

## **PROJETO CONCEITUAL DE UMA BANCADA UTILIZADA NA CALIBRAÇÃO DE MANÔMETROS E VÁLVULAS DE SEGURANÇA**

**Hiago König Benedet <sup>1</sup>**

**Richard de Medeiros Castro <sup>2</sup>**

**Resumo:** Calibração é a operação que estabelece uma relação entre o equipamento com os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver o projeto conceitual para a estruturação de uma bancada de calibração de manômetros e válvulas de segurança por comparação. As etapas do projeto foram construídas através dos conceitos da Matriz Indicadora de Módulos (MIM). A metodologia compara os principais componentes e métodos disponíveis no mercado e seleciona o mais adequado, para que atenda o melhor desempenho de projeto e atenuar as incertezas do processo de calibração. Por meio da análise individual de cada componente do projeto (representado na matriz por modelo), bem como suas características e justificativas de seleção, realizou-se o contraste com a metodologia MIM. Dentre os quatro modelos apresentados, o modelo B destacou-se, com 31,06 % de aprovação. Posto em comparação com os demais modelos, atingiu no total 08 relações fortes, 03 relações médias e uma relação fraca, com somatório de 50 pontos. Isto significa, que, diante dos requisitos propostos, o modelo B mostrou maior afinidade ao projeto, logo, os componentes deste grupo estão adequados aos conceitos da bancada. Diante a pesquisa, a matriz MIM mostrou-se eficaz e apresentou-se como uma importante ferramenta para o estudo de projetos conceituais, pois através da projeção de resultados combinados, permite uma avaliação prévia do projeto, com base nos conceitos mecânicos, elétricos e computacionais exigidos.

**Palavras-Chave:** Pressão. Metrologia. Calibração. Incertezas. Matriz Indicadora de Módulos

### **1 INTRODUÇÃO**

Calibração é a operação que estabelece, sob condições específicas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e em uma segunda etapa, esta informação é utilizada para estabelecer uma relação visando a obtenção do resultado a partir da indicação (Albertazzi e Sousa, 2018).

Para a calibração de dispositivos de medição de pressão, tais como manômetros e válvulas, o método mais usual é de comparação direta, através de um simulador de pressão, onde aplica-se o princípio da Lei de Pascal. Na bancada do

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2021-2. E-mail: hiago.benedet@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: richard.castro@satc.edu.br

simulador, composta por uma base retangular, são distribuídos um êmbolo, para a aplicação da força axial, um reservatório isolado para armazenamento do fluido de trabalho e duas saídas de pressão de mesma área. Em uma destas, conecta-se o equipamento padrão (manômetro já calibrado) e na outra, o equipamento a ser calibrado (válvula de pressão ou manômetro).

Diante desta metodologia, etapas do procedimento apresentam pontos negativos. O torque, aplicado ao fuso que permite o avanço e retorno do êmbolo, é manual e não linear. Isso proporciona velocidade variável e imprecisa, o qual proporciona escoamento não-linear e imprecisão na leitura do equipamento. Em sequência, devido a diferentes faixas de pressão, há um número elevado de padrões. Neste contexto, a frequente substituição dos mesmos para cada serviço, oferece desgaste e danos dos componentes de conexão, além do mais, há elevado custo periódico de calibração do padrão, devido a quantidade. Por fim, as coletas de dados apuradas durante a calibração, são capturadas a olho nu e transcritas manualmente para outro meio (software, papel), o que aumenta o risco de interpretação equivocada e preenchimentos incoerentes, devido ao erro de paralaxe e imprecisão do ponteiro na escala de leitura. Todos os pontos, interferem diretamente ao fator essencial na tomada de decisões da metrologia: A incerteza de medição.

O desenvolvimento da pesquisa baseia-se em três pilares: confiabilidade dos resultados, agilidade e economia. Para que haja confiabilidade dos valores expressos, deve-se apresentar um sistema nivelado (distribuição de pressão, coleta de dados e calibração de padrão), para que se reduza as incertezas de medição. A incerteza de medição é uma ferramenta valiosa para o laboratório, no sentido de possibilitar a identificação dos fatores que mais influenciam no resultado da calibração (DA JORNADA, 2009, p.25). Por outro lado, a agilidade caminha com a economia. Por isso, torna-se importante automatizar os processos e substituir equipamentos obsoletos. Muitas empresas têm alterado suas rotinas organizacionais para seguirem um modelo de negócio gerenciado por processos que possam ser automatizados, aumentando, assim, a agilidade e o controle de atividades e reduzindo custos. (MANZUETO, 2016, p. 5).

Dentre metodologias de gestão de projetos, destaca-se sobre o projeto conceitual a Matriz Indicadora de Módulos (MIM). Erixon et al. (1996) e Rozenfeld et al. (2007) destacam que esta matriz indica quais as funções que apresentam maior

vocação para formação de módulos e quais devem ser agrupados, formando um novo módulo. Essa ferramenta se baseia em diretrizes relacionadas às razões pelas quais um produto deveria ser modularizado.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um projeto conceitual para a estruturação de uma bancada de calibração de manômetros e válvulas de segurança, pelo método de comparação. As etapas do projeto foram construídas através dos conceitos da Matriz Indicadora de Módulos (MIM), de desenvolvimento de produtos. A metodologia compara os principais componentes e métodos disponíveis no mercado e seleciona o mais adequado, a fim de automatizar o sistema e atenuar as incerteza do processo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 VARIÁVEIS DE INCERTEZA**

#### **2.1.1 Definição para incertezas de medição**

As incertezas de medição são componentes metrológicos, embora que considerados atuais para metrologia e critérios de calibração, essenciais para definição de um ponto mensurado, bem como quais decisões tomar com um grupo de dados conhecido. A palavra “incerteza” significa dúvida, e assim, no sentido mais amplo, “incerteza de medição” significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição. (ISO GUM, 2008)

A indústria de fabricação mecânica, de um modo geral, utiliza a relação existente entre a incerteza do equipamento de medição e o intervalo de tolerância de fabricação para decidir se determinado equipamento está apto ou não para avaliar a conformidade de determinada característica do produto. (LISKA, 1999 *apud* INCERPI, 2008).

#### **2.1.2 Parâmetros de Incertezas de Medição**

Dentre as principais fontes de incerteza, têm-se como destaque a incerteza herdada do padrão e do erro de resolução. A resolução do equipamento é definida como valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência, ou seja, a

leitura de uma escala. (CABRAL, 2004).

Cabral (2004) salienta que a incerteza herdada do padrão, muitas vezes, pela qualidade e substituição frequente de equipamentos referenciais, denominados padrão de comparação, surgem como fator destaque no banco de incertezas consideráveis. O valor utilizado para o cálculo localiza-se no certificado de calibração.

Dois fatores de extrema significância que precisam ser analisados juntamente com a incerteza de medição é a repetibilidade e repetitividade. O resultado destes dois termos mostram o quão eficaz é o método de calibração, a funcionalidade do padrão posto em comparação e instrução de quem a executa.

A repetitividade consiste em definir um ponto mensurado e repetir a medição do mesmo mais de uma vez. Já a reprodutibilidade refere-se à precisão de um método efetuado em condições de ensaio diferentes, utilizando o mesmo método de ensaio, sobre uma mesma amostra. (MOREIRAS, 2005).

## 2.2 MÉTODOS DE CONFIABILIDADE COM SENSORES

### 2.2.1 Aplicação de Sensores na Calibração

É cada vez maior a quantidade de trabalhos científicos que estudam formas viáveis de tornar os processos cada vez mais eficientes, agregando a estes processos tecnologias inovadoras ou consolidando de forma pragmáticas já existentes.

Cada uma das variáveis existentes possui diversas formas de serem inferidas, a partir de princípios físicos e matemáticos. O instrumento utilizado como objeto para a leitura destas variáveis, em sua forma mais primária, é o sensor. (ALMEIDA, 2009)

Os sensores, por sua vez, permitem a transferência de dados de um meio físico, palpável, para um meio virtual, no qual através de softwares específicos, se faz a compilação dos dados de aquisição para definições ou tomadas de decisão.

### 2.2.2 Aplicação de Transdutores de pressão

Os transdutores ou transmissores de pressão, são sensores que utilizam elementos de transferência que convertem o sinal de pressão detectado em sinal

elétrico padronizado de 4 a 20 mA.

