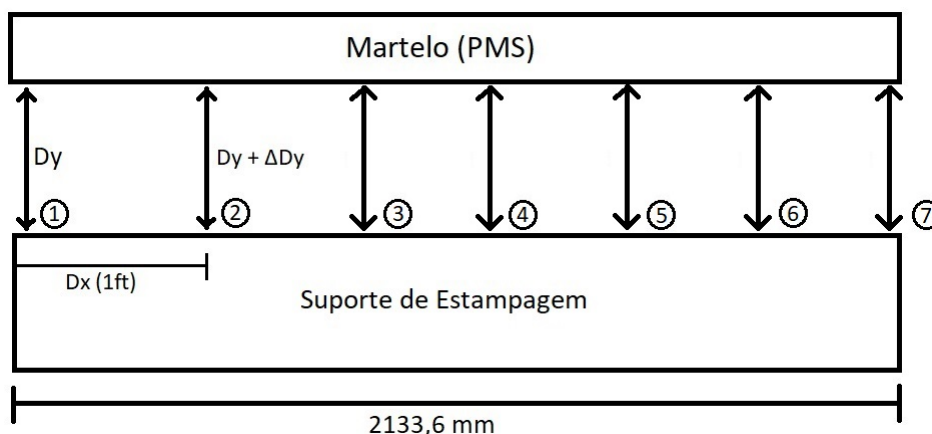


Figura 16 – Posicionamento do Relógio Comparador na Medição do Paralelismo
Fonte: Adaptado de [Minster \(2019\)](#)

A imagem ilustra que o martelo deve estar posicionado no ponto morto superior (PMS) ou seja, na posição mais afastada em relação ao suporte de estampagem. Estando nesta posição, o técnico responsável deve posicionar o relógio no ponto 1 da ilustração, em uma das extremidades. Estando posicionado, mede-se o comprimento D_y e o relógio é zerado para que seja medida a distância relativa no próximo ponto.

Com o relógio zerado no ponto 1, o operador o posiciona no ponto 2 que está situado a uma distancia D_x equivalente a $1ft$. Neste ponto, a distancia ΔD_y é medida e anotada para comparação com o valor de referência especificado pelo manual.

O manual especifica que a cada pé percorrido no suporte de perfuração, o valor de ΔD_y não deve ser maior que $0,005$ polegada, ou $0,127mm$. Se o valor medido for abaixo do especificado, o técnico zera o relógio comparador novamente e segue para a próxima medição a uma distância D_x equivalente a $1ft$ do ponto anterior. Este procedimento é feito sete vezes, visto que o comprimento D_x do suporte é de $2133,6mm$ ou $7ft$. A cada ponto medido, o valor não pode ser superior ao especificado.

Tendo como base o valor especificado pelo fabricante e o método de medição, observa-se que a folga máxima que é percebida em uma das extremidades da prensa é sete vezes o valor medido a cada pé. Então, a folga máxima permitida para a operação e que vai ser medida pelo sistema de detecção, é de $0,889mm$. O curso do movimento do martelo exterior deste modelo da prensa é de duas polegadas, ou $50,8mm$. Considerando a folga máxima, pode-se afirmar que o a distância percorrida pelo movimento é de $50,8 \pm 0,89mm$.

3.2.3 Método de Detecção da Falha

O fabricante implementa um sistema para identificar quando a “*Shut Height Failure*” acontece. Consiste em um sensor indutivo montado em uma configuração que deve identificar quando o deslocamento do *outer* é maior que a tolerância especificada.

O funcionamento básico do método de detecção consiste em um sensor montado em frente uma placa de metal fixada no *outer*, como mostra a figura 17 .



Figura 17 – Sensor de Detecção da *Shut Height Failure* Posicionado à Frente da Placa
Fonte: [Minster \(2019\)](#)

A placa deve ter a altura exata do curso de operação mais a tolerância especificada, ou seja, quando o *outer* se move, a placa se move em frente o sensor. Se o movimento passar de duas polegadas considerando a tolerância, o sensor deve enviar o sinal para o CLP indicar a “*Shut Height Failure*”.

A empresa implementou um segundo sensor posicionado geometricamente oposto ao original, para garantir que o desalinhamento seja detectado se acontecer em qualquer um dos lados da *Cupper*. As figuras 18 e 19 mostram onde os sensores estão posicionados.

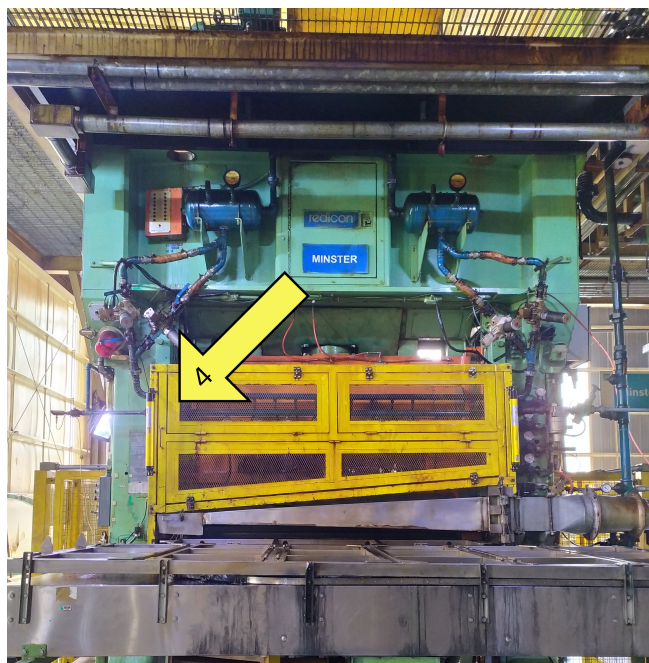


Figura 18 – Localização do Sensor (Parte Frontal da *Cupper*)
Fonte: Autor

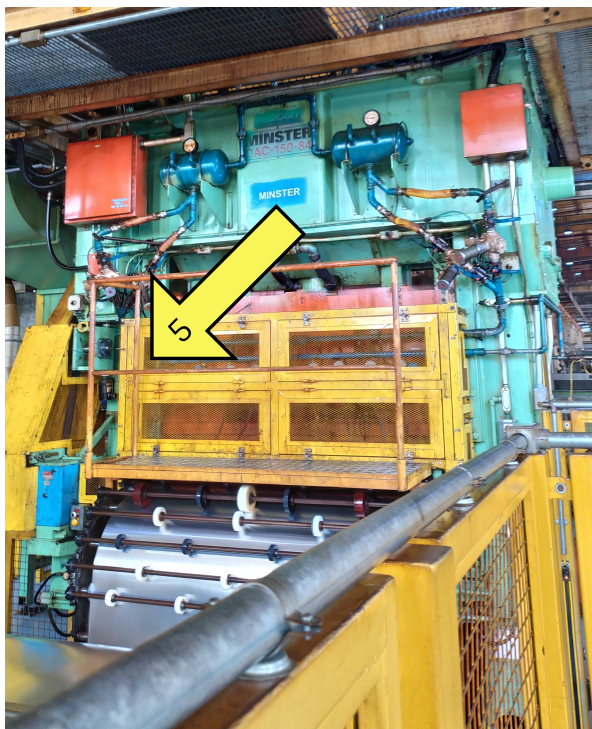


Figura 19 – Localização do Sensor (Parte de Trás da *Cupper*)

Fonte: Autor

- A seta 4 mostra onde o sensor está localizado na parte frontal da *Cupper*, abaixo da grade de proteção em amarelo.
- A seta 5 mostra onde o sensor está localizado na parte de trás da *Cupper*, abaixo da grade de proteção em amarelo.

Na ocasião em que houve uma parada não programada na máquina em consequência da “*Shut Height Failure*”, o sistema de detecção estudado não cumpriu o seu papel, ocasionando a quebra do ferramental. Quando há a quebra do ferramental, são necessárias várias horas de trabalho para a troca das peças, não somente o tempo que demora para trocar mas há também um tempo relativamente grande para a peça chegar até a empresa, visto que as ferramentas tem um custo muito alto e são importadas. Houve uma paralisação de aproximadamente 30 horas na ocasião citada, este tempo é grande considerando a quantidade de copos que a prensa produz para o resto da planta no período de uma hora.

A “*Shut Height Failure*” pode acontecer por diversos motivos, logo, o sistema de detecção se faz necessário e é de suma importância para reduzir os danos nos sistemas. O fato do sistema de detecção ter falhado na ocasião citada demonstra a necessidade de se estudar suas características e verificar se os componentes necessitam de atualizações ou se os procedimentos que envolvem precisam de revisões. Os custos envolvidos e a perda na produção quando há falha neste sistema motivaram a implementação do FMEA, os experimentos e as conclusões que serão demonstradas posteriormente.

4 Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido em uma indústria de embalagens metálicas especializada na produção de latas de alumínio. Na primeira etapa da produção, existe uma prensa que é única na linha, responsável por produzir os copos. Existe uma potencial falha nesta máquina chamada de “*Shut Height Failure*”, ela foi detalhada na seção 3.2.1 deste documento. A empresa utiliza um sistema para detectar esta falha caso ela ocorra na prensa como mostrado na sessão 3.2.3.

A finalidade é compreender o funcionamento do sistema implementado pela fabricante da máquina, definir os modos de falha, descobrir as causas e então, propor melhorias para que as causas sejam eliminadas. A partir dos dados do FMEA, foi necessária a realização de experimentos que confirmassem se as suspeitas iniciais propostas pelo departamento administrativo da empresa em relação aos componentes do sistema eram verdadeiras ou se as causas se concentravam em outros aspectos.

A coleta de dados que fundamentou a pesquisa e proporcionaram a elaboração da metodologia se deu utilizando informações fornecidas pela empresa, coletadas de acordo com técnicas específicas previstas nos métodos de investigação de falhas descritos, sempre respeitando as normas de segurança e procedimentos internos, como uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) e as recomendações do supervisor interno encarregado de acompanhar a pesquisa.

4.1 Aplicação do FMEA na Empresa

A aplicação do FMEA se deu nos moldes da bibliografia apresentada, visando identificar os modos de falha, as causas que levam a estes modos de falha e por fim, atribuir índices para classificar as causas em ordem de prioridade para que se possam tomar ações onde elas são necessárias, evitando desperdício de recursos.

Como visto na seção 2.3.4, a aplicação se dá em dois grandes estágios, considerando os autores citados e o quadro 4. O primeiro estágio engloba os passos um ao quatro que consistem em identificar os sistemas, listar os modos de falha, identificar os possíveis efeitos da falha e finalmente suas possíveis causas. Posteriormente, foram obtidos os índices de Ocorrência, Severidade e Detecção observados no questionário disponibilizado, sendo possível assim calcular o número NPR através da Equação 4.1.

$$NPR = O \times S \times D \quad (4.1)$$

Em que,

- O = Índice de Ocorrência
- S = Índice de Severidade
- D = Índice de Detecção

Com o valor de NPR, pode-se então, confeccionar o quadro do FMEA a exemplo do que foi apresentado na seção 2.4. O resultado do quadro será apresentado na seção 5.1 desta pesquisa e serviu de base para o prosseguimento do trabalho.

Com este resultado, é possível analisar os NPR's das diferentes causas de falhas de acordo com o quadro 8. Se o NPR for maior que oito, é necessária a tomada de ações para que seja analisada a possível causa do modo de falha.

NPR (Número de Prioridade de Risco)	Índice de Risco
36 a 125	Crítico, obrigatório abrir ações para diminuir o risco
9 a 35	Moderado, analisar necessidade de abrir ação
1 a 8	Baixo Risco, não há necessidade de abrir ação

Quadro 8 – Critérios para Avaliação do NPR
Fonte: Krum (2014)

4.1.1 Aquisição de Dados do FMEA

Os primeiros passos da metodologia do FMEA foram realizados através de um *brainstorming* e de um questionário digital confeccionado na plataforma *GoogleForms*. Estas ferramentas utilizadas, possibilitaram o entendimento dos processos referentes a prensa e o sistema estudado no trabalho.

4.1.1.1 *Brainstorming*

Juntamente com a equipe de manutenção presente no dia em questão e de um integrante da equipe administrativa da empresa, foi realizado um *brainstorming* para que fossem levantadas as características iniciais do problema proposto. Esta técnica de discussão em grupo possibilita adquirir informações relevantes a cerca do tema estudado.

Este processo antecedeu a realização do FMEA pois foi necessário conhecer um pouco mais da máquina e de como ela opera em sua situação normal, bem como a forma

que a falha no sistema ocorreu na ocasião citada na sessão que descreveu o método de detecção da “*Shut Height Failure*”.

As informações coletadas com os integrantes da equipe, deixaram claros alguns aspectos que antes não eram conhecidos sobre a operação e manutenção da *Cupper*. O primeiro deles é que a “*Shut Height Failure*” acontece com uma frequência maior do que se gostaria na linha de produção, o integrante da equipe administrativa relatou que era necessária a investigação e resolução do problema o mais rápido possível para que não houvesse a possibilidade da falha a acontecer e o sistema não detectar, o que ocasionaria em custos mais elevados.

Dito isto, o plano de manutenção foi descrito. O manual operacional da *Cupper* demanda que sejam feitas medidas de folga e conferência de parâmetros operacionais como pressão de óleo, vazamentos e avarias visuais em toda a estrutura em intervalos especificados para cada um deles. As informações obtidas indicaram que a cada 15 dias, a prensa para a sua produção durante duas ou três horas. Neste tempo são realizados procedimentos para a manutenção dos sistemas e conferências de medidas padrão.

Dentre estes procedimentos, é realizado em toda parada uma inspeção visual em todas as partes fixas e móveis, inclusive no sensor da “*Shut Height Failure*”. Se o sensor estiver visivelmente com resíduos de óleo, com algum acúmulo de material ou algum cavaco, o responsável deve prosseguir com a limpeza utilizando produtos para remover o óleo que sempre está presente em todos os sistemas e também qualquer material que possa comprometer o sistema de medição.

O *brainstorming* forneceu uma informação essencial para a realização deste trabalho. Não foi possível confirmar se o sensor de detecção da falha era um fator contribuinte para que o sistema não se comportasse como deveria, pelo fato de que não existia uma experimentação para que se pudesse atestar que o sensor não atendia as expectativas. Esta informação foi crucial pois ia na contra-mão do que foi proposto inicialmente quando o trabalho foi idealizado, que afirmava ser necessária a troca do sensor.

Levantou-se a hipótese de que o sistema de aquisição de dados incorporado ao CLP que controla todos os sistemas da máquina, não estava conseguindo processar as informações, porém, esta hipótese foi descartada pois foi relatado que nunca houve algum problema relacionado ao CLP quando havia a ocorrência da “*Shut Height Failure*”. Por outro lado, o condutor que leva a informação do sensor até o CLP foi apontado como uma possível causa do sistema falhar, pois o sensor está localizado em uma região com muita vibração e sujeiras, bem como está próximo às ferramentas de corte e estampagem do alumínio.

Os integrantes das equipes relataram que em intervalos definidos, se fazia necessária a regulagem do elemento sensor fixado em uma das partes fixas da prensa. Isso se deve

pelo fato de que as vibrações presentes, com o tempo, desalinham e fazem as arruelas de fixação cederem, sendo necessária assim a regulagem da distância que o sensor fica posicionado. Infelizmente não foi possível obter os valores padrão desta regulagem, nem com que frequência ela é feita. De posse de todas as informações adquiridas, pôde-se elaborar o questionário do FMEA.

4.1.1.2 Elaboração do Questionário

O questionário foi desenvolvido na plataforma *GoogleForms*. Segundo [Ferreira \(2018\)](#), este modelo de questionário é de fácil acesso e também capaz de quantificar de forma simples e rápida as informações que são desejadas para a aplicação no método proposto.

Os questionamentos seguiram o viés das informações obtidas durante o *brainstorming* e foram realizados em duas etapas, a primeira durante a primeira etapa da realização do trabalho no mês de novembro de 2019 e a segunda durante a segunda etapa no mês de novembro de 2020. Desta forma, foi possível atribuir os índices O, S e D para as possíveis causas que foram levantadas.

As possíveis causas resultantes da técnica foram:

- Sujeira Presente na Área de Atuação do Sensor.
- Vibração no Condutor que Transporta o Sinal do Sensor para o CLP.
- Regulagem das Distâncias na Instalação do Sensor.
- Incapacidade do Sensor de Realizar a Medição.

Primeiramente o questionado foi informado sobre qual era a pesquisa, a situação, para que serviria e onde os dados seriam empregados. Com estas informações, foi apresentado o problema proposto e qual informação era desejada caso não houvesse conhecimento do problema. Era possível que uma pessoa que não trabalhava diretamente com a manutenção da prensa respondesse o questionário, então, o conteúdo se fez necessário. A partir daí foram dirigidos os questionamentos.

O questionado foi convidado a afirmar se concordava ou não com cada causa do modo de falha proposto. Para uma resposta positiva, foi solicitado para o entrevistado a atribuição de um número de 1 a 10 para os índices de Severidade, Ocorrência e Detecção. Com os índices atribuídos, foi questionado se havia alguma causa a mais que deveria constar na pesquisa e que devesse ser investigada. Caso houvesse alguma causa a mais, os índices foram novamente requisitados.

O questionário completo com todas as informações repassadas e todas as perguntas feitas está contido no apêndice [A](#). Diante dos resultados obtidos nos questionários, foi

possível juntar as informações e preencher o quadro do FMEA com todos os índices e dar prosseguimento para a análise dos NPR's.

4.1.2 Análise de Dados do FMEA

A pesquisa foi enviada para as equipes do setor de manutenção e do setor administrativo da empresa como descrito na sessão anterior, porém, não foi possível obter uma quantidade maior que duas respostas. Uma delas foi obtida na primeira etapa da realização do questionário e a outra na segunda etapa. O FMEA é considerado por [Corte \(2016\)](#) um método indutivo, ou seja, parte dos efeitos observados para então avaliar as causas e propor ações mitigadoras. Neste contexto, mesmo se considerarmos um número reduzido de amostras, as informações obtidas nos questionários podem ser consideradas como válidas. [Sakurada \(2001\)](#) afirma que tais informações só são válidas se fornecidas por profissionais relacionados ao sistema proposto e que mantenham uma sinergia com o grupo responsável pela análise dos dados. Utilizando os resultados do questionário apresentados na sessão 5.1 como base, foi possível dar prosseguimento à pesquisa.

Os resultados mostraram que algumas das primeiras informações contidas no *brainstorming* configuravam potenciais causas para a falha do sistema estudado. No questionário do FMEA, as opções dadas aos questionados obtiveram números de prioridade de riscos (NPR's) relevantes para que se iniciasse a análise e investigação de cada causa. Estava confirmado então, que se faziam necessários experimentos, testes e discussões acerca das quatro causas indicadas.

Para prosseguir com a análise das causas, seria necessário que testes e experimentos fossem realizados na própria prensa em seu regime normal de operação, porém, não havia esta possibilidade. A *Cupper* opera ininterruptamente durante aproximadamente 15 dias, parando por duas ou três horas dependendo do plano de manutenção vigente, ou seja, não havia possibilidade de se fazer qualquer alteração na operação sem que houvessem resultados experimentais confirmados externamente. Aliado a este fato, havia a questão da segurança do trabalho, o ambiente que a prensa está instalada é um ambiente insalubre com relação à ruídos, sujidades, entre outros riscos presentes aos operadores. Sendo assim, decidiu-se que quaisquer testes realizados seriam feitos fora do ambiente da empresa.

O item "Sujeira Presente na Área de Atuação do Sensor" pôde ser analisado com as informações que a equipe de manutenção forneceu, pois o plano de manutenção incluía a limpeza caso houvesse alguma anormalidade. Portanto, a sessão 5.3.5 do texto indicará qual a recomendação para que seja eliminada esta causa.

Em relação aos aspectos construtivos e de montagem do elemento sensor, a "Regulagem das Distâncias", a "Incapacidade do Sensor" e a "Vibração", observou-se que eram necessários experimentos para comprovar se configuram causas do modo de falha ou não.

Foi necessário o desenvolvimento de um método que não obrigaria a parada da prensa para a experimentação do elemento sensor. Foram então desenvolvidos dois experimentos que utilizaram o mesmo sensor especificado pela fabricante com o intuito de testar estes aspectos. A sessão seguinte identificará o método de desenvolvimento e as especificidades de cada um.

Após realizados os experimentos com o sensor, foi possível discutir e recomendar ações para que as causas da falha fossem eliminadas. A sessão 5.3 apresenta estas argumentações.

4.2 Bancadas de Teste do Sensor Indutivo

Com as informações apresentadas na sessão anterior, observou-se que existiam três potenciais causas para o modo de falha proposto relacionadas ao elemento sensor. São elas:

- Vibração no Condutor que Transporta o Sinal do Sensor para o CLP.
- Regulagem das Distâncias na Instalação do Sensor.
- Incapacidade do Sensor de Realizar a Medição.

Inicialmente, existia a intenção de construir uma bancada que emulasse as características da prensa. Porém, logo foi observado que tal feito não era possível. Esta conclusão se deu pelo fato da máquina operar com uma velocidade de $240GPM$ ou mais e se movimentar admitindo uma folga na ordem de décimos de milímetro como mostra a sessão 3.2.2. As características que as bancadas testaram foram as seguintes:

- Frequência de Comutação
- Curva de Acionamento e Desligamento

Estes dados serviram para avaliar as causas do modo de falha apresentadas pelo FMEA, resultando em discussões sobre as características construtivas do sistema e indicando se houve ou não a necessidade de atualização dos componentes e dos procedimentos adotados.

O primeiro passo para a realização dos experimentos foi saber qual o modelo do sensor indutivo utilizado e se era possível adquirir o mesmo para os testes. A partir do esquema elétrico fornecido pela equipe de manutenção, o sensor foi identificado e adquirido. A figura 20 mostra o modelo.

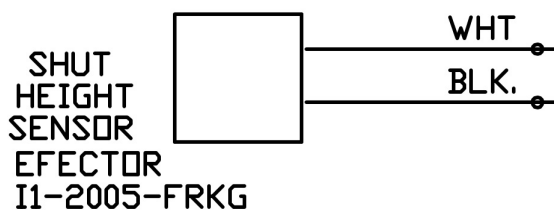


Figura 20 – Especificação do Sensor no Esquema Elétrico da Prensa
Fonte: [Minster \(2019\)](#)



Figura 21 – Sensor Indutivo Ifm IG5593
Fonte: Autor

4.2.1 Bancada de Teste Estático

O funcionamento do sistema de detecção consiste em um sensor montado em frente a uma peça de metal fixada no *outer*. A figura 22 demonstra a montagem e nela é possível identificar que a peça fica permanentemente à frente do sensor dentro da área de detecção. Se o *outer* se mover mais do que deveria, a peça sairá da área de detecção, fazendo o sensor comutar o seu estado, indicando a “*Shut Height Failure*” no painel operacional.

A bancada de ensaio estático foi projetada com o objetivo de simular este funcionamento, aproximando uma peça de metal da mesma forma que acontece na prensa. A figura 23 demonstra como a peça se aproxima do sensor na bancada.

Note que na bancada, a peça não está na área em que o sensor comuta seu estado, portanto, a aproximação provocará a mudança de estado. Como o sensor pode ser regulado para funcionar com o circuito normal aberto ou normal fechado a depender somente da aplicação, é possível admitir que a bancada simula a aproximação e o afastamento do sensor em relação à peça.



Figura 22 – Montagem do Sensor Indutivo na *Cupper*
Fonte: Adaptado de [Minster \(2019\)](#)

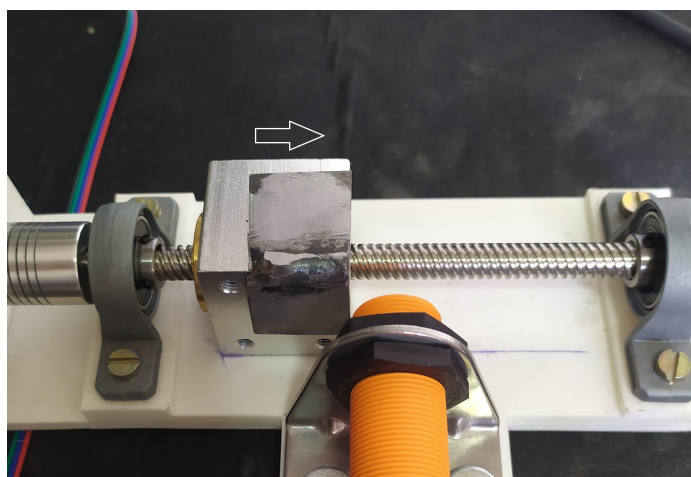


Figura 23 – Método de Aproximação da Peça
Fonte: Autor

Com a bancada sendo capaz de emular os movimentos, foi necessário saber o que seria medido. A bancada tinha a capacidade de se movimentar lateralmente em direção ao sensor e tinha também a capacidade de regular a distância da face do sensor até a peça. Um ponto de referência foi definido, possibilitando a medida do avanço necessário para que o sensor fosse acionado. Para variadas distâncias da face do sensor até a peça, foram medidos os avanços.

Para que fosse possível medir as variáveis desejadas, foram utilizadas como base, as especificações que o manual técnico de aplicação [Ifm \(2020\)](#) disponibiliza para os clientes. Este manual apresenta um gráfico demonstrativo da curva de comutação e desligamento do sensor referente à aproximação lateral para as variadas distâncias da peça alvo como mostra a figura 24.

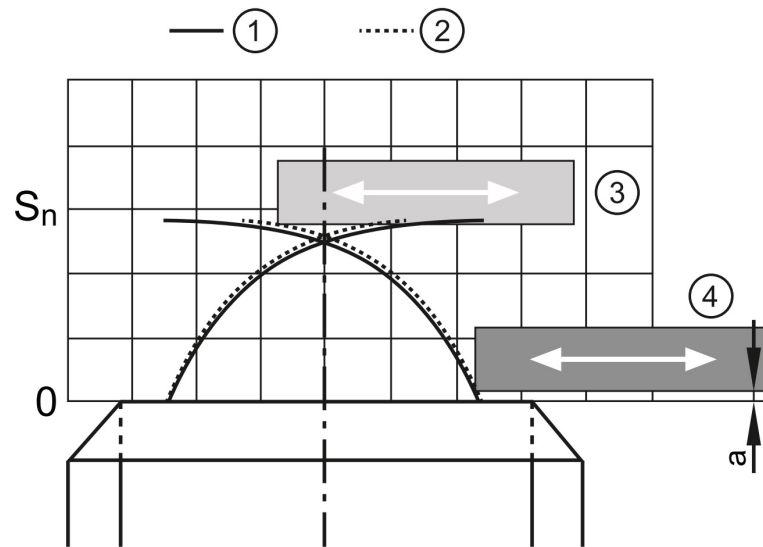


Figura 24 – Gráfico de Comutação e Desligamento
 Fonte: Ifm (2020)

S_n - Alcance de Detecção Nominal

1 - Curva de Comutação Típica

2 - Curva de Desligamento Típica

3 - Má Repetibilidade

4 - Boa repetibilidade

a - Distância Recomendada (10 % de S_n)

O manual apresenta também, uma representação das distâncias de comutação padrão para qual o sensor foi projetado.

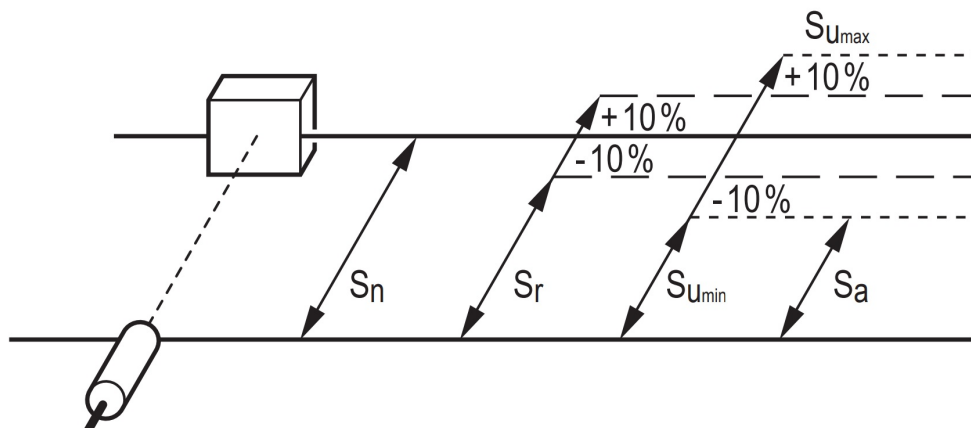


Figura 25 – Distancias de Comutação Padrão
 Fonte: Ifm (2020)

S_n - Alcance de Detecção Nominal (5mm)

S_r - Alcance de Detecção Real (ente 90% e 110% de S_n)

S_u - Alcance de Detecção Útil entre 90% de S_r (S_{Umin}) e 110% de S_r (S_{Umax})

S_a - Distância de Operação entre 0% e 81% de S_n (0mm a 4,05mm)

A partir destas informações, foi possível medir as variáveis desejadas e compará-las com o manual do fabricante.

Para atender aos requisitos, a bancada foi construída à base de um fuso trapezoidal, uma castanha e um acoplador para ser possível a utilização de um motor de passo controlado via Arduíno. O Sistema fuso trapezoidal pode ser visto na figura 26.

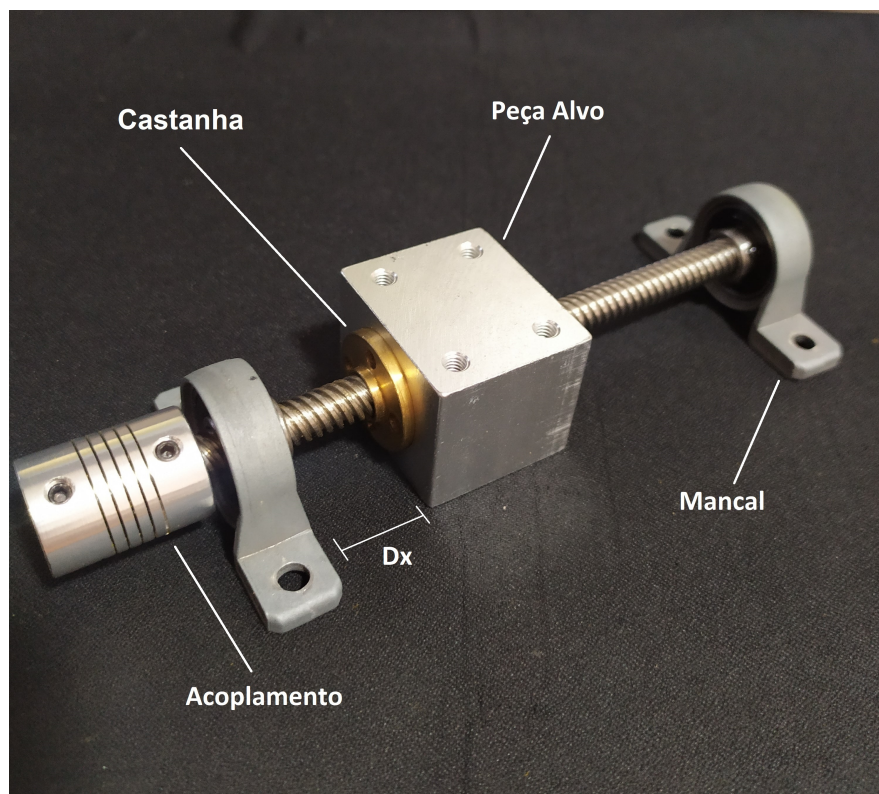


Figura 26 – Sistema Fuso Trapezoidal
Fonte: Autor

O funcionamento da bancada consiste em variar a distancia D_x (avanço) da peça de alumínio, este movimento é proporcional aos passos do motor. O motor de passo é controlado por um *Arduíno Uno* e um *driver* de controle para motores de passo A4988. O diagrama elétrico de acionamento e controle do motor está exposto no apêndice B juntamente com o código na linguagem *C++* que foi desenvolvido. A figura 27 mostra o projeto montado em uma placa *protoboard*.

O motor de passo utilizado na bancada, de acordo com [Motionking \(2020\)](#), tem a resolução de $1.8^\circ \pm 0.09^\circ$. Isso quer dizer que a cada pulso enviado pelo arduíno, o

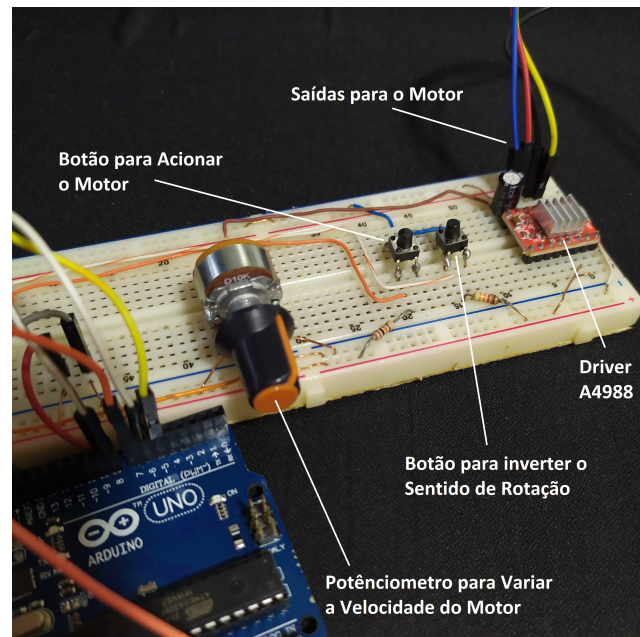


Figura 27 – Sistema de Controle do Motor
Fonte: Autor

eixo variará sua posição angular com valores entre 1.71° e 1.89° . Na especificação do fuso trapezoidal, a cada 360° de giro do eixo, o avanço é de $8mm$. A fórmula 4.2 demonstra o cálculo realizado para se medir a quantidade em milímetros de avanço para um único passo do motor.

$$D_{xmin} = \frac{D_x(360^\circ)}{200} \quad (4.2)$$

D_{xmin} - Avanço mínimo.

$D_x(360^\circ)$ - Avanço para 360° de variação da posição angular.

200 - Quantidade de passos necessários para o eixo dar uma volta completa.

Calculando temos,

$$0,04mm \simeq \frac{8mm}{200} \quad (4.3)$$

Com esse valor aproximado, é possível afirmar que a menor distância que pode ser comandada no processo de movimentação da peça é de aproximadamente $0,04mm$. Isto é importante pois considerando a folga máxima da máquina ($0,89mm$) observou-se que a bancada tem a capacidade de comandar movimentos em distâncias consideravelmente menores.

O suporte para a montagem dos componentes foi projetado e impresso em uma impressora 3D, facilitando a construção e reduzindo os custos. As dimensões do suporte e o processo de impressão podem ser vistos no apêndice C.

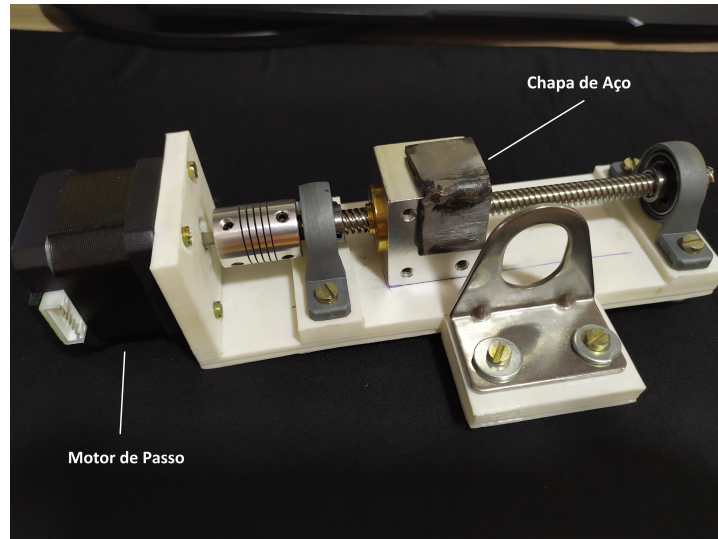


Figura 28 – Bancada Montada
Fonte: Autor

A figura 28 mostra o sistema montado. Note que foi necessária a adaptação de uma cantoneira de aço para ser acoplada na face que será medida pelo sensor. Isso foi necessário pois o manual Ifm (2020) especifica que para diferentes tipos de metal, as distâncias de comutação são alteradas. Na figura 29 é possível ver as informações fornecidas.

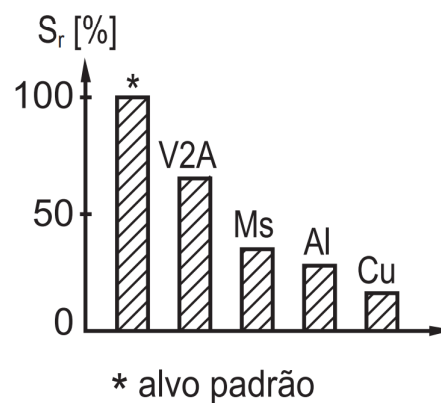


Figura 29 – Fatores de Correção para Diferentes Tipos de Metal
Fonte: Ifm (2020)

O gráfico demonstra que para o metal padrão (aço *S235JR*), a distância de comutação é 100% do valor de S_r . Para o aço inoxidável (V2A) o valor é de 70%. Para o latão, o valor é de 40%. Para o alumínio, o valor é de 30%. Por fim, para o cobre, o valor é de 20%. O valor nominal S_n do sensor, como visto anteriormente, é igual a 5mm , então, se fosse utilizado o alumínio, as distâncias que deveriam ser medidas seriam tão pequenas que não seria possível medir com uma precisão satisfatória. Foi utilizado então,

um aço de baixo custo com especificações dentro da norma [NBR6591 \(2008\)](#). Observando a composição química especificada na norma, o aço utilizado no ensaio é semelhante ao que foi utilizado na peça padrão.

A bancada foi montada para que fosse possível medir a posição inicial da peça alvo (D_{xi}) e sua posição final (D_{xf}). O ponto inicial escolhido foi o início da face do sensor. De acordo com o Manual [Ifm \(2019\)](#), o sensor tem um diâmetro de $18mm$, e esta posição foi escolhida para que o deslocamento possa ser calculado com esta referência. Se a peça se movimentar $1mm$, quer dizer que ela passou $1mm$ da borda da face do sensor. A figura [30](#) mostra a bancada com o sensor e a posição inicial.

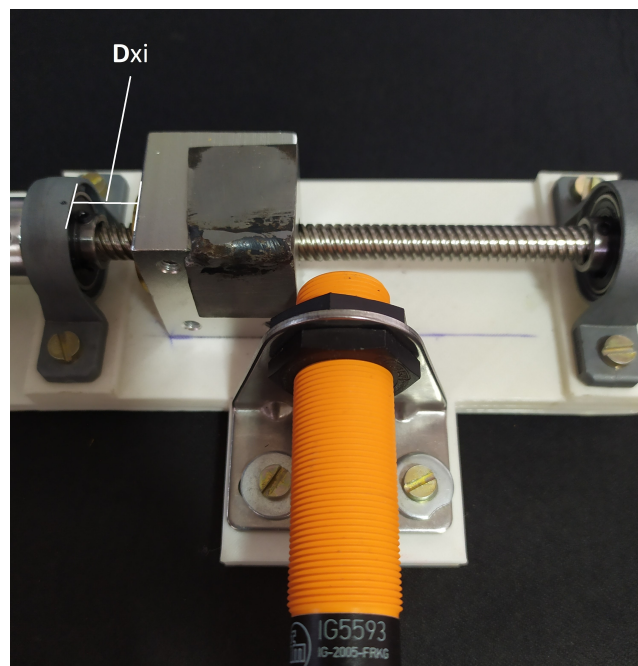


Figura 30 – Posição Inicial da Peça Alvo
Fonte: Autor

4.2.2 Procedimento de Medição para Bancada de Teste Estático

As medições executadas, seguiram o padrão de medições diretas [Lira \(2015\)](#), ou seja, um instrumento com as características conhecidas foi utilizado para medir o deslocamento em milímetros da peça alvo. O objetivo do ensaio consistia em medir estes dois valores:

- D_x - O valor que corresponde à distância em milímetros que a peça se moveu lateralmente a partir do ponto inicial (avanço).
- D_y - O valor que corresponde à distância em milímetros da face do sensor até a peça alvo.

Para cada valor de D_y existe um valor de D_x correspondente, formando assim, o gráfico que será apresentado na seção 5.2.1 deste documento.

4.2.2.1 Deslocamento Lateral D_x

Para se obter o valor de D_x , foi necessário medir duas variáveis, D_{xi} e D_{xf} . A figura 31 traz um esquemático que demonstra a diferença entre estas variáveis.