TEIXEIRA e COELHO (2005) destacam em seu trabalho sobre Desenvolvimento e Calibração De Um Tensiômetro Eletrônico De Leitura Automática que, o transdutor de pressão, vem sendo usado acoplado a tensiômetros para monitorar a umidade no solo em campo e em laboratório. Os medidores eletrônicos substituem os medidores do tipo manômetro de mercúrio, Bourdon e vacuômetro, o que possibilita a coleta automática de dados por meio da utilização de computador. Apresentaram conclusões satisfatórias pela automação e uso do transdutor de pressão.

SILVA (2019) salienta no resultado do trabalho Implementação De Sensores Digitais Na Coleta De Gases Em Fontes Estacionárias, que as medições feitas pelo protótipo evidenciam que os sensores digitais podem assumir o lugar dos sensores analógico existentes no equipamento assim constando que o custo benefício do uso dos sensores digitais é maior que os sensores analógicos, assim havendo um aquisição de dados do sensores por um computador ou até mesmo um armazenamento ou memória móvel como um cartão de memória.

## 2.3. APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

### 2.3.1 Instrumentação Virtual

O registro de dados de forma automática possibilita, entre outras vantagens, a eliminação de erros humanos na leitura dos sensores, erros de digitação, perdas de dados, sincronismo da leitura entre vários instrumentos e frequência de leitura com intervalos precisos.

O computador pode ser usado na coleta, armazenamento, processamento e transmissão dos dados. A vantagem do uso de computadores é que os dados obtidos podem ser trabalhados em diversos aplicativos comerciais, tais como planilhas eletrônicas e programas gráficos (Gomide, 1998 *apud* Botrel *et al*, 2006, p. 493)

Nos últimos anos observa-se um forte crescimento nas aplicações baseadas em visão computacional. Este aumento tem sido influenciado pelos baixos custos de desenvolvimento e dos equipamentos para a implementação de sistemas complexos e robustos (ARAÚJO; KIM, 2011 *apud* BELAN, 2012).

FRACASSO, SILVA, SELVATICI (2010) propuseram o desenvolvimento de uma bancada automatizada e instrumentada, com o intuito de calibrar hidrômetros, onde a leitura usual do equipamento, bem como seus dígitos e as posições dos ponteiros são detectados por um sistema de visão computacional.

HEMMING e LEHTO (2002) aplicaram um sistema de coleta de imagens, transcritas ao software de leitura, para a calibração de instrumentos analógicos, com ponteiro. Para destacar a posição do ponteiro, utilizaram-se a diferença entre duas imagens: a primeira, do ponteiro no estado primário, a segunda, o ponteiro em sua nova posição. Este delta representa a distância percorrida pelo ponteiro. Este feito pois gerou a redução do erro de leitura e transcrição de dados.

### **2.3.2 Software LabView®**

Na dissertação Aplicações de Instrumentação Virtual em Metrologia e Qualidade (2012), Henrique Nunes destaca a importância de selecionar o software LabView® para instrumentação de processos de calibração e o indica “O sistema de desenvolvimento LabView® é uma peça integral da instrumentação virtual uma vez que permite interligar rapidamente, e sem muito esforço, vários equipamentos a uma central de elevada capacidade de processamento, comumente designada por computador pessoal”.

Além disso, a forma intuitiva de apresentação de dados feita pelo LabView cria semelhança entre diagramas de fluxo, muito utilizados em engenharia, a qual permite mais rápida familiarização por parte do programador/utilizador (National Instruments, 2009 *apud* Nunes, 2012, p.11)

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1. CONCEITOS MECÂNICOS**

#### **3.1.1 Seleção da Bancada**

Por se tratar de um *projeto conceitual*, aplicado diretamente a um projeto já existente (Fig.1), sua ampliação e personalização mantiveram a originalidade do

equipamento, sem exclusões e remoções significativas de itens que o compõe. A ideia norteadora trata-se de adicionar componentes complementares que apresente confiabilidade dos resultados, agilidade e economia.

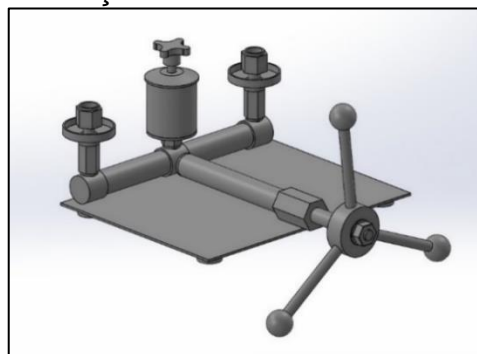
Como parâmetro inicial, precisou atender o método de calibração por meio da Lei de Pascal. Foram selecionados para comparação, eventualmente, quatro modelos distintos disponíveis no mercado. Os aspectos preliminares da capacidade do equipamento: Capacidade máxima de pressão desejada (1000 bar), fluido de trabalho (óleo ou água), base de composição metálica e peso mínimo do conjunto.

### 3.1.2 Desenho da bancada selecionada

Com a definição e aquisição do modelo de bancada, foram apontadas as dimensões de todos os componentes presentes no sistema calibrador. Mensuraram-se 23 peças, com o auxílio de um paquímetro *Mitutoyo* digital, faixa de medição 0 a 200 mm e resolução de 0,01 mm. Para as peças menores, utilizou-se um micrômetro *Mitutoyo* digital, faixa de medição 0 a 25 mm e resolução, de 0,001 mm.

Com o intuito de complementar as futuras etapas metodológicas, foi desenvolvido através do software *SolidWorks®*, um protótipo com as dimensões reais da bancada selecionada. O modelo pode ser apresentado através da Fig. 1.

Figura 1: Representação tridimensional da bancada calibradora



Fonte: Do Autor (2021)

### 3.1.3 Teste de Torque

O projeto conceitual exige o estudo teórico dos componentes de aplicação, diretamente simulados através da afinidade de suas características com os requisitos do projeto. O esforço máximo ( $F_{m\acute{a}x}$ ) na bancada foi obtido através de testes

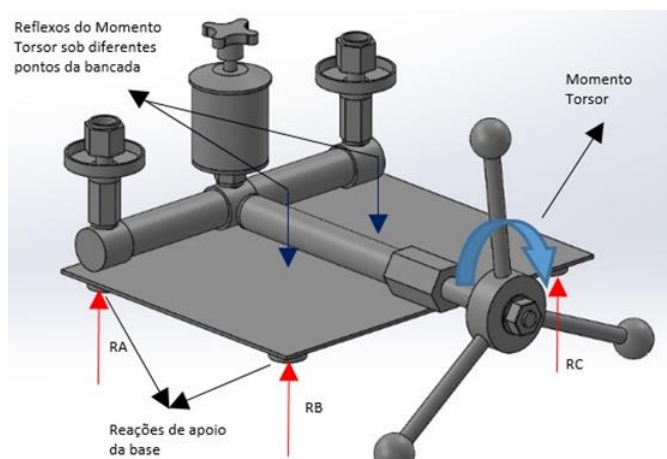
experimentais com o uso de um torquímetro. No ensaio, foram conectados dois manômetros padrão: de um lado, um manômetro *Salcas Digital*, faixa de medição 0 a 1000 bar e resolução de 0,1 bar e do outro, um manômetro *Bimetal* analógico, faixa de medição 0 a 588,4 bar e resolução de 1,96 bar, ambos calibrados.

Por meio de um torquímetro de vareta *Indestro*, faixa de medição de 0 a 150 Nm e resolução de 5 Nm, acoplou-se um soquete sextavado cachimbo, de dimensão  $\frac{3}{4}$ ", na porca central do fuso e executou-se o ensaio. Foram definidos, entre 100 e 500 bar, seis pontos de medição, no avanço e retorno do fuso. Os dados foram coletados, e gerado um gráfico Torque x Pressão. O ensaio foi realizado nas condições de 22 °C de temperatura e 65 % de umidade relativa do ar.

### 3.1.4 Cálculo das Forças Atuantes na Bancada

As forças estudadas contemplam as reações de apoio da bancada, divididas em: RA, RB, RC e RD e as forças de ação sobre a superfície, provocadas pelo reflexo do momento torsor, são representadas pela Fig. 2. O diagrama foi modelado a partir dos conceitos fundamentais de estática e equilíbrio de corpos rígidos. O torque e suas variáveis, foram considerados através da Eq. 1, na hipótese crítica do sistema (êmbolo totalmente retornado, com 305 mm do centro da base)

Figura 2: Representação das forças atuantes sobre a bancada calibradora



Fonte: Do Autor (2021)

Conforme as idéias de Hibbeler, o momento fornece uma medida da tendência de uma força, de provocar rotação de um corpo em torno do próprio eixo. A



intensidade do momento, é dada através da Eq. 1:

$$T = F_{m\acute{a}x}d \quad (1)$$

Onde:

$T$  = Torque (Nm);

$F_{m\acute{a}x}$  = Força resultante (N);

$d$  = Distância da força aplicada ao eixo de rotação (m);

De acordo com Hallack *et al* (2012), em um eixo de transmissão de potência, o trabalho executado pelo momento tursor  $T$ , constante, é dada por:

$$dW = Td\varphi$$

onde  $\varphi$  é o deslocamento angular, em radianos.