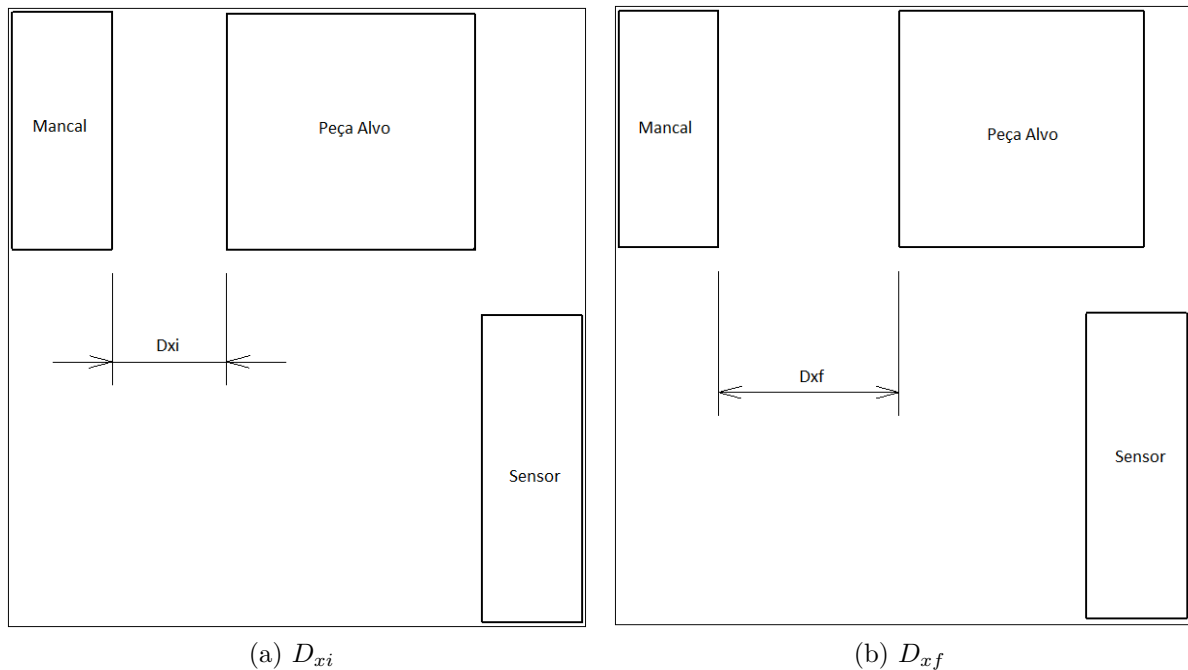


Figura 31 – Representação Esquemática das Variáveis

Fonte: Autor

O procedimento de medição das variáveis descritas se iniciou com a definição do ponto inicial. Para que o sistema sempre partisse deste ponto, o *software* comandava a mesma quantidade de passos no motor, ou seja, no dia do experimento, foi necessário comandar 106 passos em um sentido em relação ao mancal para que a peça estivesse no ponto 0 (D_{xi}). A cada rodada de experimentos, o valor inicial foi medido para compor o valor de D_x .

Com o ponto inicial definido, foi necessário saber quantos passos no motor a partir do ponto inicial eram suficientes para o acionamento do sensor. Quando o sensor era acionado pela peça que passava a frente dele, anotava-se o número de passos necessários e a distância D_{xf} . Feito isto, o motor dava os passos correspondentes no sentido oposto, fazendo a peça voltar ao ponto 0. Este processo foi repetido dez vezes para cada ponto do gráfico.

Os valores das variáveis D_{xi} e D_{xf} possibilitaram calcular a distância D_x através

da equação 4.4.

$$D_x = D_{xf} - D_{xi} \quad (4.4)$$

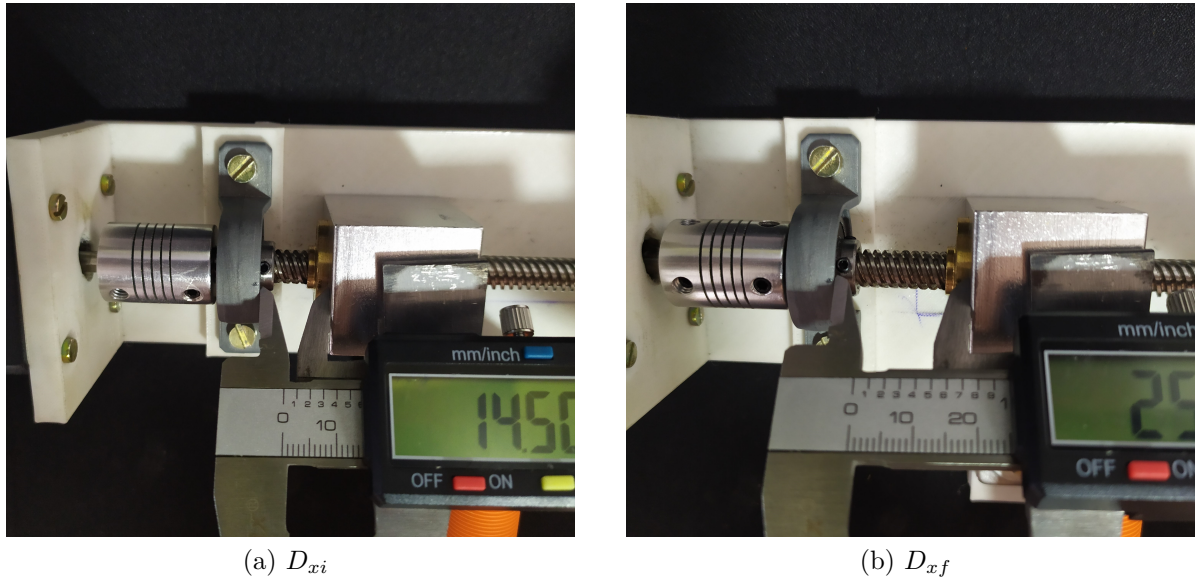


Figura 32 – Medição das variáveis Componentes de D_x

Fonte: Autor

4.2.2.2 Distância do sensor até a peça alvo D_y

Para se obter o valor de D_y , também foram necessárias duas medidas: D_{yi} e D_{yf} . A figura 33 apresenta um esquemático das variáveis descritas.

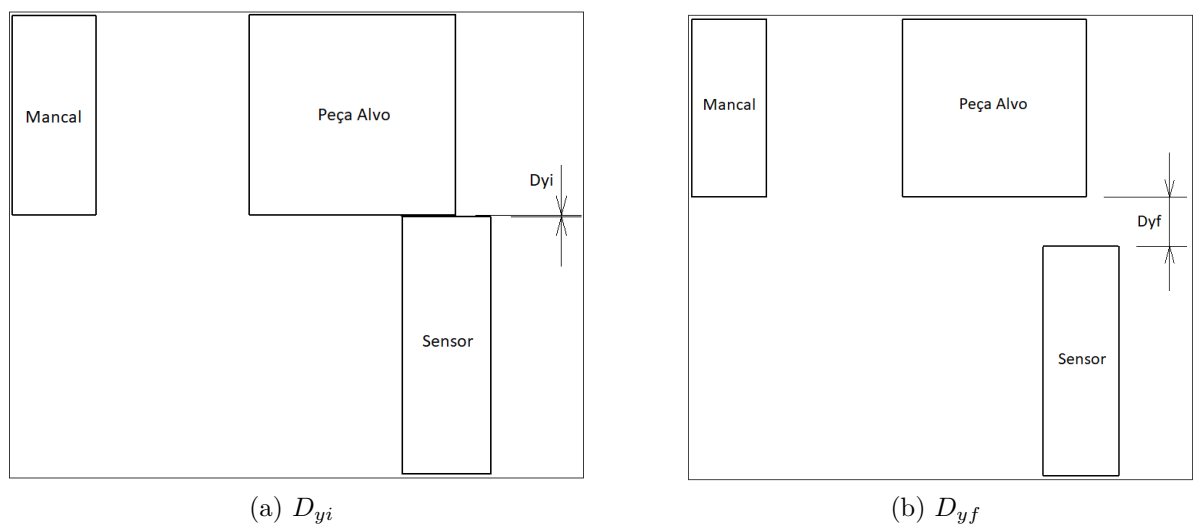


Figura 33 – Representação Esquemática das Variáveis

Fonte: Autor

O primeiro passo para a tomada de medidas no experimento, se deu na regulagem do sensor no suporte de metal da bancada. Para posicionar o sensor, é possível ver na

figura 34a que o ponto inicial sempre era rente à peça alvo, ou seja, com a face do sensor encostando na face da peça.

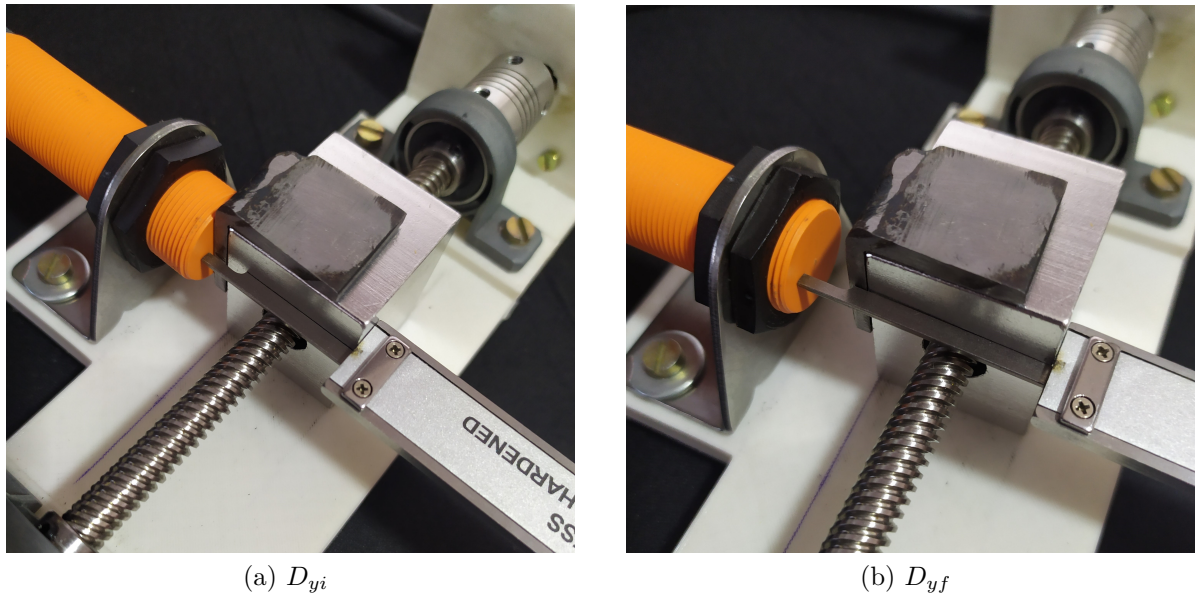


Figura 34 – Medição das variáveis Componentes de D_y
Fonte: Autor

Diferente das medidas de D_x , a medida da posição inicial D_{yi} foi feita somente uma vez no início de cada rodada de testes. A regulação da distância desejada para o teste foi feita manualmente e era muito sensível a qualquer variação da rosca de fixação e da posição do sensor. Então, a posição do sensor foi regulada uma vez antes de cada rodada e as medidas foram tomadas dez vezes de forma que o operador não tocasse a bancada, a fim de não alterar sua posição, otimizando assim os resultados.

Com o valor de D_{yf} medido dez vezes e o valor de D_{yi} medido no início da rodada, foi possível calcular D_y através da equação 4.5.

$$D_y = D_{yf} - D_{yi} \quad (4.5)$$

O método utilizado para calcular as incertezas das medições, considerou as incertezas de cada componente das equações para assim, resultar na incerteza de medição expandida das variáveis D_y e D_x .

Este experimento permitiu observar o comportamento do sensor em relação à curva de acionamento e desligamento fornecida pelo fabricante. Dependendo da distância que a face do sensor está posicionada em relação à peça alvo (D_y), a quantidade de movimento necessária para a detecção muda consideravelmente. Corroborando com a demonstração gráfica no manual de aplicação técnica do fabricante do sensor.

De posse dos valores para indicar o comportamento do sensor em relação à curva de acionamento, foi necessário projetar um experimento que testasse o sensor em relação à frequência de comutação. Este experimento está exposto na sessão seguinte.

4.2.3 Bancada de Teste Dinâmico

Considerando as informações contidas na sessão 4.2.1, observa-se que o sistema opera com a placa de metal posicionada a frente do sensor enquanto a máquina está em movimento, ou seja, não é desejado que se tenha uma comutação do seu estado durante a operação, se isso acontecer, configura-se a “*Shut Height Failure*”. Porém, foi necessário realizar o experimento em relação à frequência de comutação pelo fato de que a máquina se movimenta com uma velocidade de 240GPM em seu regime nominal [Minster \(2019\)](#), além de ser possível operar com velocidades superiores dependendo da necessidade de copos na linha de produção.

Partindo do fato que a peça móvel tem esta velocidade, o sensor deve ser capaz de detectar rápido o suficiente caso ela saia da área de acionamento. Se a frequência de comutação do sensor for insuficiente, o ciclo de movimentação da máquina em situação de falha fará com que a peça de metal saia e entre na zona de detecção com uma velocidade superior à que o sensor é capaz de detectar.

Este experimento tem o objetivo de comprovar se a frequência de comutação é suficiente para o sistema e comparar estes dados com o fornecido pelo fabricante.

Para que fosse possível medir frequência de comutação do sensor, foram utilizadas como base, as especificações do manual técnico de aplicação [Ifm \(2019\)](#). Este manual disponibiliza a medição padrão para a frequência de comutação do sensor. A figura 35 mostra as especificações.

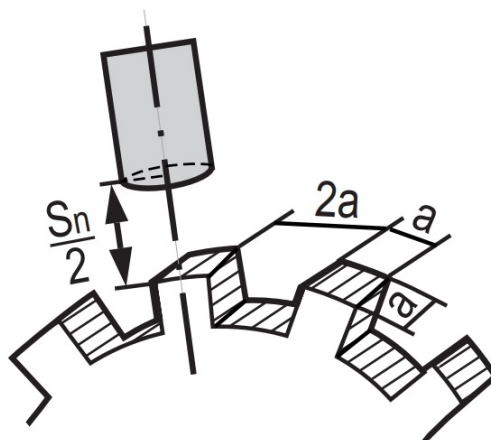


Figura 35 – Teste Padrão da frequência de Comutação
Fonte: [Ifm \(2019\)](#)

S_n - Alcance de Detecção Nominal

A partir desta informação, foi possível projetar uma bancada que utilizasse um método parecido com o padrão para medir se a frequência de comutação é suficiente para o regime de trabalho.

A solução encontrada foi montar uma bancada de testes utilizando um motor hidráulico com eixo chavetado e o sensor posicionado para fazer a medição de forma semelhante à padrão. A figura 36 mostra a bancada montada.

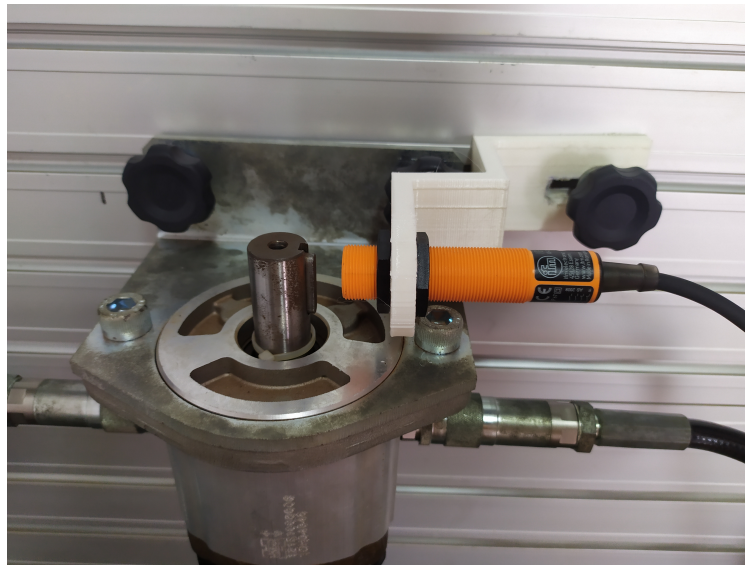


Figura 36 – Bancada de Teste Dinâmico
Fonte: Autor

O funcionamento do sistema consiste em comandar o motor para uma rotação específica começando por 240RPM e medir a quantidade de pulsos que o sensor envia para o CLP utilizado no experimento. Note que como o eixo tem somente uma chaveta, a quantidade de pulsos será equivalente ao RPM comandado no motor. Cada pulso equivalerá a 360° de giro do eixo.

O CLP utilizado foi o S7-1200 da Siemens e o motor faz parte de uma bancada didática fornecida pela FESTO que conta com uma geradora de pressão hidráulica, mangueiras, válvulas, reguladores de pressão, entre outros equipamentos que estão disponíveis para os alunos da disciplina de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (SHP) que compõe os cursos de engenharia da Faculdade do Gama. O apêndice D mostra os componentes e o circuito eletro-hidráulico montado.

A bancada tem capacidade para gerar 60Bar de pressão na linha com óleo e a velocidade máxima constatada para a pressão máxima de trabalho do motor é de aproximadamente 722 RPM.

Com esta bancada montada, foi possível testar a velocidade nominal de operação da prensa e ainda variar a velocidade para valores acima do especificado e confirmar se o sensor é capaz de variar o seu estado mesmo nestas condições.

O suporte para a montagem do sensor foi projetado e impresso em uma impressora 3D, facilitando a construção e reduzindo os custos. As dimensões podem ser vistas no apêndice E. A bancada didática da FESTO conta com suportes verticais para montagem dos seus componentes, o suporte do sensor foi projetado para se adequar a esta especificação para que não fosse necessária nenhuma adaptação. A bancada foi montada de modo que não permitisse a movimentação do sensor fazendo-o estar posicionado a $(S_n/2)$ mm da face superior da chaveta.

4.2.4 Procedimento de Medição para Bancada de Teste Dinâmico

As medições realizadas no ensaio foram feitas a partir do CLP da Siemens especificado anteriormente. Este controlador lógico conta com entradas digitais que admitem uma tensão de 24V.

O valor desejado é o número de pulsos que o sensor informou ao CLP em 60 segundos. Este dado foi extraído a partir da entrada digital I0.0. Esta entrada digital neste modelo de CPU tem um modo de aquisição de dados denominado "*high speed counter*" ou (HSC). Com este modo de operação, a frequência de varredura na entrada é da ordem de 0,40ms. Ou seja, a CPU tem capacidade de detectar até 2500 pulsos por segundo ou 150mil pulsos por minuto [Siemens \(2016\)](#). Considerando que a bancada detecta um pulso para cada 360° de giro do eixo, pode-se afirmar que a entrada tem capacidade para medir uma velocidade de 150mil RPM. De acordo com [Ifm \(2019\)](#), o sensor tem uma frequência de comutação máxima de 700Hz, isto significa que a velocidade do instrumento de medição foi limitado apenas pelo sensor e não pelo método de aquisição dos dados que inclui a entrada digital e o próprio CLP. A figura 37 demonstra o fluxograma para medição dos dados.

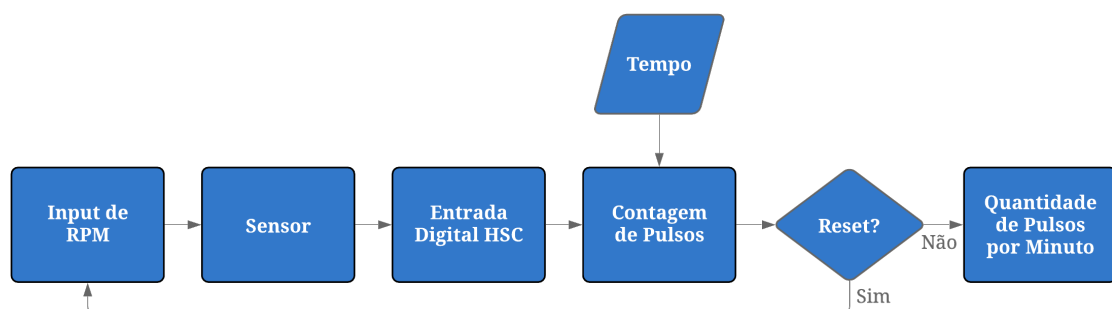


Figura 37 – Fluxograma para Medição da Quantidade de Pulsos
Fonte: Autor

A quantidade de pulsos e o *input* de RPM foram anotados repetidas vezes para que se pudesse calcular a incerteza associada a estas medições. Os *inputs* de RPM começaram em 240RPM e foram aumentando gradativamente até o valor máximo de rotação do eixo.

Para comandar a velocidade do eixo do motor hidráulico, foi utilizado o regulador de pressão da geradora de pressão e um tacômetro digital Minipa. Antes de cada medição, a velocidade do eixo do motor foi verificada para garantir que o *input* de RPM não se alterasse, garantindo que a única variável que poderia sofrer alteração, fosse os pulsos detectados pelo sensor.

A programação no Software TIA PORTAL V12 está exposta no apêndice F.

Os procedimentos de construção e de aquisição de dados do experimento visaram comprovar se o sensor detectava o metal da chaveta todas as vezes que entrada no alcance de detecção, ou seja, se não houve nenhuma perda de pulsos. Caso algum pulso fosse perdido, estaria comprovado que o sensor não atende aos requisitos do sistema. Porém, os resultados indicaram que não houve perda de pulsos e o sensor cumpriu o seu papel para todas as velocidades comandadas no eixo do motor.

De posse de todos os dados quantitativos dos experimentos, se fez necessário o cálculo das incertezas de medição associadas. A metodologia para estes cálculos será apresentada na sessão seguinte.

4.3 Cálculo das Incertezas de Medição

De acordo com Cabral (2004), o balanço de incertezas deve ser calculado para quaisquer experimentos que serão utilizados em uma pesquisa científica. No estudo de caso em questão, o cálculo é essencial para garantir a confiança dos valores medidos e também garantir que o processo de medição tem uma incerteza menor que a folga máxima permitida para o sistema de detecção da “*Shut Height Failure*”. Na seção 3.2.2 deste documento, o procedimento para obtenção do valor da folga máxima foi apresentado.

Nesta seção, os instrumentos de medição, os sistemas de medição, as variáveis alvo e os cálculos referentes para cada uma delas serão especificados. Desta forma, será possível encontrar as incertezas das medidas realizadas durante o trabalho de forma confiável.

4.3.1 Instrumentos de Medição

Nos dois ensaios propostos, foi necessária a utilização de instrumentos para que fossem feitas medidas de variáveis. No caso da bancada de ensaio estático do sensor, utilizou-se o Paquímetro Digital MTX para realizar medições diretas com o intuito de extrair os valores alvo do experimento proposto. No caso do ensaio dinâmico, um Tacômetro Digital Minipa foi utilizado para regular a quantidade de rotações por minuto requeridas

no ensaio. Os instrumentos possibilitaram a extração de valores confiáveis e se tornaram essenciais para a realização do trabalho.

4.3.1.1 Paquímetro Digital MTX

O Paquímetro é um instrumento que tem uma escala linear e possibilita que o operador realize quatro tipos de medições, como mostrado na figura 38.

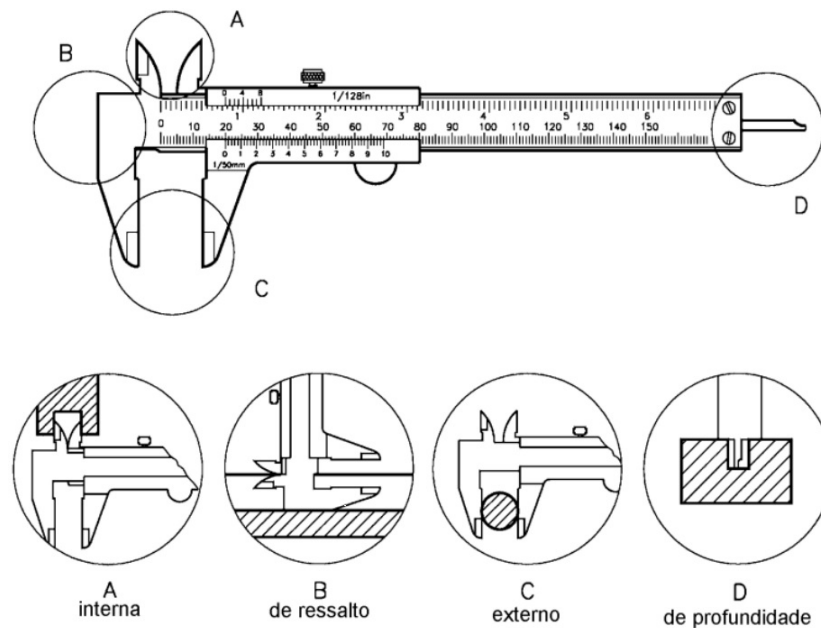


Figura 38 – Tipos de Medições do Paquímetro
Fonte: Serpa (2004)

Se tratando dos paquímetros digitais de acordo com Cabral (2004), as principais diferenças são a facilidade na leitura do valor indicado, a ausência do erro de paralaxe e a resolução do instrumento, este último pode ou não ser aplicado em relação a um paquímetro analógico convencional.

Nos processos de medição que foram propostos, o paquímetro foi utilizado para medir grandezas lineares em *mm* com as "orelhas", ou seja, medições internas e medições de profundidade. A figura 32 mostra a medida do tipo interna e a figura 34 mostra a medida do tipo profundidade sendo utilizada. No caso do experimento estático, o ideal para se medir o valor de D_y , seria utilizar a medição de ressalto, porém, o paquímetro não coube na bancada e não foi possível fazer a medição com este método. Então foram tomadas as devidas precauções para se utilizar o método de profundidade e mesmo assim não comprometer o processo de medição.

A fabricante do Paquímetro fornece uma tabela em seu manual MTX (2020) especificando as características relevantes para a utilização do mesmo. Para o procedimento de medição que foi adotado no trabalho, algumas destas informações são importantes para fazerem parte do balanço de incertezas. O quadro 9 apresenta estas características.

Característica	Valores Especificados
Escala de Medida:	0-150mm / 0-6 polegada
Resolução:	0,01mm / 0,0005 polegada
Margem de Erro:	0,02mm / 0,001 polegada (<100mm) 0,03mm / 0,001 polegada (>100-200mm)
Repetibilidade das Medições:	0,01mm / 0,0005 polegada
Temperatura de Operação:	Não há Impacto com Umidade Relativa <80%

Quadro 9 – Incertezas de Medição do Paquímetro Digital MTX
Fonte: Adaptado de [MTX \(2020\)](#)

As variáveis e os valores que farão parte do balanço de incertezas serão:

- Resolução do instrumento - 0,01mm
- Margem de Erro - 0,02mm
- Repetibilidade das Medições - 0,01mm

De acordo com [MTX \(2020\)](#), não há impactos em relação à temperatura com a umidade relativa do ar inferior a 80%.



Figura 39 – Paquímetro Digital MTX
Fonte: Autor

4.3.1.2 Tacômetro Digital Minipa

De acordo com [Minipa \(2015\)](#), o tacômetro é um equipamento utilizado para medir rotações por minuto. No experimento dinâmico do sensor, ele foi utilizado para verificar o *input* de rotação que foi utilizado no experimento.

Característica	Valores Especificados
Faixas de medição:	2,5 a 99999 RPM (foto) 0,5 a 19999 RPM (contato) 0,05 a 1999,9 m/min (superfície)
Resolução:	0,1 RPM (2,5 a 999,9 RPM - foto) 1 RPM (acima de 1000 RPM - foto) 0,1 RPM (0,5 a 999,9 RPM - contato) 1 RPM (acima de 1000 RPM - contato) 0,01 m/min (0,05 a 99,99m/min) 0,1 m/min (acima de 100 m/min)
Precisão:	0,05% Leit. + 1Díg.

Quadro 10 – Incertezas de medição do Tacômetro Digital Minipa
Fonte: Adaptado de [Minipa \(2015\)](#)

Da mesma forma que o Paquímetro Digital, o tacômetro digital tem algumas vantagens e foi essencial para a realização do trabalho. O fabricante disponibiliza as informações de calibração do equipamento e estas podem ser vistas no quadro 10.

As variáveis e os valores que farão parte do balanço de incertezas dentro da faixa de medição de 0,5 até 19999 RPM (contato) serão:

- Resolução do instrumento - 0,1RPM
- Precisão - 0,05%Leit. + 1Dig.

Não são listadas influências em relação a variação da temperatura no manual do fabricante.



Figura 40 – Tacômetro Digital Minipa
Fonte: Autor

4.3.2 Procedimento para Cálculo das Incertezas de Medição

Para que se obtenha um resultado satisfatório em uma medição, é necessário se atentar a vários aspectos que compõem o sistema. O autor Cabral (2004) nos fluxogramas representados nas figuras 41 e 42, demonstra um método que pode ser aplicado em diversos sistemas de medição e dá um norte para a realização e a escolha dos fatores que se aplicam aos experimentos propostos.

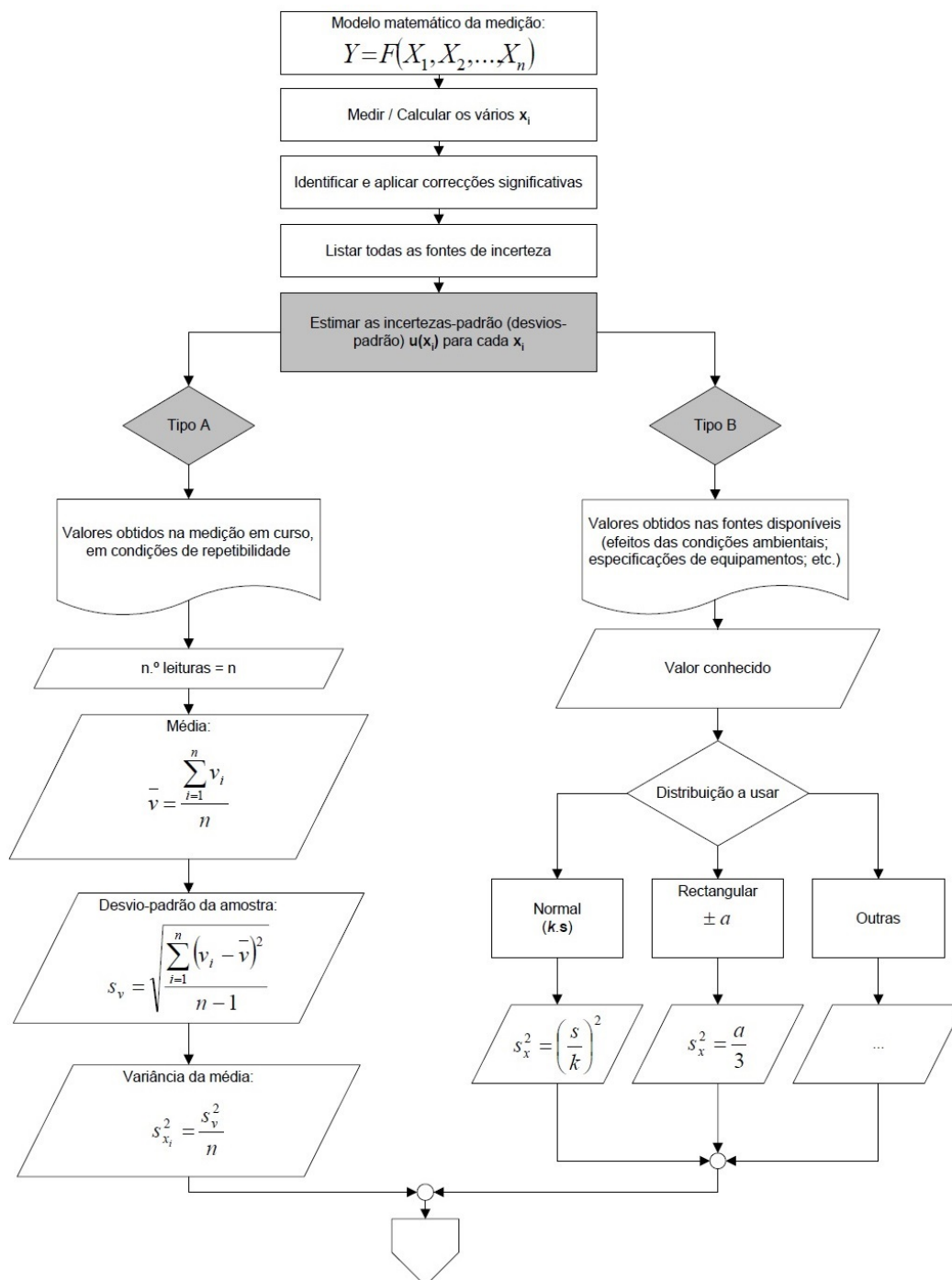


Figura 41 – Fluxograma 1 para Cálculo de Incertezas de Medição
Fonte: Cabral (2004)

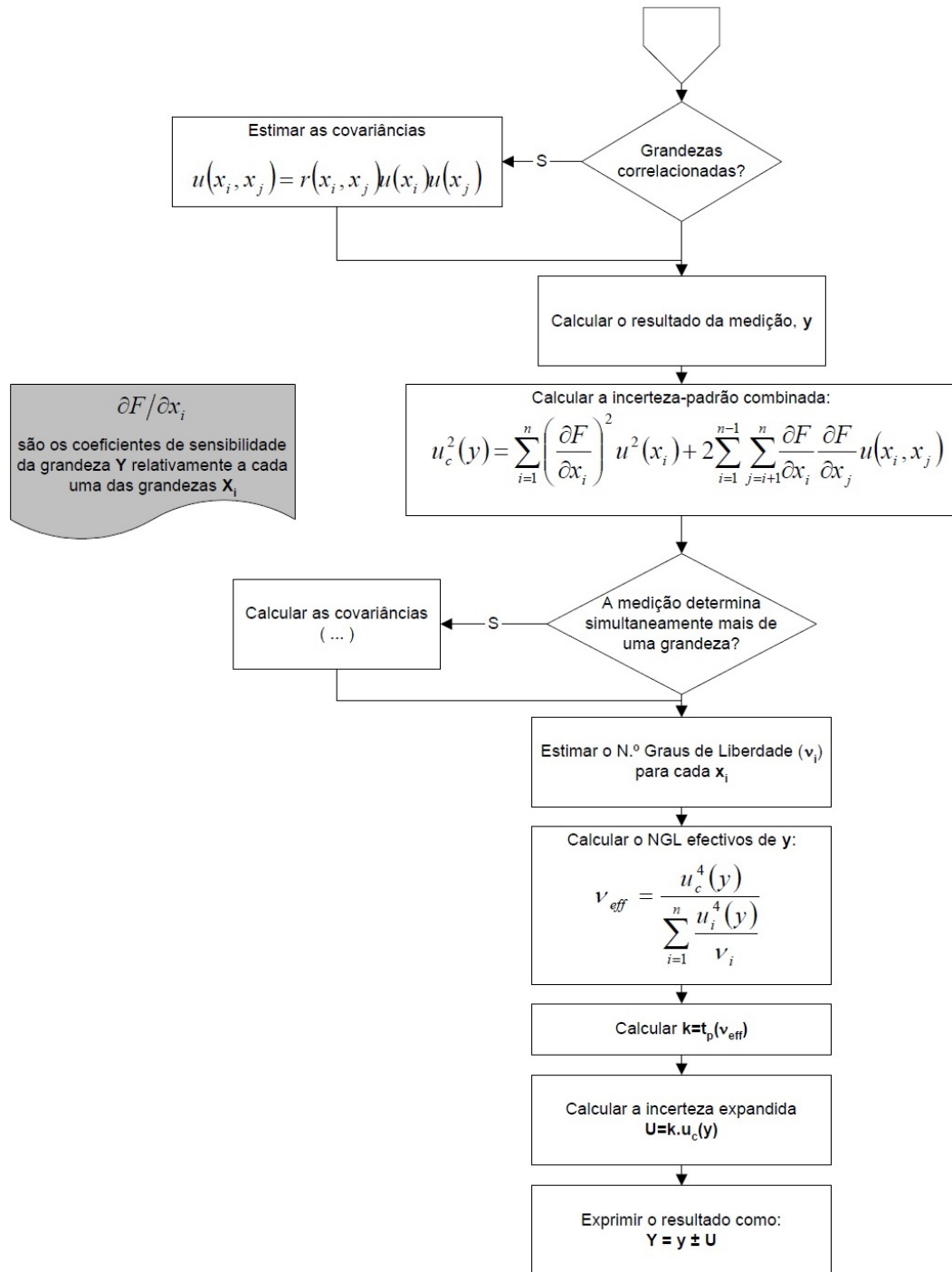


Figura 42 – Fluxograma 2 para Cálculo de incertezas de medição
 Fonte: Cabral (2004)

O método segundo Cabral (2004) é amplo e pode ser utilizado em vários sistemas de medições, dependendo apenas da aplicação que se deseja. Do fluxograma mostrado, somente serão abordados os passos que foram necessários para os sistemas de medição utilizados do trabalho.

A primeira etapa para se iniciar o processo de medição, é saber o que medir, qual é a variável, quais são as variáveis, e assim saber qual é o modelo matemático da medida.

No caso em específico do experimento estático do sensor, o objetivo era medir valores de D_x e D_y , que são compostos por outros dois valores (D_{xi} , D_{xf}) e (D_{yi} e D_{yf}). Para cada variável, temos as equações 4.4 e 4.5. O experimento dinâmico do sensor, teve o objetivo de medir a quantidade de pulsos que o sensor computou em um minuto.

Com o modelo matemático definido, as medidas foram realizadas e anotadas em uma tabela para que fossem calculadas mais tarde. O procedimento de tomada das medidas de cada experimento foi especificado nas seções 4.2.2 e 4.2.4.

Um dos passos mais importantes para o calculo das incertezas, é saber quais incertezas fazem parte do sistema. São vários tipos e elas abrangem as incertezas provenientes do instrumento de medição e das próprias medições realizadas com o instrumento. O autor as classifica como do tipo A e do tipo B.

Segundo a norma ABNT e SBM (2003), a avaliação do tipo A da incerteza se refere a avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações.

Já a avaliação do tipo B da incerteza se refere a avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatísticas de séries de observações.

Sabendo quais incertezas compõem o sistema, os valores das médias e desvios padrões foram calculados para cada uma. As equações correspondentes são diferentes para incertezas do Tipo A ou do Tipo B.

No caso das medidas repetidas dos dois experimentos, os valores da média e desvio padrão foram calculados através das equações 4.6 e 4.7:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (4.6)$$

Em que,

- \bar{v} = Média Amostral
- n = Número de Repetições
- v_i = Valores Medidos

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n - 1}} \quad (4.7)$$

Em que,

- S_v = Desvio Padrão Amostral

- n = Número de Repetições
- v_i = Valores Medidos
- \bar{v} = Média Amostral

Para o caso da resolução, repetitividade e o erro aleatório, o desvio padrão amostral é retirado diretamente do quadro de características do fabricante do instrumento.

O próximo passo foi saber qual a característica de distribuição de cada uma das incertezas. De acordo com Cabral (2004), as incertezas classificadas como tipo A tem uma natureza estatística, ou seja, todas as medições realizadas estão dentro de um intervalo de confiança onde estão contidos os erros aleatórios da medida. Erros menores são mais prováveis e erros maiores são menos prováveis. Estes fatos correspondem à uma distribuição normal de probabilidades.

Já as incertezas do tipo B são analisadas uma por uma dependendo do tipo e de qual processo de medição está sendo utilizado.

Como citado, para as incertezas do tipo A, assume-se uma distribuição normal de probabilidades. As medidas repetidas que foram feitas nos experimentos seguiram esta definição. Para as incertezas do tipo B, cada uma tem sua distribuição e equação específica para calcular.

A norma ABNT e SBM (2003) especifica que algumas incertezas são dadas, simplesmente, como limites máximos dentro dos quais todos os valores da grandeza estarão contidos. É uma prática comum supor que todos os valores dentro desses limites são igualmente prováveis. Isto configura uma distribuição retangular das incertezas. Considerando esta afirmação, a resolução dos instrumentos e o erro aleatório fornecidos pelos manuais dos instrumentos de medição não especificam qual é a distribuição das incertezas. Como são dados somente valores máximos e mínimos, Cabral (2004) recomenda que se assumam valores igualmente distribuídos dentro destes limites, configurando assim, uma distribuição retangular das incertezas.

Para a repetitividade do paquímetro, a norma ABNT e SBM (2003) especifica que considerando a resolução do dispositivo indicador, o valor do estímulo que produz uma dada indicação pode estar situado com igual probabilidade em qualquer lugar no intervalo. O estímulo é, então, descrito por uma distribuição de probabilidade retangular.