## 3.2. CONCEITOS ELÉTRICOS

### 3.2.1 Definição do motor e redutor

Com o objetivo de proporcionar maior segurança e precisão, definiu-se como padrão o uso de equipamentos em corrente contínua. Dentre os modelos de motores de corrente contínua, optou-se por utilizar um motor de passo

Segundo Ribeiro e Malagutti (2020), O motor de passo não possui escovas (maior fonte de problemas nos motores), mantém o torque estacionário e velocidade constante, independentemente da carga em que se aplica ao seu eixo e tem uma resposta precisa, tanto na partida, quando na parada. Estes modelos são altamente empregados em instrumentações de bancadas que exigem baixa vibração e ruído.

## 3.2. CONCEITOS COMPUTACIONAIS

Como forma de unir os dados fornecidos pelo sistema mecânico com o meio virtual, o uso de placas de aquisição de sinais facilitam a obtenção do

comportamento numérico dos sinais de sensores e transdutores de pressão. Foi necessário um software de aplicação, a fim de modelar e interpretar os dados para validação dos comportamentos: o LabVIEW®

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, adotou-se o método de projeto conceitual para a apresentação dos resultados. Com base nesse conceito, destacam-se diferentes tipos de equipamentos disponíveis no mercado, e associa-se com os requisitos pré-estabelecidos pelo sistema, com a finalidade de gerar uma tabela final, de ordem Indicadora de Matriz (MIM).

De acordo com Ferreira (1997), o projeto conceitual é a fase do processo de projeto que gera, a partir de uma necessidade detectada e esclarecida, uma concepção para um produto que atenda da melhor maneira possível esta necessidade, sujeita às limitações de recursos e às restrições de projeto.

### 4.1. RESULTADOS DOS CONCEITOS MECÂNICOS

#### 4.1.1 Seleção da Bancada

Esta etapa será responsável pela definição da bancada de calibração, no qual serão realizadas as alterações para o projeto. De acordo com as características enaltecidas pelo estudo, selecionaram-se quatro bancadas disponíveis no mercado, postas em comparação. A Tab. 1 detalha os modelos disponíveis e os requisitos estabelecidos para a seleção.

Tabela 1: Requisitos comparativos com os modelos das bombas calibradoras

Modelo	Princípio de Funcionamento	Pressão máxima de trabalho (bar)	Fluido de trabalho	Material da Base	Peso do conjunto (kg)	Condição
A	Pascal	980	Água	Metálica	11	Não Atende
B	Pascal	1176,8	Água/Óleo	Metálica	8	Atende
C	Pascal	800	Água/Óleo	Madeira	6	Não Atende
D	Pascal	700	Água/Óleo	Metálica	5	Não Atende

Fonte: Do Autor (2021)

Dentre os modelos disponíveis, somente o modelo B atendeu o critério de seleção: Princípio de funcionamento de Pascal, pressão máxima de trabalho maior ou igual a 1000 bar, fluido de trabalho como água ou óleo e base metálica. Além da pressão de trabalho como critério dominante de seleção, houve a importância de analisar o fluido de trabalho. Selecionaram-se água e óleo, com base na literatura e conceitos de Païdouss e Issid.

Païdouss e Issid (1974) *apud* Parada (2013) afirmam que a medida em que a velocidade do fluido aumenta em um sistema, o tubo é submetido a um amortecimento induzido pela força de Coriolis, a uma certa velocidade crítica de escoamento. Este amortecimento decresce, tornando-se negativo e, quando o fluxo atinge uma velocidade suficientemente alta, excede as forças reestabilizadoras do sistema dando origem a oscilações amplificadas. A fluidez do óleo e da água, permitem o escoamento linear e preenchimento total do tubo.

#### 4.1.2 Teste de Torque

Esta etapa apresenta os esforços máximos aplicáveis sobre a bancada de trabalho, durante o avanço e retorno do fuso. A Tab. 2 representa os valores de pressão aplicados e respectivamente, o torque. Os valores coletados foram baseados no avanço e retorno do fuso central.

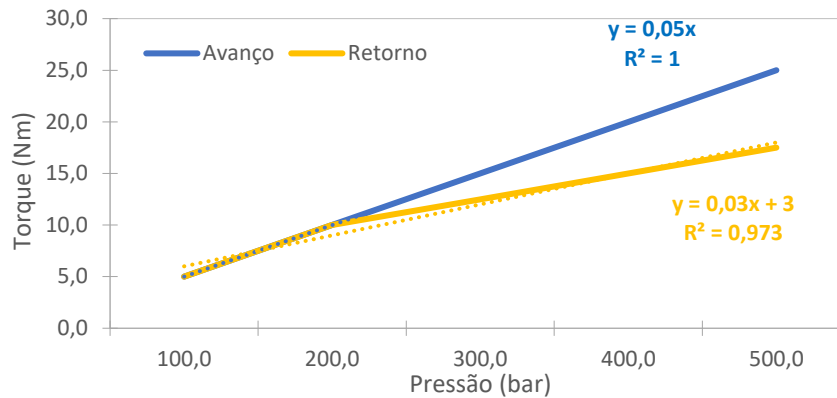
Tabela 2: Pressões e respostas ao torque

Pressão Aplicada (bar)	Torque (Nm)	
	Avanço	Retorno
100,0	5,0	5,0
200,0	10,0	10,0
300,0	15,0	12,5
400,0	20,0	15,0
500,0	25,0	17,5

Fonte: Do Autor (2021)

Através da Fig. 3, percebe-se que, conforme a pressão aumenta, o torque apresenta comportamento linear. Com o intuito de simular a pressão desejada (1000 bar), analisou-se a hipótese crítica disponível (maior torque na máxima pressão aplicada), detalhada pelo “avanço do fuso” e utilizou-se a Eq. da reta, para o torque máximo do sistema.

Figura 3: Teste de torque no avanço e retorno do fuso



Fonte: Do Autor (2021)

Segundo as ideias de Nascimento (2015), esta simulação é possível, pois ao possuir dois pontos distintos, existe uma única reta que passa pelos dois pontos, que possui a mesma declividade. Se houverem mais pontos amostrais que interceptem a reta, a equação torna-se confiavelmente linear e precisa, podendo assumir os pontos sequenciais através da equação  $y = ax + b$ . A Eq. 2 representa o desenvolvimento da simulação numérica. Se há torque, há uma força atuante sobre uma base qualquer.

$$y = 0,05x \quad (2)$$

Onde:

$y$  = Torque necessário em determinada pressão (Nm);

$x$  = Pressão aplicada de teste (bar);

Logo, têm-se como pressão de trabalho máxima igual a 1000 bar. Então:

$$y = 0,05 * 1000$$

$$y = 50 \text{ N.m}$$

Conclui-se que, o torque máximo do sistema equivale a 50 Nm.

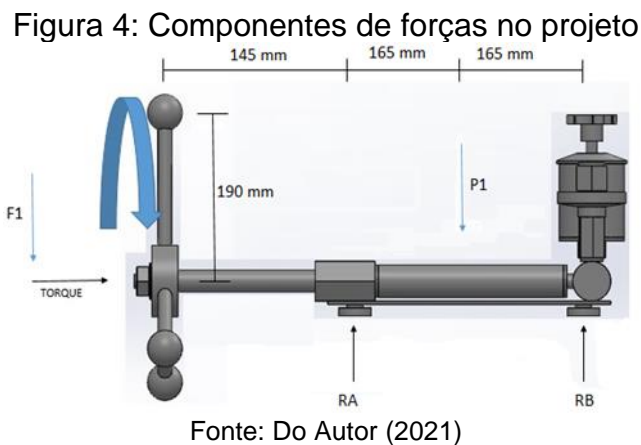
#### 4.1.3 Forças atuantes no Projeto

Nesta etapa, o detalhamento das forças será utilizado para o dimensionamento da estrutura suporte da bancada e a análise de instabilidade da

plataforma. As componentes estão detalhadas na Fig. 4.

Halliday e Resnick (2012) salientam que o torque a capacidade de uma força  $F$  de fazer um corpo girar depende do módulo da componente tangencial  $F_t$  e também da distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação. Adota-se a hipótese crítica de força vertical, sob o ponto fundamental para a rotação do conjunto.

Para Beer e Johnston (2010), problemas que tratam do equilíbrio de estruturas feitas de várias partes unidas, as forças internas, assim como as forças externas devem ser determinadas. Após a definição destas, por se tratar de um estudo estático, determina-se um somatório de momentos do ponto em que deseja-se determinar o equilíbrio, e iguala-se a zero, com o estudo das demais forças atuando sobre tal.



Através da Eq. 1, e interpretação da Fig. 4, têm-se:

$$T = F1 * d$$

Sabe-se que  $M = 50 \text{ Nm}$  e  $d = 190 \text{ mm}$  ( $0,19 \text{ m}$ ):

$$T = F1 * d$$

$$F1 = \frac{T}{d}$$

$$F1 = \frac{50}{0,19}$$

$$F1 = 263,16 \text{ N}$$

Com as componentes  $F1 = 263,16 \text{ N}$ , e  $P1 = 80 \text{ N}$ , encontram-se os valores das variáveis  $RA$ ,  $RB$ ,  $RC$  e  $RD$ .

$$\Sigma MRA = 0$$

$$\Sigma MRA = (F1 * 0,145) + (RB * 0,33) - (P1 * 0,165)$$

$$MRA = (263,16 * 0,145) + (RB * 0,33) - (80 * 0,165)$$

$$\mathbf{RB = -75,63 \text{ N}}$$

Após encontrar  $RB$ , dispõe-se da Eq. para  $RA$ :

$$\Sigma MRB = 0$$

$$\Sigma MRB = (P1 * 0,165) + (F1 * 0,475) - (RA * 0,33)$$

$$(RA * 0,33) = (80 * 0,165) + (263,16 * 0,475)$$

$$\mathbf{RA = 418,79 \text{ N}}$$

Como a componente  $RB$  divide os esforços com  $RC$ , e  $RA$  com  $RD$ , por serem simétricos, têm-se  $RA = RD = 209,4 \text{ N}$  e,  $RB=RC = -37,82 \text{ N}$ .

Os vetores que representam as reações de apoio no diagrama de corpo livre (Fig. 4), foram inicialmente representados com direção vertical e sentido para cima. Por meio dos cálculos,  $RB$  e  $RC$  apresentaram valores negativos. Isso significa que, a representação real do esforço, quando aplicado a força máxima responsável pelo torque, terá sentido oposto ao representado. Esta condição afirma que haverá tombamento da base.

#### **4.1.4 Seleção do Motor e Redutor**

Os motores são utilizados para a transmissão de movimento do sistema. Os requisitos positivos do motor de passo permitirão a atenuação de avanços não lineares, conciliados com o torque requisitado. Conforme a necessidade de torque de  $50 \text{ Nm}$ , foram apresentados 03 tipos de motores. Entre os modelos disponíveis no mercado, foram evidenciados os modelos NEMA 34, por apresentarem maior torque nominal. Já, para a redução, foram destacados dois modelos de redutores planetários: 4:1, com torque máximo de  $50 \text{ Nm}$  e 10:1, com torque máximo de  $80 \text{ Nm}$ . A comparação entre os modelos pode ser observada através da Tab. 3.

Camargo (2007) destaca que os motores de passo conquistaram tanto espaço devido ao seu baixo custo em detrimento dessa precisão de posicionamento e sua boa interface com sistemas digitais, que fazem o seu acionamento. No entanto, por não existirem motores com torque relativamente altos, há a importância de selecionar o torque nominal do motor maior que o necessário, devido à presença e atritos, desgastes ou superdimensionamento de carga. Quando necessário, aplicam-se redutores que permitem a diminuição da velocidade e aumento de torque.

Roque (2010), expõe que há importância no controle da velocidade do motor de passo, pois apresenta desvantagem em relação a esta grandeza: efeito de ressonância. Quando o motor atinge a frequência natural característica, resulta no aumento de ruído e vibração, podendo perder passos ou oscilar. Assim, é importante saber os limites de operação do motor aplicado ao projeto.

Tabela 3: Comparação entre modelos de motores NEMA 34 e redutores

Modelo tipo NEMA 34	Torque sem Redutor (Nm)	Torque com Redutor (Nm)	
		4:1	10:1
65 kgf.cm	6,5	26	65
85 kgf.cm	8,5	34	85
120 kgf.cm	12	48	120

Fonte: Do Autor (2021)

Ao analisar o motor de torque nominal 6,5 Nm, observa-se que, ao interligar seu eixo com o redutor de 10:1, fornece um torque de 65 Nm. No entanto, o sistema pode sofrer desgaste, falta de lubrificação e atritos internos imensuráveis e fazer com que o torque do motor não seja suficiente.

Para o motor com 12 N, ao interligar com o redutor de 10:1, entrega um torque de 120 Nm. No entanto, o valor máximo fornecido pelo redutor 10:1, independentemente do torque inicial, será de 80 Nm. Desta forma, seria desnecessário um torque de entrada tão elevado.

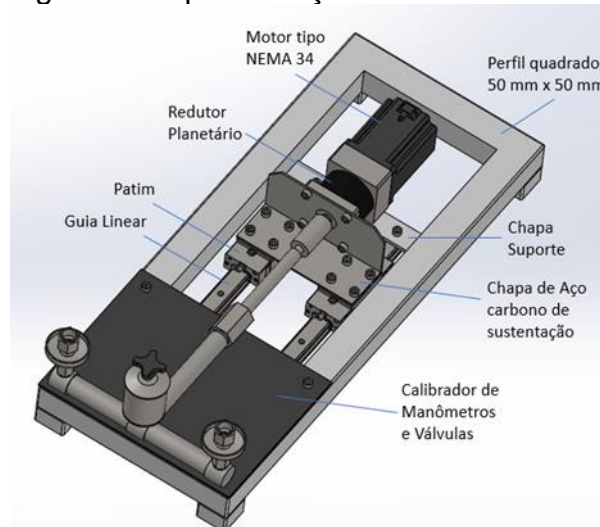
Se o torque necessário para 1000 bar, equivale a 50 Nm, o motor NEMA 34, com torque de entrada 8,5 Nm e aplicação do redutor 10:1, atende os requisitos paramétricos do estudo, com sobra para eventuais avarias do sistema. O motor possui o peso de 3,2 kg e o redutor planetário tem o peso de 2,4 kg. Utilizou-se a ligação em série, a fim de apresentar corrente de 2,5 A por bobina.

#### 4.1.5 Nova proposta de Design da bancada

Afim de eliminar o tombamento da bancada e propor robustez para a fixação dos novos componentes selecionados, com o auxílio do software *Solidworks®*, foi desenvolvido um protótipo da nova estrutura da bancada. A Fig. 5 representa o protótipo da bancada com os componentes.

O suporte da bancada e dos demais componentes é formado por um perfil quadrado, de aço carbono, galvanizado, devido à alta resistência ao desgaste, boa soldabilidade e leveza, com dimensões 50 mm x 50 mm e altura total de 80 mm. O conjunto motor + redutor está fixo em uma base de aço carbono, com peso de 2,6 kg, fixa por 04 parafusos Allen cabeça cilíndrica em cada patim. O sistema de transmissão ocorre com guias lineares e patins de movimentação. A altura final do sistema conta com 247 mm, e comprimento total de 800 mm.

Figura 5: Representação da nova bancada



Fonte: Do Autor (2021)

Neste primeiro momento do projeto conceitual, em que o objetivo principal envolve a automação do sistema calibrador e a redução de incertezas de calibração, não foram levados em consideração os cálculos das propriedades mecânicas, diâmetro, espessura e comprimento dos perfis e parafusos do projeto. No entanto, por realizar transmissão de movimento com presença de carga, através de guias lineares, houve a importância de definir os parâmetros para seleção dos mesmos.

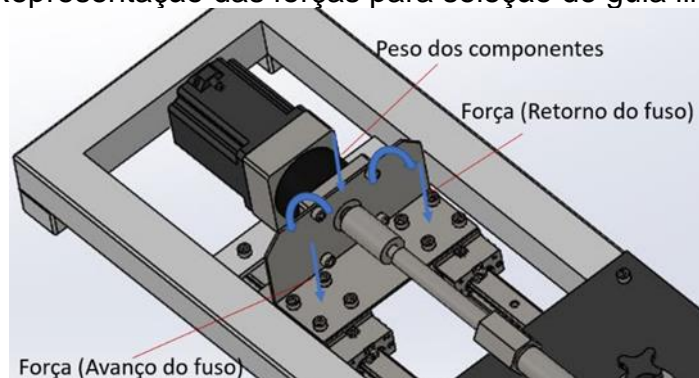


#### 4.1.6 Cálculo Estrutural para o Guia Linear e Patim

A estrutura do guia linear e o patim serão responsáveis por sustentar o motor e o redutor selecionados, bem como realizar o avanço e retorno do fuso do sistema. Como base de cálculo e seleção dos componentes, baseou-se através do catálogo *NSK Guias Lineares Série NH Série NS*. Foram postos em evidência como critério de seleção o fator de caga e capacidade de carga estática e dinâmica. Dentre os esforços do diagrama, tomou-se como pior hipótese, a força durante o torque (avanço e retorno) e o peso dos componentes. A Fig. 6 detalha as forças no sistema.