Sabendo-se qual tipo de distribuição de cada um, pode-se então calcular as incertezas padrão u_{xi} . Novamente, cada variável terá sua equação específica. Para a incerteza padrão das medidas repetidas do tipo A, foi utilizada a equação 4.8. Para a resolução dos instrumentos de tipo B, a equação 4.9. Para o erro aleatório e a repetitividade cedidas

pela fabricante do tipo B, a equação 4.10.

$$u_x = \frac{S_v}{\sqrt{n}} \quad (4.8)$$

Em que,

- u_x = Incerteza Padrão
- S_v = Desvio Padrão Amostral
- n = Número de Repetições

$$u_x = \frac{S_v}{2\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

Em que,

- u_x = Incerteza Padrão
- S_v = Desvio Padrão Amostral

$$u_x = \frac{S_v}{\sqrt{3}} \quad (4.10)$$

Em que,

- u_x = Incerteza Padrão
- S_v = Desvio Padrão Amostral

O próximo passo foi analisar se as grandezas eram correlacionadas, ou seja, se a variação de uma grandeza interfere em outra. O processo de medição que foi implementado, não mediu grandezas correlacionadas, então, esta parte do cálculo foi desprezada.

Para que todas as incertezas separadas sejam computadas no resultado da medição final, o autor mostra que é necessário ser calculado os coeficientes de sensibilidade de todas as grandezas envolvidas. Estes coeficientes são como transformadores de variáveis, eles padronizam as unidades de medida e atribuem pesos para as variáveis que tem mais impacto no resultado da medição final. Todas as variáveis medidas, eram do mesmo tipo. Para variáveis de mesmo tipo, não há necessidade de considerar os coeficientes no sistema de medição.

Para dar prosseguimento, foi necessário o calculo da incerteza padrão combinada. é o valor que considera todos os coeficientes de sensibilidade $\left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)$ e combinam todas as

incertezas presentes no sistema de medição. O cálculo foi feito seguindo a lei da propagação de incertezas [Junior e Silveira \(2011\)](#). A lei regulamenta que o cálculo das incertezas combinadas nada mais é que o somatório do quadrado das incertezas padrões se as mesmas não forem correlacionadas, ou seja, se os coeficientes de sensibilidade forem iguais a 1. A equação [4.11](#) foi utilizada para o calculo nos experimentos.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (4.11)$$

Em que,

- u_c = Incerteza Padrão Combinada
- u_i = Incerteza Padrão

Após a obtenção do valor da incerteza padrão combinada, o próximo passo foi estimar os graus de liberdade de cada variável separadamente. No caso das incertezas do tipo B, o autor [Cabral \(2004\)](#) cita que pelo fato de não serem especificados os graus de liberdade, para as distribuições retangulares neste caso, assumem-se graus de liberdade infinitos. A equação [4.12](#) foi utilizada para o cálculo do número de graus de liberdade efetivos. Este valor representa todo o sistema de medição, juntando os graus de todas as incertezas.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{V_i}} \quad (4.12)$$

Em que,

- V_{eff} = Graus de liberdade Efetivos
- u_c = Incerteza Padrão Combinada
- u_i = Incertezas Padrão
- V_i = Graus de Liberdade Individuais

Note que para uma incerteza com infinitos graus de liberdade, sua contribuição para a equação [4.12](#) será nula. Restando assim somente as estimativas com graus de liberdade diferentes de infinito, como é o caso das medições repetidas que tem distribuição normal e $n - 1$ graus de liberdade.

De posse do V_{eff} , [Cabral \(2004\)](#) indica que se deve consultar a tabela de distribuição *tstudent*. A fim de se encontrar o valor correspondente para 95% de confiança no nesta distribuição.

Através da equação 4.13, foi calculada a incerteza expandida.

$$U = K_{t(V_{eff})} \times u_c \quad (4.13)$$

Em que,

- U = Incerteza Expandida
- $K_{t(V_{eff})}$ = Coeficiente t student para V_{eff}
- u_c = Incerteza Padrão Combinada

Por fim, é possível calcular o resultado da medição, considerando todas as incertezas envolvidas e as especificidades mencionadas nesta sessão do texto. A equação 4.14 demonstra o resultado.

$$Y = y \pm U \quad (4.14)$$

Em que,

- Y = Resultado da Medição
- y = Resultado da medição (Média Amostral)
- U = Incerteza Expandida

O apêndice G traz a planilha com todos os cálculos referentes as incertezas de medição.

De posse de todos os resultados experimentais das duas bancadas e dos cálculos de todas as incertezas relacionadas às medições realizadas, o próximo capítulo apresentará os resultados e as discussões relacionadas às causas do modo de falha apontadas pelo FMEA.

5 Resultados e Discussões

Esta sessão abordará os resultados dos estudos e experimentos realizados. Primeiramente, as especificidades do FMEA serão caracterizadas e será apresentado o quadro que foi alimentado com os dados individuais formando um panorama geral do processo. Com os resultados do FMEA em mãos, pode-se investigar todas as possíveis causas dos modos de falha. Com o conhecimento das causas, serão apresentados os resultados experimentais e os eventuais procedimentos adotados para que seja possível indicar o que deve ser feito para que as causas da falha sejam eliminadas.

Esta pesquisa utilizou os dados coletados juntamente com a equipe de manutenção, operação e administração da empresa. A sessão 3.2.1 do texto demonstra o problema e com o decorrer do tempo, foi-se descobrindo novas informações e características que antes não eram consideradas no sistema.

A chamada “*Shut Height Failure*” foi descrita como uma falha deve ser evitada a partir do uso de medidas adotadas no método “*Total Maintenance*”. Porém, esta falha deve ser imediatamente detectada caso ocorra e medidas devem ser tomadas o mais rápido possível neste caso. Para isto, a prensa tem um sistema de detecção com base um elemento sensor indutivo utilizado da forma que a sessão 3.2.3 apresentou.

Este sistema de detecção veio a falhar em uma determinada oportunidade resultando em prejuízos diversos. A sessão 4.1 do texto que demonstrou o procedimento para a aquisição de dados do FMEA, deixou claro que diante do problema proposto pela empresa, se fez necessária a investigação de vários aspectos do sistema, não só o elemento sensor. Logo, o FMEA se mostrou essencial para a investigação das causas do modo de falha e conseqüentemente a apresentação de eventuais soluções cabíveis.

5.1 FMEA

O FMEA foi implantado com o intuito de possibilitar a identificação e eliminação de todas as causas dos modos de falha do sistema. A sessão 4.1.1 expôs que inicialmente foi realizada uma técnica de discussão em grupo para levantamento de possíveis variáveis, o *brainstorming*. Realizada esta técnica, elaborou-se um questionário digital que foi disponibilizado para os integrantes das equipes de manutenção e administração. Houve duas respostas ao questionário, cada uma com os valores distintos. Os resultados dos questionários indicaram as potenciais causas para o modo de falha proposto e estão contidos nos quadros 11 e 12.

Modo de Falha	Possível Causa	Severidade	Ocorrência	Deteccção
Não detecta a "Shut Heigth Failure"	Sujeira Presente na Área de Funcionamento do Sensor	3	1	5
	Vibração no Condutor que Transporta informação para o CLP	4	2	4
	Regulagem das Distâncias na Instalação do Sensor	7	3	5

Quadro 11 – Resultado 1 do Questionário que Compõe o FMEA
Fonte: Autor

Modo de Falha	Possível Causa	Severidade	Ocorrência	Deteccção
Não detecta a "Shut Heigth Failure"	Sujeira Presente na Área de Funcionamento do Sensor	8	4	1
	Vibração no Condutor que Transporta informação para o CLP	4	1	5
	Regulagem das Distâncias na Instalação do Sensor	4	1	1
	Incapacidade do Sensor em realizar a Medida com Precisão Suficiente	8	1	5

Quadro 12 – Resultado 2 do Questionário que Compõe o FMEA
Fonte: Autor

Os resultados indicaram quais as possíveis causas do modo de falha ao mesmo tempo que trouxeram os números de S, O e D. Com estes valores, é possível construir o quadro completo do FMEA proposto pelo autor [Ross et al. \(2013\)](#) na sessão 2.4. Foram utilizados os dados mais pessimistas de cada possível causa, ou seja, considerou-se os piores índices de cada resultado.

O quadro do FMEA indica através do NPR quais são as causas que necessitam ser investigadas. Pode-se observar que todas as possíveis causas obtiveram um NPR maior que 8. De acordo com o quadro 8, acima deste valor, é necessário tomar medidas, investigar e/ou agir para eliminar as causas.

O autor [Martins \(2017\)](#) demonstra que através do diagrama de Ishikawa, pode-se verificar qual o impacto de cada uma das causas apontadas na geração do modo de falha. Então elaborou-se um diagrama no mesmo formato aplicado ao modo de falha estudado (figura 43).

De posse dos dados contidos no quadro do FMEA e no diagrama de Ishikawa, foi possível dar prosseguimento à pesquisa, investigando cada uma das possíveis causas para o modo de falha e analisando qual delas necessitaria de uma maior atenção na hora

FMEA - Análise de Efeitos e Modos de Falhas							
Função	Modo de Falha	Efeito	SEV	Causa	OCO	DET	NPR
Detectar a Shut Raid Failure	Não detecta a Shut Raid Failure	Não interrompe o funcionamento da prensa	8	Sujeira na Área de Funcionamento do Sensor	4	1	32
			4	Vibração no Condutor que Transporta informação para o CLP	2	4	32
			7	Regulagem das Distâncias na Instalação do Sensor	3	5	105
			8	Incapacidade do Sensor em realizar a Medida com Precisão Suficiente	1	5	40
			0	Causa 5	0	0	0
			0	Causa 6	0	0	0
			0	Causa 7	0	0	0

Quadro 13 – Formulário do FMEA Preenchido
Fonte: Autor

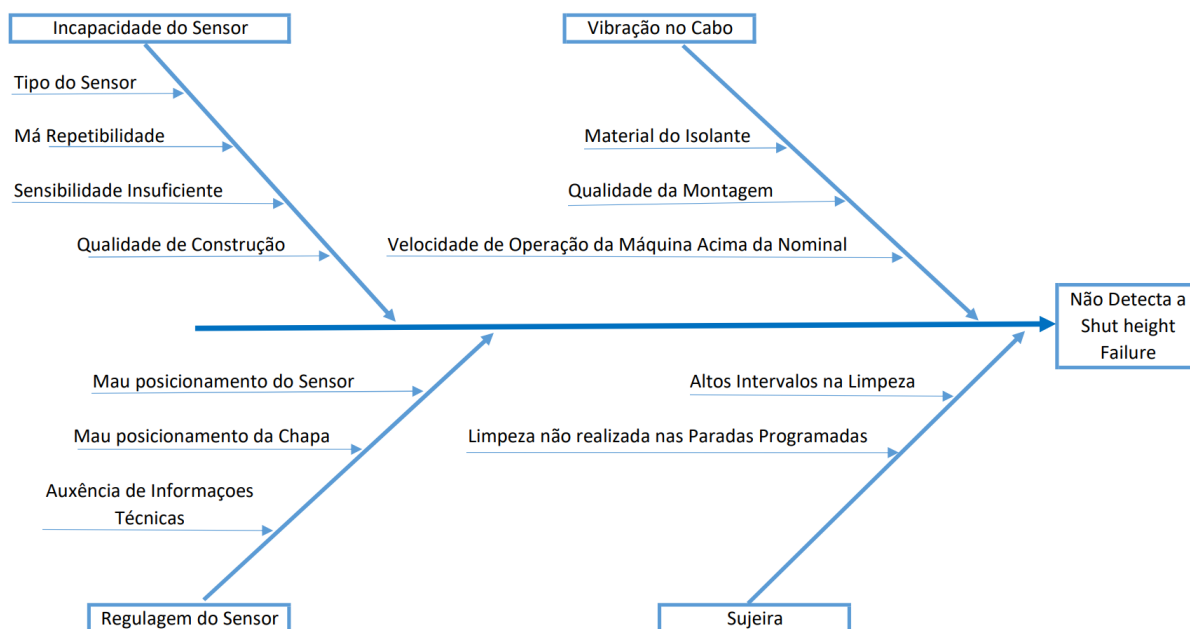


Figura 43 – Diagrama de Ishikawa para FMEA
Fonte: Autor

de projetar as ações. Na sessão 5.3, serão discutidos os aspectos e os resultados de cada análise advinda da metodologia utilizada.

O próximo passo para a realização da análise das causas levantadas pelo FMEA, era decidir qual teria uma relevância maior e qual seria possível realizar experimentos

para a confirmação das suspeitas. Ficou claro que dentre os quatro aspectos levantados, que a "Sujeira Presente na Área de funcionamento do Sensor" e a "Vibração no Conductor" obtiveram os menores NPR's, ou seja, dentre as causas propostas, estas são a de menor relevância relativa. Porém, o NPR é igual a 32, como descrito anteriormente, este valor demonstra que é preciso investigar as causas e eventualmente propor melhorias para as mesmas.

Como mostrado na sessão 4.1.2 que diz respeito à análise de dados provenientes do FMEA, não foi possível realizar experimentos na própria prensa, forçando que fossem projetados métodos de experimentação para as causas descritas fora do ambiente da empresa.

Dos dois itens de menor NPR's descritos acima, considerando a limitação de acesso à máquina, somente a "Sujeira" pôde ser analisada sem que se projetasse algum experimento, pois a limpeza efetuada periodicamente depende apenas do plano de manutenção vigente e dos procedimentos realizados durante o serviço. Este item então será abordado nas discussões dos resultados.

Levando em consideração a causa do modo de falha por vibração no condutor, uma experimentação se fez necessária para testar a resistência dos isolamentos e das interferências possíveis no regime de operação, porém, como descrito, não foi possível projetar e executar um experimento que atendesse estes requisitos. Diversas dificuldades foram impostas ao se construir as bancadas e infelizmente não houve como conduzir um experimento para testar se esta causa pode gerar o modo de falha novamente no futuro.

Partindo para a análise das causas com os maiores NPR's ("Regulagem das Distâncias de Montagem" e "Incapacidade do Sensor") observou-se que alguma experimentação deveria ser realizada. Durante a realização da pesquisa, foi possível adquirir o modelo do sensor utilizado na prensa, possibilitando que fossem projetados experimentos que testassem estas duas características. Seguindo a metodologia apresentada na sessão 4.2, dois experimentos foram realizados com o intuito de testar aspectos do sensor que influenciam diretamente nas causas do modo de falha.

5.2 Experimentos

Como descrito na sessão anterior, os experimentos foram projetados para servirem de confirmação se as duas causas de maior NPR resultantes do FMEA são verdadeiras. Servirão para confirmar se a regulagem das distâncias de montagem influenciam no processo de medição e se o sensor tem sensibilidade suficiente para medir deslocamentos na ordem de décimos de milímetro, pois a folga máxima de operação da máquina é de $\pm 0,889mm$.

Se for constatado que o sensor não atende aos requisitos, será necessário investigar qual método de medição seria mais adequado para o sistema. Os custos financeiros, operacionais e de tempo seriam elevados, logo, confirma-se a necessidade de verificar se o sistema que já existe atende as expectativas.

5.2.1 Ensaio Estático

A sessão 4.2.1 especificou o procedimento experimental, a caracterização da bancada e os cálculos envolvidos na obtenção dos dados. Buscou-se obter dados importantes para o funcionamento do sistema. São eles:

- Sensibilidade de Comutação
- Distância de Comutação
- Comutação em Aproximação Lateral
- Repetibilidade

A sensibilidade na comutação pôde ser testada pelo fato de que a bancada tinha a capacidade de variar o avanço (D_x) na ordem de $0,04mm$. A bancada era capaz de dar passos unitários no motor, em cada passo, o motor girava $1.8^\circ \pm 0,09^\circ$.

A medida que o experimento foi sendo realizado, a primeira característica do sensor a ser verificada foi a sensibilidade de comutação. O método utilizado possibilitava que a peça se aproximasse do sensor como a chapa se aproxima na prensa, sendo assim, verificou-se que era necessária somente um passo de motor para que a comutação acontecesse. Tomando um dos pontos do gráfico que será apresentado como exemplo, verifica-se que foram necessários 107 passos de motor para que a peça se movimentasse $4,3 \pm 0,04mm$. A constatação desta característica do sensor se deu pelo fato de que quando se dava 106 passos, o sensor não comutava seu estado, ou seja, o sensor foi acionado com um *input* do menor valor de distância possível. A distância mínima para comutação esteve sempre na casa de décimos de milímetro e foi observada em 100% das rodadas dos experimentos realizados.

Os próximos quesitos a serem analisados com os resultados dos experimentos, dizem respeito a distância de comutação e aproximação lateral. Estes dados foram extraídos do experimento em forma de gráfico. A curva padrão disponibilizada na sessão 4.2.1, indica que quanto mais a face do sensor se afasta da peça alvo, mais a peça tem que avançar para ocorrer o acionamento ou desligamento. Este comportamento foi confirmado pelos experimentos.

O gráfico resultante mostra que a distância lateral necessária para a comutação foi aumentando à medida que o sensor se afastava da peça alvo. Este dado é muito importante

para que se possa compreender o comportamento do sensor em diferentes distâncias de comutação. Os dados estão plotados na figura 44.

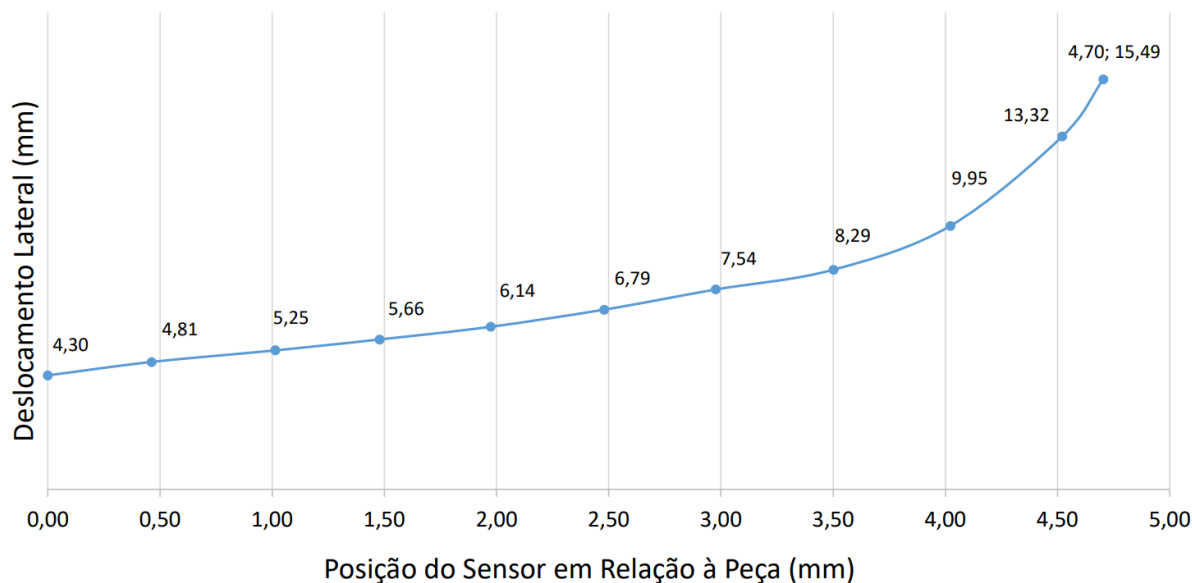


Figura 44 – Gráfico Ensaio Estático

Fonte: Autor

É possível observar no gráfico que a uma distância zero da peça, ou seja, na situação em que o sensor estava encostando na face da peça alvo, foi necessário avançar $4,30 \pm 0,04 \text{ mm}$ a partir do ponto de referência. Este dado mostra que mesmo que o sensor esteja muito perto do alvo, a comutação não acontecerá quando a peça passar pelos limites do perímetro. Observou-se que ao aumentar a distância entre a face do sensor e a peça alvo, aumentava-se o avanço necessário em milímetros a partir do ponto de referência. O ensaio foi realizado de meio em meio milímetro de distância da face do sensor até a peça.

Este experimento confirmou também os dados presentes na representação do fabricante que dizia respeito as distâncias para comutação. Com o valor nominal de 5 mm , foi observado que o sensor não altera seu estado, a distância máxima de comutação no teste foi de $4,70 \pm 0,05 \text{ mm}$. Sendo assim, a recomendação do fabricante de que o sensor opere a 10% do valor nominal se mostrou condizente com o resultado.

Além de mostrar o quanto de distância é necessária para a mudança de estado, percebe-se também uma certa linearidade até a distância de 4 mm . A partir desta distância, o experimento demonstrou uma baixa repetibilidade nas medições do sensor, ou seja, para os mesmos valores de avanço, nem sempre o sensor ativava. A tabela 1 mostra os dados relacionados às distâncias de acionamento que a fabricante disponibiliza.

A boa repetibilidade do sensor foi constatada até a distância máxima de operação S_a . Em 100% das 80 medições feitas até este valor, o sensor repetia seus resultados de forma consistente.

Alcance de Detecção Nominal	5mm
Alcance de Detecção Real (Sr)	Entre 4.5mm e 5.5mm
Alcance de Detecção Útil (Su)	Entre 4.05mm e 6.05mm
Distância de Operação (Sa)	Entre 0 e 4.05mm
Distância de Operação Recomendada (a)	0.5mm

Tabela 1 – Distâncias de Acionamento e Desligamento Padrão
 Fonte: Adaptado de Ifm (2020)

5.2.2 Ensaio Dinâmico

A sessão 4.2.3 especificou o procedimento experimental, a caracterização da bancada e os cálculos envolvidos na obtenção dos dados. buscou-se obter dados importantes para o funcionamento do sistema. São eles:

- Velocidade de Comutação
- Repetibilidade

Este experimento teve como objetivo verificar se o sensor tinha a capacidade de mudar o seu estado um número maior de vezes que a máquina realiza um ciclo, ou seja, se a máquina realiza $240BPM$, o sensor deve ser capaz de ser acionado ou desacionado mais rápido do que a prensa opera. Se o elemento sensor não atingir esta velocidade, a chapa de metal irá sair da distância de comutação regulada tão rápido que não irá detectar.

Para a realização do experimento, foi utilizado um motor hidráulico com eixo chavetado para o *input* de dados no sensor. A cada 360° de giro do eixo, o sensor foi acionado uma vez, logo, a quantidade de pulsos em $60s$, seria a quantidade de RPM. O sistema então contava a quantidade de pulsos com o intuito de constatar se o sensor detectou a chaveta do eixo todas as vezes que ele passou na área de ativação.

A bancada induzia uma certa quantidade de RPM no motor e um tacômetro foi utilizado para verificar se esta quantidade era suficientemente precisa. Com o *input* setado, o programa contava os pulsos em um minuto. A tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Pode-se perceber que o input foi regulado com um instrumento mais preciso que o sensor era capaz de detectar, ou seja, como o sensor só conseguia comutar em uma volta completa pelo fato do eixo possuir somente uma chaveta, o instrumento de medição foi suficiente para sempre regular o input de forma que não variasse a ponto de ocasionarem erros na medida.

RPM	Incerteza	PULSOS	Incerteza
240,21	0,29	240,00	0,58
300,14	0,30	300,00	0,58
360,20	0,33	360,00	0,58
420,17	0,37	420,00	0,58
480,12	0,40	480,00	0,58
600,07	0,47	600,00	0,58
722,27	0,53	722,00	0,58

Tabela 2 – Quantidade de Pulsos pelo RPM colocado
Fonte: Autor

O fabricante indica que o sensor tem uma frequência máxima de operação de $700Hz$, logo, o ensaio mostrou que para todas as velocidades possíveis de operação da prensa, o sensor foi capaz de detectar a chaveta todas as vezes que ela adentrava na área de ativação.

Os valores de input foram:

- $1\times$ a Velocidade de Operação Nominal
- $1,25\times$ a Velocidade de Operação
- $1,5\times$ a Velocidade de Operação
- $1,75\times$ a Velocidade de Operação
- $2\times$ a Velocidade de Operação
- $600RPM$
- $722RPM$

O ensaio dinâmico demonstrou que o sensor trabalha em um regime muito abaixo do especificado em relação à velocidade de comutação, garantindo que não sejam perdidos pulsos ou que não sejam detectadas anormalidades caso elas ocorram em velocidades de operação normais ou até mesmo muito acima da normalidade.

A repetibilidade neste experimento com o regime dinâmico se demonstrou satisfatória pois em 100% das medições, o sensor não variou o seu comportamento em relação à bateria de testes anterior.

5.3 Discussão dos Resultados

Esta sessão discutirá os resultados obtidos na aplicação da ferramenta FMEA e quais informações foram extraídas depois de realizadas todas as análises de cada causa do modo de falha proposto.

5.3.1 FMEA

O FMEA provou ser uma ferramenta poderosa quando se busca a identificação e resolução de falhas que ocorram em ambientes industriais. No *brainstorming*, no questionário, nos resultados e nas análises dos que se seguiram, observou-se uma grande capacidade de descoberta de fatores que afetam o sistema.

Com a metodologia utilizada e considerando todas as limitações, o método trouxe aspectos que antes não eram considerados quando o sistema foi analisado. Inicialmente a troca do sensor foi proposta, porém, com o decorrer da metodologia ficou claro que haviam mais aspectos importantes que afetavam o funcionamento e que estes não poderiam ser ignorados.

5.3.2 Elemento Sensor Incapaz de Realizar as Medidas com Sensibilidade e Precisão Suficientes

Este modo de falha foi apontado pelo FMEA através do pensamento inicial do projeto no sentido de que havia a desconfiança que o elemento sensor não era capaz de realizar as medições de acordo com o esperado.

Os ensaios estático e dinâmico provaram que o sensor é robusto e simples, ao mesmo tempo que tem sensibilidade e precisão suficientes na hora de efetuar uma medida. Na figura 43, o diagrama de Ishikawa identifica em "Sensibilidade e Precisão do Elemento Sensor", alguns fatores a serem analisados e indicarão se é ou não é adequado para ser utilizado no sistema.

Começando pelo tipo do sensor e pela qualidade de construção, foi constatado que por se tratar de uma operação em regime transiente e severo do ponto de vista da sujidades e vibrações, o elemento sensor precisa ser robusto e ao mesmo tempo simples para que seja mais difícil e menos comum a falha do mesmo. Como o sensor utilizado nos ensaios foi exatamente o mesmo do que é utilizado na prensa segundo a fabricante, pôde-se constatar que se tratava de um sensor robusto. O princípio de funcionamento do sensor indutivo segundo Monteiro, Assis e Reche (2017) já indica que é suficiente para este tipo de aplicação, já que é o mais indicado para detecção de metais em movimento de aproximação ou afastamento.

Quanto à sensibilidade e repetibilidade, os ensaios demonstraram que o elemento sensor é capaz de atender os requisitos do sistema de medição.

5.3.3 Regulagem da Distância do sensor em Relação à Peça Alvo

Após a conclusão do ensaio estático, observou-se que a distância em que o sensor está posicionado em relação a peça alvo influencia diretamente no sistema de medição. A máquina tem um curso pré-definido e uma folga máxima que pode ser tolerada por seus elementos e partes móveis. Com este valor de deslocamento vertical do martelo exterior (*outer*) mais a tolerância que é de $\pm 0,889mm$, obtém-se o valor limite de deslocamento da chapa de metal que se move a frente do elemento sensor.

Conclui-se que o sensor deve estar posicionado a uma distância de $0,5mm$ a $4mm$ da chapa de metal para que a medida tenha uma confiança satisfatória. Para facilitar a instalação e a regulagem das distâncias, encontrou-se o valor em milímetros que o sensor tem que estar posicionado em relação à chapa para que o acionamento ou desligamento aconteça no meio da face do sensor. O diâmetro é de $18mm$, então se existir um valor que o faça comutar a $9mm$, facilitará a regulagem. Realizando a interpolação entre os pontos $[3,50; 8,29]$ e $[4,00; 9,95]$ do gráfico na figura 44 buscou-se encontrar o valor no eixo horizontal para o valor de $9mm$. Observou-se que o sensor deve estar posicionado a $3,8mm$ de distância da face do alvo para que a comutação ocorra. A figura 45 representa a regulagem recomendada para a aplicação do sensor na prensa.

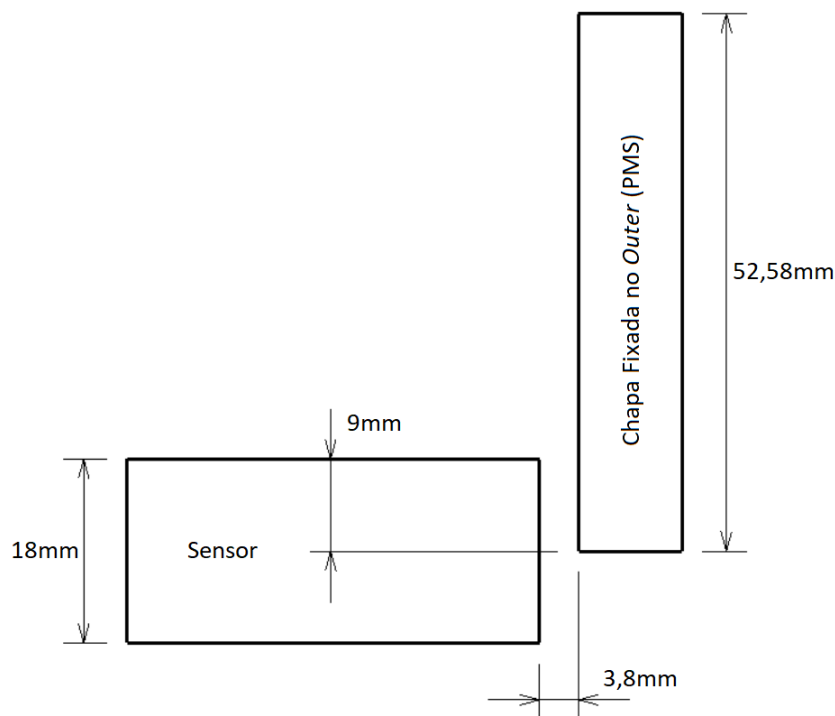


Figura 45 – Regulagem em Milímetros

Fonte: Autor

O tamanho da chapa é importante pois deve considerar a folga permitida na prensa. Na sessão 3.2.2 a folga foi calculada e concluiu-se um valor de $0,889mm$, então, este valor foi multiplicado por dois e somado ao tamanho padrão da chapa que é de duas polegadas ou $50,8mm$. Sendo assim, a chapa que se move na frente do sensor terá um tamanho de $52.58mm$. Este valor considera que a máquina pode exceder o seu curso de operação normal até a medida da folga tanto para cima quanto para baixo. Se a variação no curso do *outer* não for maior que a medida da folga máxima, o sensor não deve detectar a "*shut weight failure*".

Com esta regulagem recomendada, tem-se a certeza que se tratando da aproximação lateral da chapa, o sensor irá detectar qualquer alteração fora do normal que possa ocorrer.

Conclui-se então que o plano de manutenção vigente na empresa deve incluir a verificação destas medidas de maneira mais frequente, visto que os resultados mostraram que para diferentes distâncias, o sensor se comporta de maneiras diferentes.

5.3.4 Vibração no Cabo do Sensor

O sensor testado nos ensaios contava com as mesmas características construtivas do sensor original, portanto, pôde-se verificar a qualidade e a robustez do mesmo. Porém, como citado na sessão 4.1.2 não foi possível conduzir um experimento que colocasse a prova a resistência dos isolamentos de borracha e condutores elétricos que fazem parte do sensor, tampouco medir interferências relacionadas à vibrações mecânicas e ondas eletromagnéticas. Não foi possível também verificar a qualidade e a instalação dos componentes instalados na prensa em operação.

5.3.5 Sujeira

A equipe de manutenção havia relatado que a presença de limalhas de metal, óleo, partículas diversas, interferem no funcionamento do sistema, por isto está caracterizado no FMEA como uma causa que pode levar a eventual falha do sistema. O setor responsável pelas manutenções periódicas informou que a limpeza na área do sensor e na prensa em geral é feita a cada parada programada.

Entendendo esta causa como importante para o estudo, conclui-se que deve ser feita a verificação visual da área de operação do sensor todas as vezes que a prensa parar para as manutenções programadas, a fim de evitar acúmulo de sujeira. A realização da limpeza no sistema de medição em todas as paradas programadas, não onerará significativamente o processo de manutenção, visto que varias verificações de folga e defeitos aparentes são realizados durante o tempo que a prensa não está em operação.

6 Conclusão

Este trabalho utilizou a metodologia do FMEA para abordar um sistema de detecção de falhas em uma prensa de dupla ação instalada na linha de produção de latas de alumínio. O uso desta metodologia possibilitou entender o funcionamento do sistema, discutir com os responsáveis pela manutenção os fatores que poderiam levar o sistema a falhar, organizar estes fatores em ordem de prioridade, realizar experimentos e discussões acerca das causas apontadas e finalmente dar recomendações para que as causas fossem eliminadas.

Os resultados obtidos no FMEA demonstraram que haviam outros aspectos a serem analisados quando se tratava do sistema de detecção. Inicialmente foi proposto que o elemento sensor precisava ser atualizado, mas através de experimentos realizados com o intuito de validar os dados do FMEA, ficou comprovado que aspectos de montagem do sensor influenciam no processo de medição mas não é necessária a troca do mesmo.

Com os resultados dos experimentos e as discussões acerca das causas que não envolviam diretamente o elemento sensor, o FMEA configurou uma ferramenta poderosa para o uso em ambientes industriais, podendo ser implementada para tratar de projetos, processos ou produtos. A capacidade de descoberta e investigação do método é grande e não necessita de muitos recursos.

A pesar das dificuldades impostas na sua realização, a pesquisa obteve êxito em suas propostas iniciais, sendo possível utilizar uma metodologia confiável para se chegar em uma série de conclusões a cerca do sistema estudado.

6.1 Limitações do Trabalho

Ao longo do processo de desenvolvimento do trabalho, da coleta de informações, dados, projeto dos experimentos e da análise dos resultados, foram encontradas dificuldades que delimitaram o escopo e impuseram mudanças nas intenções originais.

Certas mudanças foram necessárias pela impossibilidade de se visitar livremente e de poder realizar experimentos na própria prensa em regime de operação. A não ser nas paradas programadas a cada quinze dias, a operação é ininterrupta e impossibilita aproximação ou realização de algum experimento, visando a segurança operacional e do trabalho, consequentes de regras rígidas para que nenhum risco desnecessário seja assumido pela equipe de manutenção e pela equipe de gerenciamento.

Limitações de recursos impossibilitaram a construção de uma bancada que emulasse os movimentos da prensa com fidelidade, logo, foi necessária a separação dos testes

a fim de poupar recursos e simplificar a construção.

Considerando a impossibilidade de se obter informações específicas sobre a prensa, os experimentos realizados não foram embasados nos materiais específicos utilizados no sistema de detecção. Por exemplo, a bancada de teste estático utilizou uma peça de aço que se assemelha ao aço utilizado na curva de acionamento levantada pelo fabricante do sensor, porém, se houvesse a informação, o material a ser utilizado na bancada seria o mesmo que é empregado na prensa.

No ano de 2020 as dificuldades se agravaram pelas regras sanitárias impostas em todos os países em decorrência da pandemia. Com estas medidas, todo o quadro de funcionários da empresa mudou e as regras de acesso ficaram mais rígidas, impossibilitando a visita e a coleta de informações, visto que algumas informações só podiam ser acessadas dentro do espaço físico da empresa por razões contratuais.

6.2 Recomendações a Trabalhos Futuros

A metodologia do FMEA foi implementada no sistema de detecção de falhas da *Cupper*. Este fato demonstra que a falha conhecida como "*Shut Weight Failure*" pode ser abordada em trabalhos futuros. Existem uma série de aspectos e variáveis que influenciam na ocorrência desta falha. Se uma metodologia for implementada para investigar, abordar, e propor melhorias, os benefícios serão grandes para todos os envolvidos. Implicaria em paradas menos frequentes e evitaria danos no ferramental.

Referências

- ABNT, I.; SBM, P. R. M. Guia para a expressão da incerteza de medição. *3ª Edição brasileira*, Rio de Janeiro, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 70.
- ABRALATAS. *Processo de fabricação da lata de alumínio para bebidas*. Disponível em <<http://www.abralatas.org.br/o-passo-a-passo-na-fabricacao-da-lata-de-aluminio/>> Acesso em 22 out. 2019, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.
- BRAND, F. A. et al. Avaliação da metodologia fmea como ferramenta para reduzir impactos ambientais no processo manutenção industrial. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 10, 04 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- CABRAL, P. Erros e incertezas nas medições. *Sítio da Internet*, 2004. Disponível em: <<http://www.peb.ufrj.br/cursos/COB783/ErrosIncertezas.pdf>>. Citado 6 vezes nas páginas 63, 64, 67, 68, 70 e 72.
- CAPETTI, E. J. *O papel da gestão da manutenção no desenvolvimento na estratégia de manufatura*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Curitiba, 2005. Citado na página 15.
- CIMM. *Definição: o que é conformação mecânica*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/606-conformacao-mecanica>>. Citado na página 33.
- CINCINNATI, I. M. *Can washers*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.canwash.com/can-washers/>>. Citado na página 34.
- CMB, E. *3200 Lacquer Machine*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://carnaudmetalboxengineering.co.uk/products/3200-laquer-spray-machine>>. Citado na página 35.
- CORTE, J. V. *Aplicação da ferramenta FMEA a uma microcervejaria em Curitiba-PR*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Citado na página 48.
- DAILEY, K. W. *The FMEA Pocket Handbook: Failure Mode and Effects Analysis*. DW Publishing, 2004. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3Tm4AAAACAAJ>>. Citado na página 25.
- DIAS, A. *Projeto para confiabilidade: conceitos e fundamentos*. Florianópolis: Instituto Fábrica do Milênio, 1997. Citado na página 15.
- FERREIRA, J. P. A. Avaliação de qualidade de serviços governamentais digitizados. 2018. Citado na página 47.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2011. Citado na página 29.

- FORD, M. C. *FMEA training reference guide*. [S.l.], 1997. Disponível em: <<http://www.volumetric.com.br/artigos/fordmachineryfmea.pdf>>. Citado na página 26.
- GUIMARAES, L. M.; NOGUEIRA, C. F.; SILVA, M. D. B. da. Manutenção industrial: Implementação da manutenção produtiva total (tpm). *Revista e-Xacta*, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 175–197, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v5i1.735>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- IFM. *Infocard, Sensores Indutivos*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.ifm.com/br/pt/product/IG5593?tab=documentsAcessadoem15nov2020>>. Citado 4 vezes nas páginas 51, 52, 55 e 80.
- IFM, E. *Catálogo de sensores indutivos*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.ifm.com/br/pt/product/IG5593?tab=documentsAcessadoem15nov.2019>>. Citado 3 vezes nas páginas 56, 60 e 62.
- ITS, I. T. S. *Internal Bake Oven*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.internationalthermalsystems.com/?s=pin+oven>>. Citado na página 35.
- JIPM. *História do TPM e JIPM*. [S.l.], 1989. Disponível em: <<http://www.jipm.or.jp>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- JUNIOR, P. L.; SILVEIRA, F. L. da. Sobre as incertezas do tipo a e b e sua propagação sem derivadas: uma contribuição para a incorporação da metrologia contemporânea aos laboratórios de física básica superior. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 2, 2011. Citado na página 72.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção: função estratégica*. Rio de Janeiro: QualityMark, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 20, 21 e 24.
- KRUM, R. C. Utilização do fmea para melhoria das falhas em niples de redução utilizados em uma prensa hidráulica de placas de madeira: Estudo de caso. *Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)*, UFPR - Ponta Grossa, p. 50, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5939>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 25 e 45.
- LAFRAIA, J. R. B. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. QualityMark, 2001. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=kffwNIfnJQC>>. Citado na página 24.
- LIRA, F. A. D. *Metrologia Dimensional: Técnicas de Medição e Instrumentos para Controle e Fabricação Industrial*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2015. Citado na página 56.
- MARTINS, J. Redução do retrabalho causado por má aplicação de verniz interno em embalagens metálicas. *Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)*, UFPR - Ponta Grossa, p. 56, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/7888>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 75.
- MICHAELIS. *Dicionário Michaelis*. [S.l.], 2000. Disponível em: <<http://www.uol.com.br/michaelis/>>Acessadoem22out.2019>. Citado na página 26.