Sabe-se que, as forças de avanço e retorno não ocorrem simultaneamente, no entanto, de acordo com o giro (horário ou anti-horário), um dos lados do sistema sofrerá mais que o outro, devido ao esforço direto. Desta forma, considerou-se a força que gera o torque duas vezes (condição crítica). A Tab.4 representa as massas e pesos dos componentes sobre os patins e guias.

Figura 6: Representação das forças para seleção do guia linear e patim



Fonte: Do Autor (2021)

Tabela 4: Esforços contidos sob o patim e o guia linear

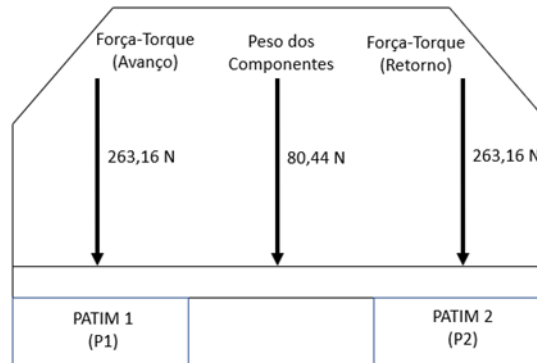
Componente	Massa (kg)	Peso (N)
Motor	3,20	31,39
Redutor	2,40	23,54
Chapa	2,60	25,51
<b>Soma</b>	<b>8,20</b>	<b>80,44</b>

Fonte: Do Autor (2021)

Ao possuir um único vetor que represente o peso dos equipamentos no centro da chapa de apoio, dividiu-se por dois, devido a distribuição ser simétrica e possuir dois patins. Logo, o vetor representa 40,221 N.

Com o conhecimento da força que gera o torque (263,16 N), ao aplicar o somatório das forças (40,221 + 263,16), encontra-se um esforço de  $P1=P2=303,381$  N por patim. A Fig. 7 representa o diagrama de forças do conjunto.

Figura 7: Diagrama de forças no conjunto de transmissão



Fonte: Do Autor (2021)

As cargas sobre os patins, as quais são determinadas através dos cálculos e do fator de carga, tornam-se maiores devido a efeitos mecânicos como vibração ou impacto. Como o sistema permanecerá lubrificado e o ambiente de execução da calibração é devidamente controlado, selecionou-se o fator de carga de *Uso Normal*, de 1,2, disponível no catálogo.

Conforme Bampi (2016), para determinações específicas de guias lineares e patins, deve-se determinar os deslocamentos que ocorrem no sistema devido às forças aplicadas nesta mesma interface. Utiliza-se o método das forças unitárias, considerando-se a hipótese de pequenos deslocamentos, requisito fundamental no projeto de máquinas ferramentas. A vantagem da aplicação do método das forças unitárias é que o deslocamento causado por uma força unitária é por definição a flexibilidade na direção do deslocamento causada por esta força. Após a seleção das forças, definem-se a capacidade estática e dinâmica de carga. É necessário a seleção dos trilhos e patins, com valores superiores as cargas calculadas.

Para os demais parâmetros, considerou-se o comprimento do trilho de 480 mm, tempo de vida requerido de 30.000 horas e velocidade de 0,75 m/min, determinou-se a capacidade estática e dinâmica de carga, dadas pelas equações 3 e 4, respectivamente.

$$F_a = P1 * f_w \quad (3)$$

Onde:

$Fa$  = Capacidade Estática de Carga (kgf);

$P1$  = Força em cada patim (kgf)

$fw$  = Fator de carga;

$$Ca = \sqrt[3]{\frac{Lh \cdot 60 \cdot v}{50 \cdot 10^3}} * Fa \quad (4)$$

Onde:

$Ca$  = Capacidade Dinâmica de Carga (kgf);

$Lh$  = Vida útil requerida (h);

$v$  = Velocidade (m/min);

$Fa$  = Capacidade Estática de Carga (kgf);

Logo:

$$Fa = P1 * fw$$

$$Fa = 30,94 * 1,2$$

$$Fa = 37,13 \text{ kgf}$$

$$Fa = 364,12 \text{ N}$$

$$Ca = \sqrt[3]{\frac{Lh * 60 * v}{50 * 10^3}} * Fa$$

$$Ca = \sqrt[3]{\frac{30000 * 60 * 0,75}{50 * 10^3}} * 37,13$$

$$Ca = 111,39 \text{ kgf}$$

$$Ca = 1092,36 \text{ N}$$

Através dos valores de capacidade dinâmica e estática, foram selecionados via catálogo os valores mais próximos aos encontrados. Os modelos do catálogo possuem valores de capacidade estática e dinâmica relativamente maiores que o dimensionado. Estes modelos são apresentados, através da Tab. 5.

Tabela 5: Modelos disponíveis para seleção de trilhos e patins

Modelo	Capacidade estática de carga (N)	Capacidade dinâmica de carga (N)	Comprimento Máximo do trilho (mm)
A	2216,30	1755,39	600
B	2451,66	3726,53	800
C	2824,32	3500,97	800

Fonte: Do Autor (2021)

Devido ao pensamento de ampliação futura do projeto, selecionou-se o modelo B, pelo fato de possuir 3726,53 N de capacidade dinâmica de carga (permite a calibração de manômetros maiores que 1000 bar, por exemplo) e o comprimento máximo do trilho de 800 mm (para o projeto atual, já possuem 480 mm). Com este modelo, adotou-se o trilho, respectivamente, em mm, 3,5 x 6 x 4,5.

## 4.2. RESULTADOS DAS DEFINIÇÕES ELÉTRICAS

### 4.2.1 Seleção do Drive do Motor

O drive do motor de passo fará a ligação e controle entre o motor propriamente dito e a placa de aquisição de dados. Além disso, será responsável por permitir o movimento de forma controlada e suave. Foram levados em consideração na pesquisa de modelos disponíveis de mercado a corrente máxima de suporte e os micropassos selecionáveis.

De acordo com Cardozo (2021), o driver alimenta os terminais do motor através de um conversor bipolar a partir de duas fontes de tensão controladas por um sequenciador de fases. A seleção para estes sequenciadores está diretamente ligada a corrente das bobinas e os micropassos selecionáveis permitem a precisão dos pulsos. Desta forma, entende-se que, quanto maior a disponibilidade de seleção de corrente e de passos no drive, melhor a flexibilização do projeto. Os modelos podem ser vistos através da Tab. 6.

Tabela 6: Comparação entre modelos de drive de motor de passo

Modelo	Qtd. Micropasso selecionável	Qtd. Corrente de saída selecionável	Fases suporte do motor	Corrente Máxima do motor (A)
A	16	8	2 e 4	5
B	6	8	2 e 4	4

Fonte: Do Autor (2021)

O drive proposto para a ligação do motor de passo foi o Modelo A, pois além de atender a corrente de 2,5 A do motor proposto, ainda conta com 16 resoluções de micro passos selecionáveis, sistema soft-starter e até 8 valores de corrente de pico selecionáveis, o que permite maior flexibilidade no controle do motor, e permite um upgrade do projeto, principalmente do motor, caso haja necessidade de aumento de pressão de entrada.

Este modelo, além das características positivas citadas, mantém suavidade quando o motor e drive são ligados, eliminando incertezas no processo de calibração, quando posto em consideração a questão de linearidade no escoamento do fluido de trabalho durante o avanço e retorno do fuso. O componente possui tensão de alimentação de 24 a 80 Vcc.

#### 4.2.2 Seleção do Transdutor

O transdutor é responsável pela transmissão de dados do sistema calibrador para a placa de aquisição de dados. Por se tratar de um equipamento de entrada de dados para o restante do sistema, deve possuir maior precisão e confiabilidade dos valores expressos, com objetivo de reduzir as incertezas de medição e abranger uma gama maior de equipamentos, que atendam classes de medição maiores. Os valores foram selecionados de acordo com a pressão máxima admitida, a precisão e tempo de resposta. A Tab. 7 apresenta os modelos analisados.