- MINIPA. *TACÔMETRO FOTO/CONTATO DIGITAL MDT-2238B*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/diversos/tacometros/169-mdt-2238b#manual>>. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.
- MINSTER, N. *Manual operacional da prensa minster dac-150*. Brasília, DF, 2019. Citado 8 vezes nas páginas 37, 38, 40, 41, 42, 50, 51 e 60.
- MONTEIRO, S. O.; ASSIS, A. S. de; RECHE, M. M. A manifestacao indesejada do splash over em instrumentos que utilizam sensores indutivos para o monitoramento de veículos automotores. 2017. Citado na página 82.
- MOTIONKING. *HB Stepper Motor Catalog*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/MotionKing/17HS4401/pdf.php?id=928661>>. Citado na página 53.
- MTX. *Manual do Usuário PAQUIMETRO DIGITAL 316119*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://br.toolsworld.com/info/manual/br/316119.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.
- NBR6591, A. *NBR 6591*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=874Acessadoem15nov.2019>>. Citado na página 56.
- NORDSON. *Meg II Compact Spray Gun*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.nordson.com/-/media/Files/Nordson/industrial-coating-systems/Products/Container/CNL1228.pdf?la=en>>. Citado na página 35.
- OLIVEIRA, U. R.; PAIVA, E. J.; ALMEIDA, D. A. Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas fta, fmea e a análise crítica de especialistas. *SciELO*, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 77–91, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132010005000004>>. Citado na página 30.
- PALADY, P. *FMEA: Análise dos Modos de Falhas e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram*. IMAM, 2004. ISBN 9788589824316. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=J6amYgEACAAJ>>. Citado na página 27.
- PUENTE, J. et al. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality and Reliability Management*, v. 19, n. 2, p. 137–150, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/02656710210413480>>. Citado na página 28.
- QUEST, Q. E. S. T. *Quality Council of India*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://equest.co.in/product/failure-mode-and-effects-analysis-fmea/>>. Citado na página 16.
- REKAS, A. et al. *Numeric analysis of relationship between height and geometry of bottom of a beverage can and its resistance to increase in internal pressure*. 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, 2015. Citado na página 33.
- ROSS, C. et al. Aplicação da ferramenta fmea: Estudo de caso em uma empresa do setor de transporte de passageiros. In: *Revista Tecno-Lógica*. Santa Cruz do Sul: [s.n.], 2013. v. 11, n. 1, p. 29–32. Disponível em: <<https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/157>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 75.

- SAKURADA, E. Y. *As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Arvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, SC, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 15, 24, 26, 27 e 48.
- SANTOS, M. V. Prevenção e controle de riscos em prensa no processo de fabricação de lastas de alumínio garantindo a produtividade através da ferramenta lean - smed: Um estudo de caso. *Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho, p. 58, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/7888>>. Citado na página 32.
- SERPA, A. d. L. O ensino da medição de comprimentos com o uso do paquímetro em um curso profissionalizante na perspectiva da transposição didática. 2004. Citado na página 64.
- SIEMENS, A. *Application examples for High-Speed Counters (HSC)*. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/346/109742346/att_906681/v1/109742346_HSC_S7_1200_DOKU_V10_en.pdf>. Citado na página 62.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARRISON, A. *Administração da Produção*. São Paulo: Atlas, 1987. 747 p. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SOUZA, J. et al. Aplicação do método de análise e solução de problemas (masp) para redução de avarias com movimentação de latas vazias em uma indústria de bebidas. *Revista Espacios*, RS-Brazil, v. 35, n. 4, p. 5, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 31.
- STAMATIS, D. H. *Failure Mode and Effects Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee, Wisconsin: ASQ, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- STOLE, M. *Stolle Machinery: Cupping Systems*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.stollemachinery.com/en/products/rutherford-decorator-and-basecoater>> Acessado em 22 out. 2019. Citado na página 34.
- TAHASHI, Y.; OSADA, T. *Tpm/mpt: Manutenção produtiva total*. São Paulo: Instituto IMAN, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- TURNER, J. R.; THAYER, J. F. *Introduction to Analysis of Variance*. Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2001. 179 p. Citado na página 36.
- VIANA, H. R. G. *PCM: Planejamento e controle da manutenção*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- VILLACOURT, M. Failure mode and effects analysis (fmea): A guide for continuous improvement for the semiconductor equipment industry. *International SEMATECH*, 1992. Disponível em: <<https://fmealibrary.com/index.php/mdocs-posts/sematechsemiconductorfmeahandbook/>>. Citado na página 27.
- WYREBSKI, J. *Manutenção produtiva total - um modelo adaptado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, SC, 1997. Citado na página 20.
- YAMAGUCHI, C. T. *Tpm-manutenção produtiva total*. ICAP-del-rei, São João del Rei - Minas Gerais, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.

Apêndices

APÊNDICE A – Questionário para Realização do FMEA

Questionário do FMEA para "Shut Weight Failure"

Termo de consentimento.

Prezado,

Meu nome é Marcos Christian Alves Ferreira, Estudante de Engenharia Automotiva pela Universidade de Brasília, atualmente estou executando o meu trabalho de conclusão de curso com o orientador Prof. Dr. André Murilo de Almeida e com o coorientador Prof. Dr. Evandro Leonardo. Venho por meio deste termo convidá-lo a responder voluntariamente um questionário que fará parte dos dados que serão utilizados no TCC.

Serão abordadas questões pertinentes ao funcionamento da prensa hidráulica MINSTER na linha de produção. Serão disponibilizadas as informações para o completo entendimento do que está sendo proposto bem como a finalidade da pesquisa.

Lembre-se que:

- * Sua participação é muito importante para o sucesso deste trabalho;
- * Não há identificação no questionário, portanto, será preservado o anonimato do respondente.

Desde já agradeço a atenção dispensada e me coloco à disposição para os esclarecimentos necessários.

Atenciosamente.

Telefone (WhatsApp): (62) 996154123

E-mail: (marcos_ch19@hotmail.com)

[Próxima](#)

A Proposta

O FMEA "Failure Mode and Effects Analysis" ou Análise dos Efeitos e dos Modos de Falha" é uma ferramenta muito utilizada na indústria e no âmbito acadêmico para identificar, abordar, eliminar ou mitigar alguma falha que esteja ocorrendo no processo de produção ou na entrega de algum serviço.

A Falha

Existe uma falha na prensa hidráulica MINSTER chamada de "Shut Heigth Failure" ou "Falha por Sobrepeso", que pode ser ocasionada por vários fatores, sejam eles operacionais, mecânicos, de desgaste, entre outros. Quando esta falha ocorre, um sistema é utilizado para detectá-la, composto de dois sensores indutivos montados em frente a uma placa metálica soldada ao "outter" ou "martelo exterior" da MINSTER. Este é o sistema estudado pelo TCC.

Se o sistema de detecção (que inclui o sensor, cabos, suporte, CLP, código, entre outros componentes) vierem a falhar, a máquina não parará e o desalinhamento causará grandes prejuízos das mais variadas formas para a empresa.

Na primeira fase do trabalho, executada em novembro de 2019, foi feito um questionário semelhante com um dos integrantes da equipe de manutenção responsável pela MINSTER naquele dia. Os resultados da pesquisa são mostrados na figura a seguir. Eles mostram que as possíveis causas da falha do sistema de detecção são a sujeira, a vibração no cabo, o mau posicionamento do sensor ou da chapa e a incapacidade do sensor. A coluna e linhas das causas estão destacadas em Azul. Em verde estão destacados os índices de Severidade, Ocorrência e Detecção.

Exemplo do quadro do FMEA

FMEA - Análise de Efeitos e Modos de Falhas								
Descrição: Análise do sistema de detecção da "Shut Heigth Failure" na MINSTER.				Abreviações: SEV / Severidade OCO / Ocorrência DET / Detecção NPR / Número Prioritário de Risco				
Função	Modo de Falha	SEV	Causa	OCO	Controle	DET	NPR	Ação Recomendada
Detectar a Shut Heigth Failure	Não detecta a Shut Heigth Failure		Sujeira		Não se aplica			Limpeza
			Vibração no cabo		Não se aplica			Substituição do componente
			Mau Posicionamento do sensor ou da Chapa		Não se aplica			Ajuste do Sensor ou Revisão na Solda
			Incapacidade do sensor de executar a medição com exatidão		Não se aplica			Troca do Sensor
		0	Causa 5	0	Não se aplica	0		Não se aplica
		0	Causa 6	0	Não se aplica	0		Não se aplica
		0	Causa 7	0	Não se aplica	0		Não se aplica

[Voltar](#)

[Próxima](#)

Índices

Existe um índice de severidade, ocorrência e detecção (SEV, OCO e DET) atrelado a cada falha apontada, representado por um número inteiro com o intuito de identificar o nível de cada item investigado.

Os índices foram analisados da seguinte maneira:

Severidade - Este índice classifica o quão severa é a causa da falha, por exemplo, se o mau posicionamento do sensor faz o sistema deixar de funcionar completamente, o índice seria 7 ou 8, indicando que o sistema deixou de funcionar.

Ocorrência - O índice indica o intervalo entre as possíveis causas da falha, por exemplo, se a sujeira presente no sensor ou em áreas próximas ao sensor afeta o funcionamento do sistema e acontece com uma frequência alta, o número correspondente seria o 7 ou 8.

Detecção - Este índice quantifica o quão fácil é detectar que a causa do problema ocorreu, por exemplo, se a sujeira certamente será detectada a cada manutenção programada, será atribuído o valor 1. Percebemos que este último índice funciona atribuindo um valor baixo se for fácil detectar a causa, e um valor alto se a causa passar despercebida.

Na quadro apresentado a seguir, podemos ver quais são os índices e os números atrelados a cada um pela metodologia do FMEA.

Índices de Severidade, Ocorrência e Detecção

Índice	Severidade	Ocorrência	Detecção
1	Minima - o cliente mal percebe que a falha ocorreu	Remota - dificilmente ocorre a causa que leva à falha	Muito grande - Certamente será detectado
2 e 3	Pequena - ligeira deteriorização no desempenho com leve descontentamento do cliente	Pequena - ocorre a causa da falha em pequena escala	Grande - Grande probabilidade de ser detectado
4, 5 e 6	Moderada - Deterioração significativa no desempenho de um sistema com descontentamento do cliente	Moderada - às vezes ocorre a causa que leva a falha	Moderada - Provavelmente será detectado
7 e 8	Alta - o sistema deixa de funcionar e há grande descontentamento do cliente	Alta - ocorre a causa da falha com certa frequência	Pequena - Provavelmente não será detectado
9 e 10	Muito Alta - idem ao anterior, porém afeta a segurança (cliente ou operadores)	Muito Alta - ocorre a causa da falha em vários momentos	Muito Pequena - Certamente não será detectado

Voltar

Próxima

Questionário Objetivo

As perguntas pertinentes ao que foi apresentado nos itens anteriores serão apresentadas a seguir.

Note que já existe uma versão desta pesquisa em fase preliminar, para isto serve este questionário, validar todas as informações que foram obtidas na primeira etapa do trabalho. Caso o entrevistado considere que as causas apresentadas no trabalho preliminar são pertinentes, deve ser respondido sim e deve-se atribuir um número para todos os índices. Se o entrevistado discorda, não há necessidade de atribuir um número para os índices. Esta pesquisa não é atrelada a primeira.

A "Sujeira Acumulada no Sensor e nas Proximidades" é uma possível causa de mau funcionamento deste sistema? *

- Sim
- Não
- Não Sei

Caso a resposta tenha sido "Sim" no item anterior, atribua os 3 índices, começando pelo de "Severidade".

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Severidade Mínima Severidade Muito alta

Qual é o índice de "Ocorrência" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Ocorrência Rara Ocorrência Frequente

Qual é o índice de "Detecção" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Chance Alta de ser
Detectado

Pouca Chance de ser
Detectado

[Voltar](#)

[Próxima](#)

Questionário Objetivo

A "Mau funcionamento do cabo ou conexão pelo efeito da Vibração" é uma possível causa de mau funcionamento deste sistema? *

- Sim
- Não
- Não Sei

Caso a resposta tenha sido "Sim" no item anterior, atribua os 3 índices, começando pelo de "Severidade".

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Severidade Mínima Severidade Muito alta

Qual é o índice de "Ocorrência" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Ocorrência Rara Ocorrência Frequente

Qual é o índice de "Detecção" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Chance Alta de ser Detectado Pouca Chance de ser Detectado

Voltar

Próxima

Questionário Objetivo

O "Mau Posicionamento do Sensor" é uma possível causa de mau funcionamento deste sistema? *

- Sim
- Não
- Não Sei

Caso a resposta tenha sido "Sim" no item anterior, atribua os 3 índices, começando pelo de "Severidade".

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Severidade Mínima Severidade Muito alta

Qual é o índice de "Ocorrência" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Ocorrência Rara Ocorrência Frequente

Qual é o índice de "Detecção" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Chance Alta de ser Detectado Pouca Chance de ser Detectado

Voltar

Próxima

Questionário Objetivo

O "Incapacidade Operacional do Sensor" é uma possível causa de mau funcionamento deste sistema? *

- Sim
- Não
- Não Sei

Caso a resposta tenha sido "Sim" no item anterior, atribua os 3 índices, começando pelo de "Severidade".

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Severidade Mínima Severidade Muito alta

Qual é o índice de "Ocorrência" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Ocorrência Rara Ocorrência Frequente

Qual é o índice de "Detecção" para a causa proposta?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Chance Alta de ser Detectado Pouca Chance de ser Detectado

[Voltar](#)[Próxima](#)

Questionário do FMEA para "Shut Weight Failure"

*Obrigatório

Questionário Discursivo

Quantas possíveis causas do mau funcionamento do sistema existem além das quatro que foram apresentadas anteriormente? *

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- Nenhuma

[Voltar](#)

[Próxima](#)

Questionário Discursivo

Aponte UMA possível causa para a falha do sistema. (A resposta pode ser justificada).

Sua resposta

Atribua o índice de "Severidade" para a causa mencionada.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Severidade Mínima Severidade Muito Alta

Atribua o índice de "Ocorrência" para a causa mencionada.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Ocorrência Rara Ocorrência Frequente

Atribua o índice de "Detecção" para a causa mencionada.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Chance Alta de ser Detectado Pouca Chance de ser Detectado

Voltar

Próxima

Questionário do FMEA para "Shut Weight Failure"

Considerações Finais

Este espaço é livre e não obrigatório para algum comentário adicional sobre o objeto de estudo.

Sua resposta

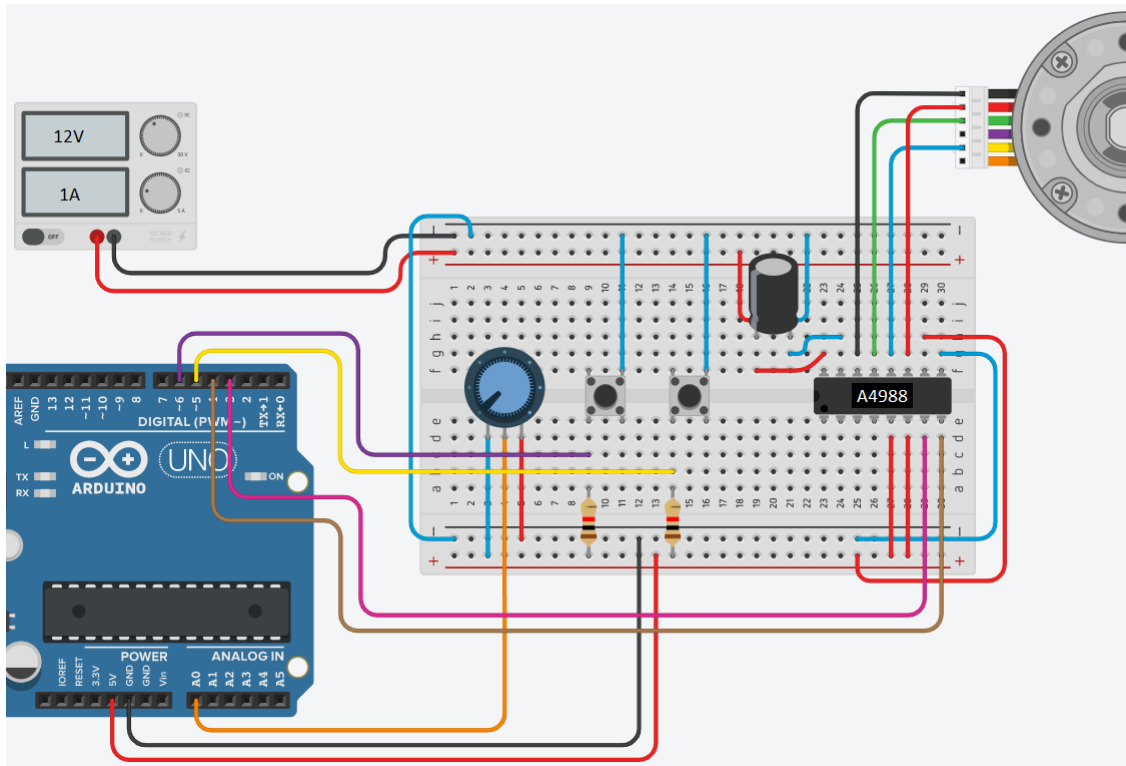
Este espaço é livre e não obrigatório para que seja informado o cargo do entrevistado.

Sua resposta

[Voltar](#)