Fraden (1996) *apud* Garcia (2006) aponta que, para determinar qual sensor utilizar em uma aplicação, uma avaliação deve ser feita das características da relação entre o sinal de entrada e o sinal de saída, com destaque a faixa de medição, precisão e exatidão (maiores possíveis) e tempo de resposta (menor possível).

Tabela 7: Comparação entre modelos transdutores de pressão

Modelo	Faixa de Medição (bar)	Erro (%)	Tempo de resposta (ms)
A	0 a 1000	0,50	$\leq 1,0$
B	0 a 1000	0,50	$\leq 1,0$
C	0 a 1000	0,25	$\leq 0,1$

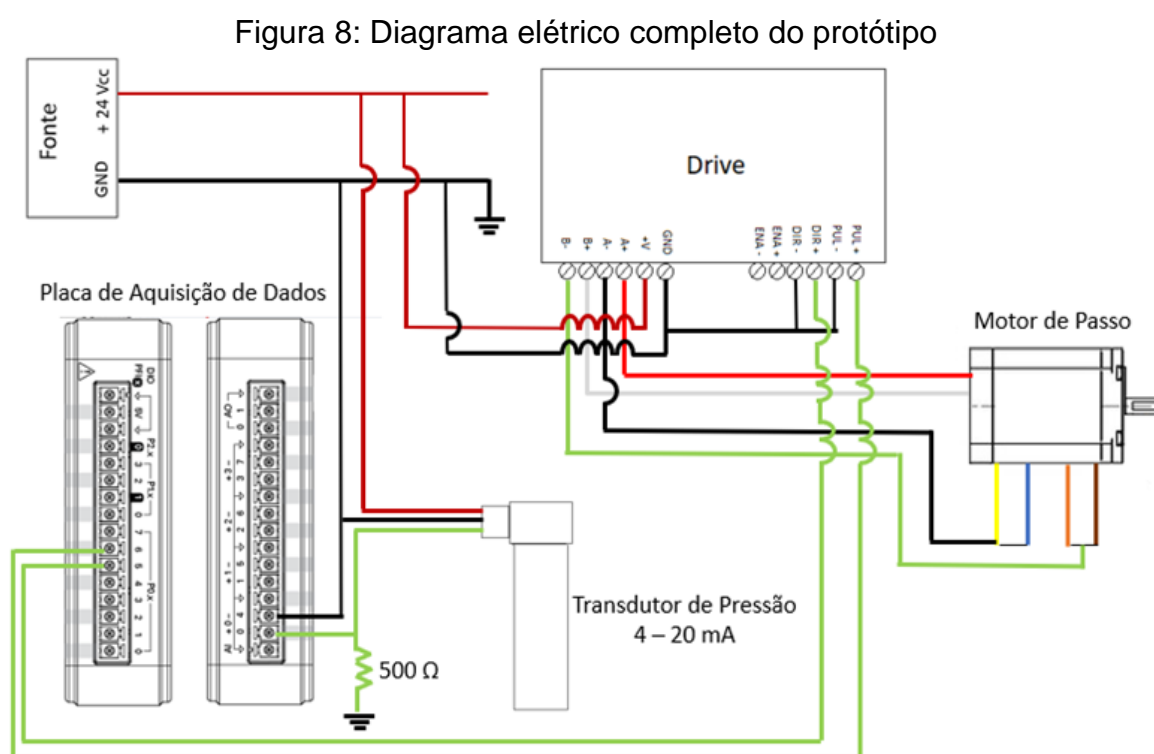
Fonte: Do Autor (2021)

Através do critério da faixa de medição, todos os modelos atendem os requisitos, no entanto, com a menor variação de precisão (0,25 %) e menor tempo de resposta (0,1 ms), selecionou-se o Modelo C. Nestas condições, o equipamento

permite maior confiabilidade dos valores expressos pelo sistema. O componente possui sinal com saída 4 – 20 mA e tensão de alimentação de 14 a 30 Vcc.

### 4.2.3 Diagrama Elétrico

Após a definição dos parâmetros nominais de cada equipamento, foi desenvolvido um diagrama elétrico mnecessário para a execução do protótipo. A Fig. 8 representa o cricuito.



Fonte: Do Autor (2021)

O transdutor de pressão será responsável pela substituição do instrumento padrão (referência). Este será devidamente calibrado por órgãos competentes e os dados provenientes de sua leitura serão registrados automaticamente via *software*. No caso do equipamento a ser calibrado, devido a grande disponibilidade de modelos existentes (analógico, digital, resoluções diversas), o processo de coleta de dados ainda será manual.

Conforme a saída da placa *National Instruments*, a entrada analógica é interpretada com tensão. Com o objetivo de realizar a conversão de sinais, aplicou-se o dimensionamento para a leitura de dados em corrente elétrica. Com a tensão da

placa de aquisição de dados de 10 V, e corrente máxima de leitura do sinal do transdutor de 20 mA (0,02 A), aplicou-se a lei de Ohm, de acordo com a Eq. 5.

$$R = \frac{E}{I} \quad (5)$$

Onde:

$R$  = Resistência Elétrica ( $\Omega$ );

$E$  = Tensão Elétrica (V);

$I$  = Corrente Elétrica (A);

Logo:

$$R = \frac{10}{0,02}$$

$$R = 500 \Omega$$

#### 4.3. RESULTADOS DOS CONCEITOS COMPUTACIONAIS

Com o objetivo de promover maior confiabilidade, decidiu-se utilizar um *software* LabView® com eficácia comprovada através dos trabalhos abordados na literatura, com características de maior flexibilidade de ações e simulações, usando a linguagem de programação por diagrama de blocos de funções.

Segundo Betti (2007), o uso do LabView® acelera e simplifica o trabalho, graças a sua estrutura modular. Tarefas que até recentemente exigiam o uso dedicado de DSPs (“Digital Signal Processors”), hoje podem ser executadas lançando mão de conversores analógico-digitais e computadores comercialmente disponíveis e de custo mais acessível. Permitem conexão imediata com diferentes variáveis de processo, através de botões e transmitem precisão e confiabilidade até mesmo no equacionamento booleano.

Como é descrito na Fig. 9, a placa da National Instruments, elo de ligação entre o programa e os componentes físicos é representada pelo DAQ, onde possuem as entradas analógicas, digitais e as saídas digitais, onde os transdutores do experimento são interligados nas portas analógicas e o motor de passo em uma saída digital. A ligação necessariamente passa por um filtro *low pass* (passa baixo) com o

objetivo de eliminar qualquer ruído da rede e atenuação de possíveis interferências que possam comprometer a leitura dos dados.

A linha passa por um bloco, onde foram colocados os fatores de calibração do sensor transdutor de pressão, contidos em um subprograma, com o objetivo de compactar a programação. Neste subprograma, estão contidas as informações pertinentes a calibração do transdutor, tais como fator multiplicativo, (transforma a tensão ou corrente em pressão), os ranges máximos e mínimos que permitem chegar o transdutor e os indicadores (LEDs) se o motor está ligado ou desligado. O controle do motor é realizado através da programação booleana, com os princípios da álgebra booleana *And*, *not* e *Or*.

Na sequência, a programação passa pelo bloco *statistics*, onde serão realizadas as médias de sinais. Este bloco é necessário, pois coletam-se durante a execução muitos dados por segundo, logo, precisa-se estabilizar os valores através de uma média. Conseqüentemente, as informações são encaminhadas aos mostradores, que permitem a visualização dos dados em tempo real.

Foram adicionados os acionamentos manual e automático: o acionamento automático consiste na fixação de uma pressão conhecida, no qual o motor irá desativar automaticamente ao atingí-la (com range de -1 a 1 bar, para que fique estabilizado neste intervalo de tempo); e o acionamento manual, onde permite-se o acionamento do motor por meio de um botão de pulso, controlado através de cliques.

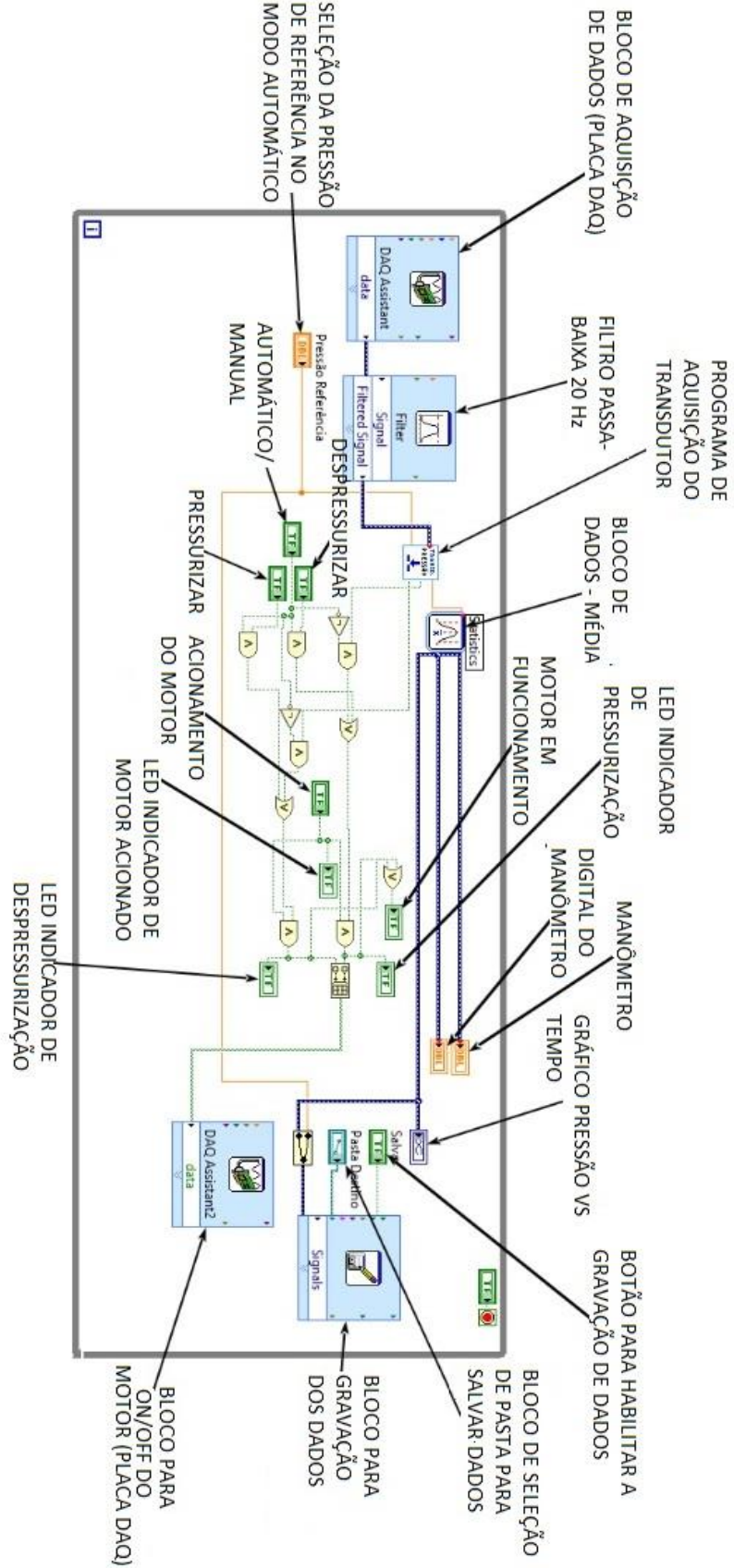
O último bloco representa modo de salvar o arquivo, fornecido em formato *txt.*, detalhado com o nome específico da pasta renomeada, para que não haja equívocos na aquisição e interpretação de dados. Cada ensaio terá um nome diferenciado em *txt*, em sua determinada pasta.

Após definir todos os pré-requisitos do sistema e parâmetros, com base na programação, criou-se o *design* de interface de controle. (Fig. 10). A interface será responsável pelo controle do motor e da coleta de dados do transdutor de pressão.

No lado esquerdo da interface do programa (Fig. 10), encontra-se o mostrador em tempo da pressão de leitura e o *preset* da pressão máxima, onde será adicionada a pressão máxima de trabalho, de acordo com a faixa de medição máxima do equipamento a ser calibrado, como critério de segurança quanto ao atingimento da pressão máxima e danificação do instrumento.



Figura 9: Programa principal do LabVIEW



Fonte: Do Autor (2021)

Figura 10: Interface de controle do LabVIEW



Fonte: Do Autor (2021)

#### 4.4. ANÁLISE DE GESTÃO E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Como finalização do projeto conceitual, desenvolveu-se uma tabela, denominada por MIM (Matriz Indicadora de Módulos). Rozenfeld et al. (2007) defende que as diretrizes definidas na tabela são confrontadas com as funções desempenhadas pelo produto atribuindo-se valores a cada relacionamento. Ao modelar funcionalmente o produto, a abstração também pode ser empregada na identificação de restrições fictícias, que poderiam limitar o emprego de novas tecnologias, materiais, processos de fabricação e mesmo, novas descobertas científicas.

A matriz baseou-se nas ideias do livro *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a Melhoria do Processo*. Foi adaptada para este projeto conceitual, com uma base modular com 3 diretrizes e 4 modelos. Esta metodologia será a conclusão do projeto conceitual, pois permite a comparação entre rankings a escolha do melhor componente (representado pelo modelo) a ser utilizado, de acordo com os parâmetros estabelecidos.

Os modelos A, B, C e D destacados na Tab. 8 representam cada componente analisado durante as etapas da pesquisa teórica. Por exemplo: para seleção da bancada, analisaram-se 04 modelos disponíveis no mercado. Por sua vez, comparou-se individualmente cada modelo com o grau de afinidade do submódulo. Ao analisar o modelo A, no submódulo de “seleção do princípio de funcionamento da

bancada”, percebe-se que atingiu forte relação. Isto significa que o modelo atende o requisito máximo estabelecido e possui forte afinidade com as necessidades do projeto naquele conceito (nesse caso, o Princípio de Pascal).

Tabela 8: Tabela MIM do projeto conceitual da bancada de calibração

Critérios de Relação da Matriz			Fraca Relação (1 ponto)	○	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
			Média Relação (3 pontos)	●				
			Forte Relação (5 pontos)	●				
DIRETRIZES DE MODULARIZAÇÃO	Conceitos Mecânicos	Definição da Bancada	Seleção do Princípio de Funcionamento	●	●	●	●	
			Seleção da Pressão de Trabalho	○	●	○	○	
			Seleção do Fluido de Trabalho	○	●	●	●	
			Material da Base	●	●	●	●	
		Peso do Conjunto	○	○	●	●		
		Transmissão de Movimento	Comprimento Máximo do Trilho	○	●	●	N/A	
			Capacidade dinâmica de Carga	○	●	●	N/A	
	Capacidade Estática de Carga		○	○	●	N/A		
	Conceitos Elétricos	Motor	Seleção do Tipo do motor	○	●	○	N/A	
			Seleção do Redutor	○	●	N/A	N/A	
		Definição do Drive do motor	●	○	N/A	N/A		
		Sensor	Seleção do Transdutor de Pressão	○	○	●	N/A	
	Conceitos Computacionais	Controle	Modalidade de Controle	●	N/A	N/A	N/A	
			Seleção do software	●	N/A	N/A	N/A	
		Programa	Desenvolvimento da interface do programa	●	N/A	N/A	N/A	
			Desenvolvimento da Programação	●	N/A	N/A	N/A	
	SOMATÓRIO					48	50	42
CLASSIFICAÇÃO					2	1	3	4
PERCENTUAL					29,81%	31,06%	26,09%	13,04%

Fonte: Do Autor (2021)

O modelo B, atingiu no total 08 relações fortes, 03 relações médias e uma relação fraca, com somatório de 50 pontos, o que representa 31,06 % do total, o que lhe permitiu ser a primeira opção de combinação do estudo. O modelo A, atingiu no total 07 relações fortes, 02 relações médias e 07 relações fracas, o que representa 29,81 % do total, em segundo lugar. Já para o modelo C, atingiu 07 relações fortes, 02 relações médias e uma relação fraca, o que representa 26,09 % do total, em terceiro lugar. Em último lugar, com 04 relações fortes e uma relação fraca, encontra-se o modelo D.

## 5 CONCLUSÕES

Por meio desta revisão sistemática da literatura, pela qual se buscou elaborar uma estrutura conceitual sobre os termos relacionados com a calibração, conclui-se que a metodologia da Matriz Indicadora de Módulos permitiu combinar condições ideais para a construção de uma bancada calibradora. As características

dominantes na seleção da bancada, limitam os modelos disponíveis no mercado: em quatro modelos analisados, somente um atendeu os requisitos.