Enviar

APÊNDICE B – Montagem do Circuito com Arduino e Código em C++



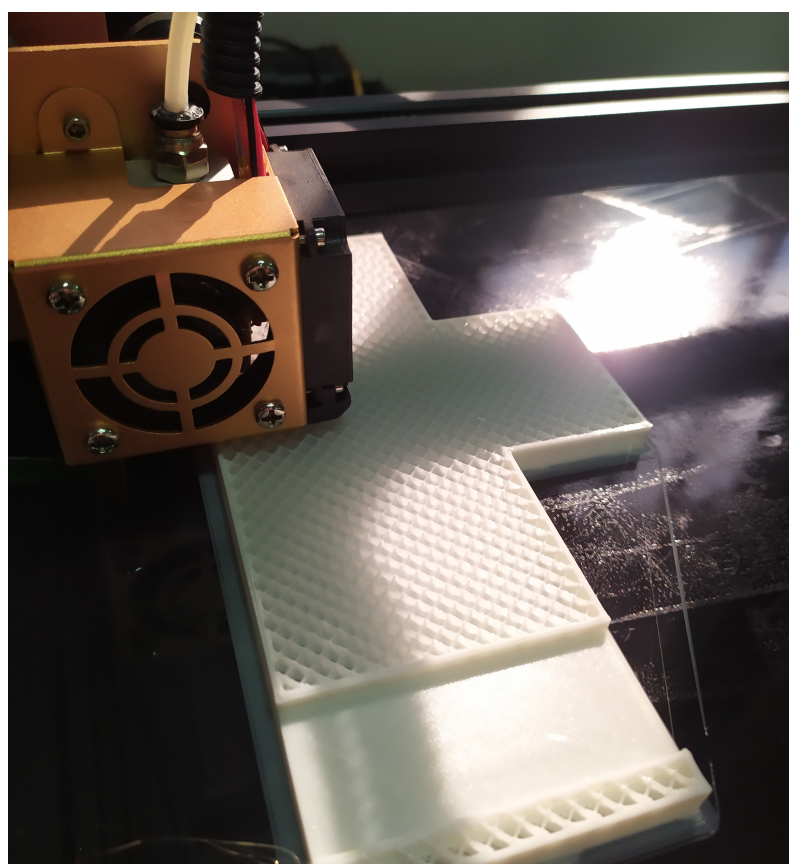
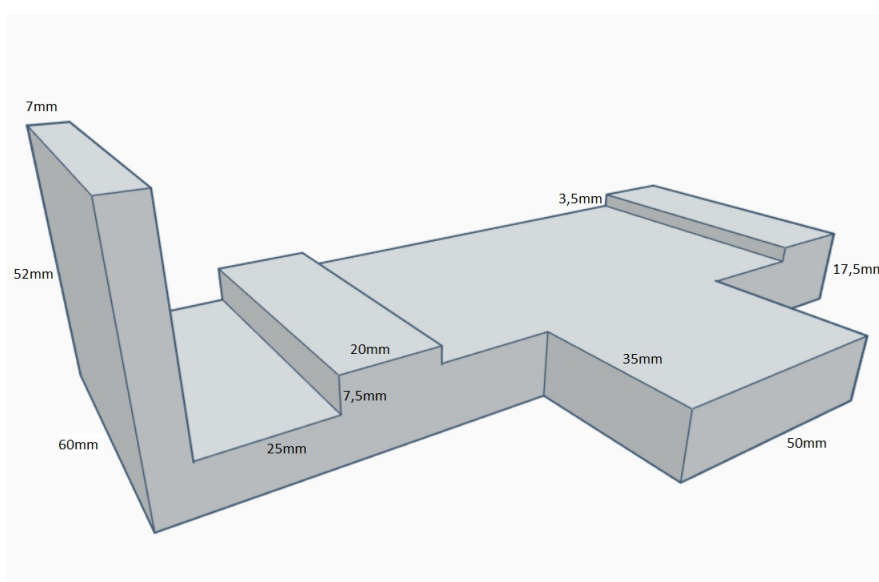
```
const int stepPin = 3;
// Pino de saída para comandar os pulsos do motor.
const int dirPin = 4;
// Pino de saída para comandar a direção do motor.
const int botao = 5;
// Pino de entrada para acionar a quantidade de passos
definida.
const int dirButton= 6;
// Pino de entrada para variar a direção do motor.
boolean buttonState = false;
boolean oldButtonState = false;
boolean direcao = false;
boolean executar = false;
int customDelay,customDelayMapped;
// Define variável de comando da velocidade do motor.
int newCustom;

void setup() {
    pinMode(stepPin,OUTPUT);
    // Seta Pino 3 como saída.
    pinMode(dirPin,OUTPUT);
    // Seta Pino 4 como saída.
    pinMode(A0, INPUT_PULLUP);
    // Seta pino A0 como entrada analógica
    pinMode(dirButton, INPUT_PULLUP);
    // Seta pino 6 como entrada.
    Serial.begin(9600);
}

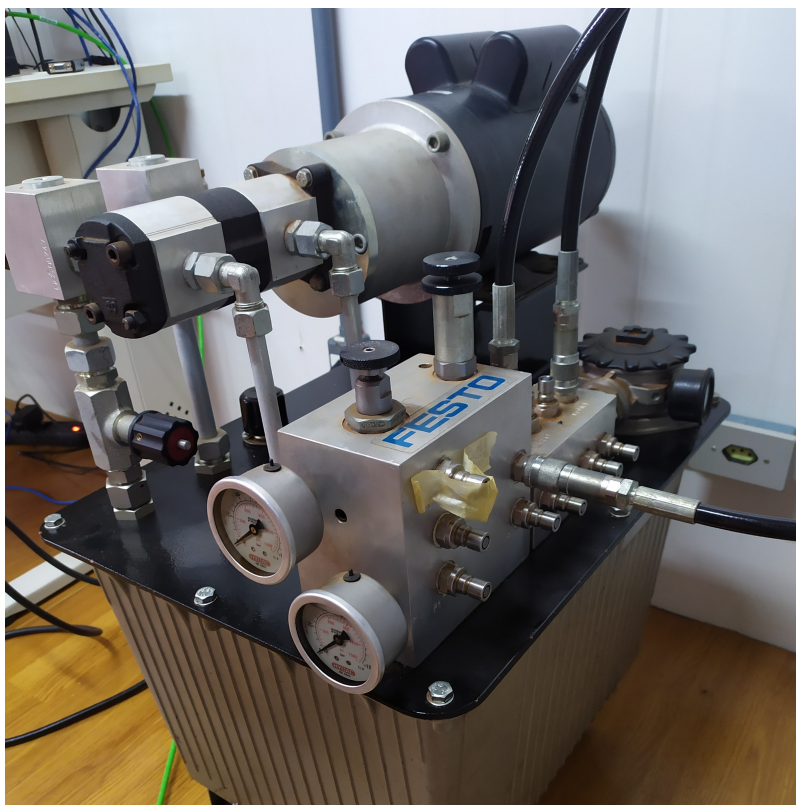
void loop() {
    buttonState = digitalRead(dirButton);
    direcao = digitalRead(dirPin);
    if (oldButtonState != buttonState && buttonState == LOW){
        digitalWrite(dirPin, !direcao);
    }
    oldButtonState = buttonState;
    delay(200);
    int leitura = digitalRead(botao);
    if(leitura == LOW ) {
```

```
    delay(10);
    if(digitalRead(botao)==leitura){
        executar = true;
    }
}
if(executar==true){
    executar=false;
    customDelayMapped = speedUp();
    for(int x = 0; x < 106; x++) {
        // A quantidade de passos dados a cada
        //vez que se aperta o botão.
        digitalWrite(stepPin,HIGH);
        delayMicroseconds(customDelayMapped);
        // delay controlado pelo potenciometro.
        digitalWrite(stepPin,LOW);
        delayMicroseconds(customDelayMapped);
        // delay controlado pelo potenciometro.
    }
    delay(500);
}
}
int speedUp() {
    //Código para ler a entrada analógica A0 e
    //transformá-la em um número de 275 a 15000.
    int customDelay = analogRead(A0); // leitura do
potenciometro
    int newCustom = map(customDelay, 0, 1023, 275, 15000);
    return newCustom;
}
```

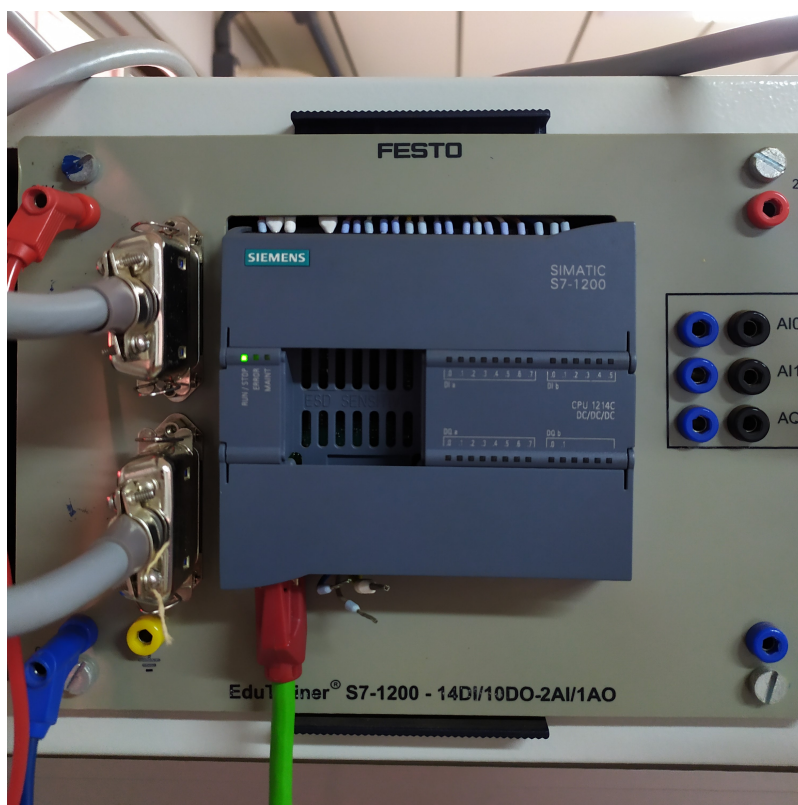
APÊNDICE C – Medidas e Impressão da Bancada de Testes Estáticos



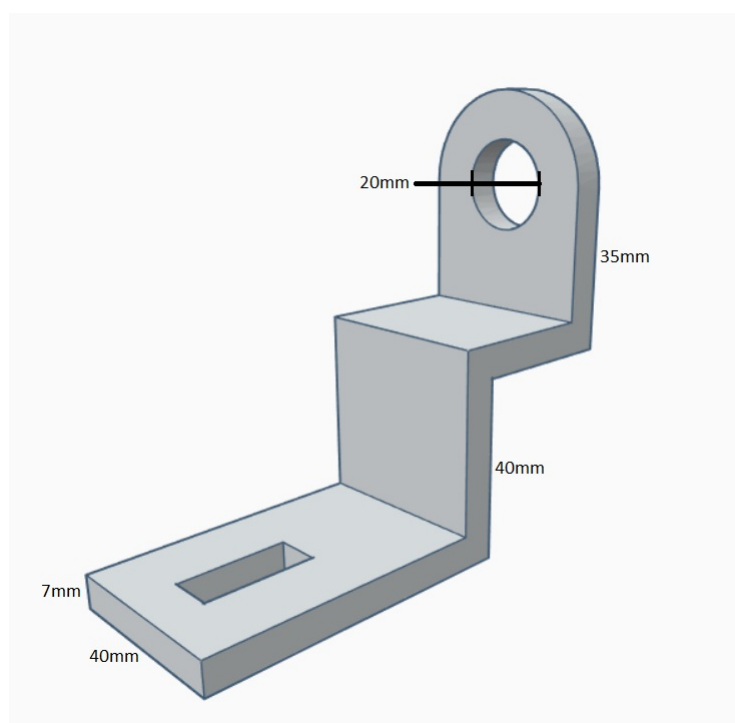
APÊNDICE D – Bancada Eletro-Hidráulica





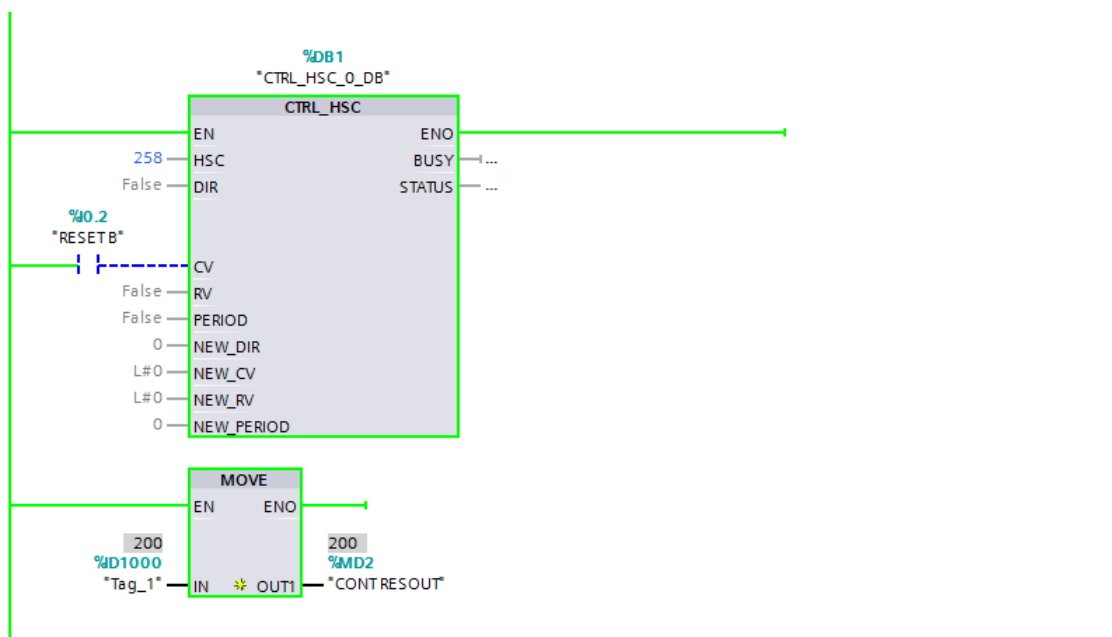


APÊNDICE E – Peça de Suporte para Ensaio Dinâmico

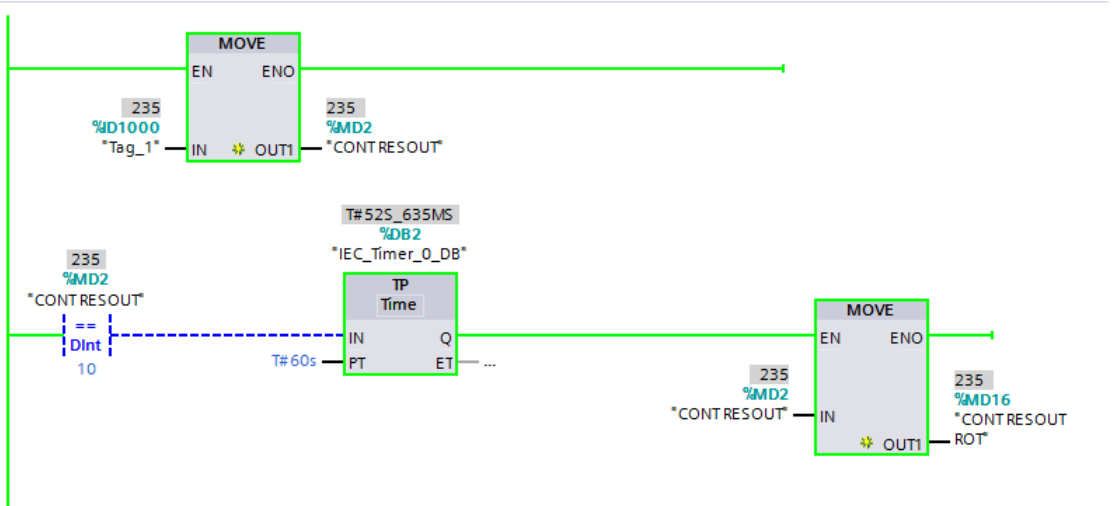


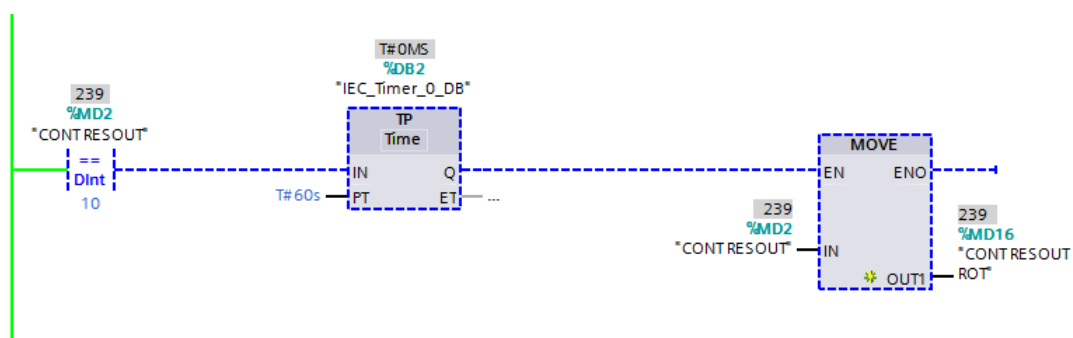
APÊNDICE F – Prgramação no Software TIA V12 Para Controle do CLP

Network 1: HSC

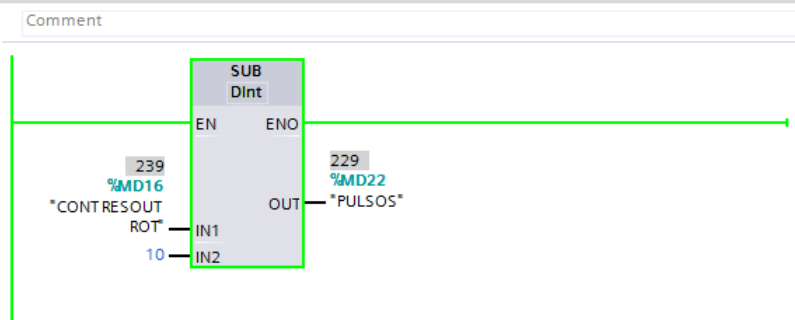


Network 2: Salva o Valor do Contador em uma Variável e Conta Quantos Pulsos Foram Dados em 60s





Network 3: Subtrai o Valor de pulsos pelo valor Inicial e Mostra o Resultado "Pulsos"



APÊNDICE G – Planilha de Cálculos para Teste Estático

Primeiro Ensaio - 107 passos a partir da origem					
dy	dyl	dyF	dx	dxF	dxl
0	31,6	31,6	4,31	19,36	15,05
0	31,6	31,6	4,29	19,35	15,06
0	31,6	31,6	4,33	19,38	15,05
0	31,6	31,6	4,33	19,38	15,05
0	31,6	31,6	4,28	19,34	15,06
0	31,6	31,6	4,31	19,36	15,05
0	31,6	31,6	4,30	19,35	15,05
0	31,6	31,6	4,30	19,36	15,06
0	31,6	31,6	4,30	19,37	15,07
0	31,6	31,6	4,29	19,35	15,06

Segundo Ensaio - 120 passos a partir da origem					
dy	dyl	dyF	dx	dxF	dxl
0,49	31,60	32,09	4,81	19,87	15,06
0,43	31,60	32,03	4,83	19,88	15,05
0,47	31,60	32,07	4,81	19,88	15,07
0,55	31,60	32,15	4,82	19,89	15,07
0,42	31,60	32,02	4,81	19,89	15,08
0,43	31,60	32,03	4,82	19,89	15,07
0,40	31,60	32,00	4,81	19,89	15,08
0,44	31,60	32,04	4,80	19,87	15,07
0,52	31,60	32,12	4,80	19,87	15,07
0,48	31,60	32,08	4,78	19,86	15,08

Terceiro Ensaio - 131 passos a partir da origem					
dy	dyl	dyF	dx	dxF	dxl
1,03	31,6	32,63	5,22	20,29	15,07
1,07	31,6	32,67	5,23	20,31	15,08
1,02	31,6	32,62	5,26	20,33	15,07
1,08	31,6	32,68	5,23	20,30	15,07
1,06	31,6	32,66	5,26	20,32	15,06
1,03	31,6	32,63	5,24	20,31	15,07
0,71	31,6	32,31	5,26	20,32	15,06
1,10	31,6	32,7	5,25	20,33	15,08
1,04	31,6	32,64	5,25	20,30	15,05
1,01	31,6	32,61	5,30	20,33	15,03

dx	
Minimo	4,28
Máximo	4,33
Media	4,304
Tamanho (n)	10
Desv Pad A	0,01646545

dxF	
Minimo	19,34
Maximo	19,38
Media	19,36
Tamanho (n)	10
Desv Pad A	0,013333333

dxl	
Minimo	15,05
Maximo	15,07
Media	15,06
Tamanho (n)	10
Desv Pad A	0,007

Balanço de Incertezas Combinadas para (dx)							
Grandeza	Desv Pad A	Distribuição	Incerteza Padrão	Coeficientes de Sensibilidade	Contribuição da Incerteza	u ²	Graus de Liberd
dxF - Repetições - Tipo A	0,01333333	Normal	0,00421637	1	0,00421637	1,77778E-05	9
dxF - Resolução - Tipo B	0,01	Retangular	0,002886751	1	0,002886751	8,33333E-06	∞
dxF - Repetitividade - Tipo B	0,01	Retangular	0,005773503	1	0,005773503	3,33333E-05	∞
dxF - Erro Aleatório - Tipo B	0,02	Retangular	0,011547005	1	0,011547005	0,000133333	∞
dxl - Repetições - Tipo A	0,00699206	Normal	0,002211083	1	0,002211083	4,88889E-06	9
dxl - Resolução - Tipo B	0,01	Retangular	0,002886751	1	0,002886751	8,33333E-06	∞
dxl - Repetitividade - Tipo B	0,01	Retangular	0,005773503	1	0,005773503	3,33333E-05	∞
dxl - Erro Aleatório - Tipo B	0,02	Retangular	0,011547005	1	0,011547005	0,000133333	∞

Resultado da Medição (dx)	4,30	±	0,04
---------------------------	------	---	------

RM+I	4,34	RM-I	4,27
------	------	------	------

Incerteza Padrão Combinada	0,019304576
Veff	3676,781087
K	2
Incerteza Expandida	0,038609153
Unidade	mm

dy	
Minimo	0
Máximo	0
Media	0
Tamanho (n)	10
Desv Pad A	0

dyF	
Minimo	31,6
Maximo	31,6
Media	31,6
Tamanho (n)	10
Desv Pad A	0

dyl	
Minimo	31,6
Maximo	31,6
Media	31,6
Tamanho (n)	10
Desv Pad A	0

Balanço de Incertezas Combinadas para (dy)							
Grandeza	Desv Pad A	Distribuição	Incerteza Padrão	Coefficientes de Sensibilidade	Contribuição da Incerteza	u ²	Graus de Liberdade
dxF - Repetições - Tipo A	0	Normal	0	1	0	0	9
dxF - Resolução - Tipo B	0,01	Retangular	0,002886751	1	0,002886751	8,33333E-06	∞
dxF - Repetitividade - Tipo B	0,01	Retangular	0,005773503	1	0,005773503	3,33333E-05	∞
dxF - Erro Aleatório - Tipo B	0,02	Retangular	0,011547005	1	0,011547005	0,000133333	∞
dyl - Repetições - Tipo A	0	Normal	0	1	0	0	9
dyl - Resolução - Tipo B	0,01	Retangular	0,002886751	1	0,002886751	8,33333E-06	∞
dyl - Repetitividade - Tipo B	0,01	Retangular	0,005773503	1	0,005773503	3,33333E-05	∞
dyl - Erro Aleatório - Tipo B	0,02	Retangular	0,011547005	1	0,011547005	0,000133333	∞

Incerteza Padrão Combinada	0,018708287
Veff	
K (t student)	2
Incerteza Expandida	0,037416574
Unidade	mm

Resultado da Medição (dy)	0,00	±	0,04
---------------------------	------	---	------

RM+I	0,04	RM-I	-0,04
------	------	------	-------