O teste de torque demonstrou que, no avanço, no ponto crítico (500 bar), encontrou-se uma pressão 1,4 vezes maior que no retorno. Isso indica que a compressão do sistema deve ser considerada para eventuais cálculos. Como pior hipótese, ao calcular força responsável pelo momento torsor, percebeu-se a desestabilização da bancada. Essa comprovação tornou-se crucial para o desenvolvimento de um novo conjunto, com apoios bilaterais e aplicação de um motor no fuso (redução do momento), o que elimina o risco de tombamento do sistema.

Na execução do movimento, para os modelos de motores de passo NEMA 34, houve a necessidade de aplicação de um redutor, devido ao baixo torque nominal ofertado. Dentre as combinações entre motor e redutor, três modelos admitiram os parâmetros de torque, no entanto, com intuito de ampliação do projeto ou previsão por avarias do sistema, houve a seleção de um conjunto que excede 70% do torque necessário. Para um estudo futuro, recomenda-se a aplicação de servomotores, devido a maior disponibilidade de torque.

Para movimentação do motor e fuso, implementaram-se guias lineares e patins. Esta aplicação permite a redução em até 80% de atrito no movimento. As cargas estática e dinâmica apresentaram baixa intensidade, logo que, o menor padrão disponível em catálogo representa 60 % excedente ao requisitado. Na seleção do drive de controle do motor, quanto a seleção de micropassos, há diferença de 10 condicionantes entre os modelos: enquanto um fornece 6 opções, o outro fornece 16, fator este, importante para precisão do movimento. Os transdutores de pressão, em três análises, somente um elemento enquadrou-se nos parâmetros, com grande destaque: indicou tempo de resposta 10 vezes mais rápido que os demais.

Como prova real das definições dos componentes, a matriz MIM indicou as possibilidades de combinações entre os diferentes modelos: com 31,06 %, 29,81%, 26,09% de aprovação, encontram-se, respectivamente, os modelos B, A e C. Com 13,04%, encontra-se o modelo D. Conclui-se que, devido à proximidade dos percentuais entre os três primeiros colocados (diferença máxima de 5 %), recomenda-se utilizar para o projeto, além do modelo B, os modelos A e C, desde que levados em consideração o cumprimento dos requisitos pré estabelecidos.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Sílvia Grasiella Moreira. **Auto-Calibração e Linearização de Sensores Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional**. Dissertação de Mestrado. Minas Gerais: 2009. Disponível em: < <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8CKHMG>>. Acesso em: 15 de Julho de 2021.
- BAVIA BAMPI, B. **Projeto de Máquina-Ferramenta baseado na Rigidez Estática**. 2016. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell; MAZUREK, David F. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática**. McGraw Hill Brasil, 2019.
- BELAN, Peterson Adriano. **Técnicas de visão computacional aplicadas na automação de Processos metrológicos**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: 2012. Disponível em:<<https://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/185>>. Acesso em: 10 de Agosto de 2021.
- BETTI, Flavio. **Desenvolvimento e Implantação de um Programa de Controle e Aquisição de Dados na Calibração de Instrumentos em Radiodiagnóstico**. 2007. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BOTREL, Tarlei Arriel; et al. **Construção e calibração de um manômetro de leituras digital microprocessado**. Botucatu: 2006. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/157923/construcao-e-calibracao-de-um-manometro-de-leituras-digital-microprocessado>>. Acesso em: 10 de Agosto de 2021.
- CABRAL, Paulo. **Erros e Incertezas nas Medições**. UFRJ. Rio de Janeiro: 2004. Disponível em: < <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>>. Acesso em: 15 de Julho de 2021.
- CAMARGO, Thiago Augusto Bento da Silva. **Desenvolvimento de Kit Didático para Ensino de Teoria de Motores de Passo**. 2007. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
- CARDOZO, William Schroeder. **Controle de Motores de Passo em Malha Fechada**. 2012. Tese de Doutorado. PUC-Rio.
- DA JORNADA, Daniel Homrich. **Implantação de um guia orientativo de incerteza de medição para avaliadores de laboratório da Rede Metrológica RS**. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: 2009. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/17491>>. Acesso em: 07 de Julho de 2021.
- FERREIRA, Marcelo. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. Dissertação de Mestrado. UFSC, 1997. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/158158>>

FRACASSO, P. T.; SILVA, T. J.; SELVATICI A. H. P. **Bancada inteligente para calibração de hidrômetros.** In: 14o Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação. São Paulo, p. 1-10, 2010.

G. Jr., Armando Albertazzi; Sousa, André R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** São Paulo: Manole, 2017.

GARCIA, Vitor et al. **Sensor de pressão microeletrônico com base no efeito piezomom.** 2006.

GALLAS, Márcia Russman. **Incerteza de Medição.** IF – UFRGS. Porto Alegre: 1998. Disponível em: < <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/medidas.pdf>>. Acesso em: 15 de Julho de 2021.

NACIMENTO, Diego. **A Matemática no Ensino Médio.** 2015. Disponível em: <<https://2mathtip.blogspot.com/2020/04/311-estudo-da-reta-e-o-coeficiente.html?view=magazine>>. Acesso em 07 de Setembro de 2021.

GUM. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de Incerteza de medição-GUM 208.** Primeira edição Brasileira da 1 do BIPM de 2008. Rio de Janeiro: 2008.

HEMMING, B.; LEHTO, H. **Calibration of dial indicators using machine vision.** Measurement Science and Technology. v. 13, p. 45–49, 2002.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física 3** . LTC, 1984.

HALLACK, João Chafi. **Apostila de Resistência dos Materiais I.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: 2012. Disponível em: <[https://www.ufjf.br/mac/files/2012/11/Apostila\\_Res\\_Mat\\_outubro\\_2012\\_atualizada.pdf](https://www.ufjf.br/mac/files/2012/11/Apostila_Res_Mat_outubro_2012_atualizada.pdf)>

HIBBELER, R. C. **Ingeniería Mecánica: Estática – decimosegunda edición.** Pearson Educación, México: 2010. 655 p.

INCERPI, Paulo Henrique. **Incerteza De Medição: Método Proposto Para a Análise da Conformidade do Produto.** Dissertação de Mestrado. Itajubá: 2008. Disponível em: <[http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFEL\\_1a7d49c82250672c1443bc4c9b478117](http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFEL_1a7d49c82250672c1443bc4c9b478117)>. Acesso em: 07 de Julho de 2021.

MANZUETO, Mauricio Santos. **Automação de Processos: a influência dos softwares de automação de processos nas rotinas organizacionais.** Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: 2016. Disponível em: < <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=28434@1>>. Acesso em: 07 de Julho de 2021.

MOREIRAS, Cláudia Isabel Pires. **Análise de Incertezas em Ensaios de Qualidade.** Dissertação de Mestrado. Porto: 2005. Disponível em: < <https://repositorio->

aberto.up.pt/bitstream/10216/57754/2/Texto%20integral.pdf>. Acesso em: 15 de Julho de 2021.

NUNES, Henrique Alexandre Carvalho. **Aplicações de Instrumentação Virtual em Metrologia e Qualidade**. Dissertação de Mestrado. Funchal: 2012. Disponível em: <<https://digituma.uma.pt/handle/10400.13/479>>. Acesso em 10 de agosto de 2021.

PARADA, Joaquim Orlando. **Vibrações não lineares em tubulações com fluido em escoamento**. 2013.

RIBEIRO, Lucas. MALAGUTTI Thiago Francisco. **Motores de passo: funcionamento e aplicações**. Revista Ling. Acadêmica, Batatais, v. 10, n. 1, p. 115-131, jan./jun. 2020.

ROQUE, Alexandre dos Santos et al. **Metodologia de controle para equipamentos automáticos programáveis acionados por motores de passo**. 2010.

ROZENFELD, Henrique. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542 p.

SENAI. **Instrumentação Básica I: Pressão e Nível**. Espírito Santo: 1999. Disponível em: <[https://docente.ifrn.edu.br/gustavosouza/2012.2/3-qui-int-1v/Instrumentacao %20Basica%20I%20-%20Pressao%20e%20Nivel%20-%20SENAI.pdf/view](https://docente.ifrn.edu.br/gustavosouza/2012.2/3-qui-int-1v/Instrumentacao%20Basica%20I%20-%20Pressao%20e%20Nivel%20-%20SENAI.pdf/view)>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

SILVA, Gustavo de Oliveira. **Implementação de sensores digitais na coleta de gases em fontes estacionárias**. Trabalho de Conclusão de Curso. Caratinga: 2019. Disponível em:< <http://dspace.doctum.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/3384>>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

TEIXEIRA, Adunias S.; COELHO, Silvana L. **Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de Leitura automática**. Jaboticabal: 2005. Disponível em:<<https://www.scielo.br/j/eagri/a/GPVZw8QJ8rcGWhSSRgybBQr/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.