



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

João Gustavo Engelmann

Desenvolvimento de uma termoformadora a vácuo de bancada

Blumenau
2025

João Gustavo Engelmann

Desenvolvimento de uma termoformadora a vácuo de bancada

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Alex Fabiano Bueno, Dr.

Coorientador: Prof. Guilherme Brasil Pintarelli, Dr.

Blumenau

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Engelmann, João Gustavo

Desenvolvimento de uma termoformadora a vácuo de bancada / João Gustavo Engelmann ; orientador, Alex Fabiano Bueno, coorientador, Guilherme Brasil Pintarelli, 2025.

45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Prototipagem de bancada. 3. Controle térmico. 4. Termoformagem a vácuo. 5. Modelagem. I. Bueno, Alex Fabiano. II. Pintarelli, Guilherme Brasil. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

João Gustavo Engelmann

Desenvolvimento de uma termoformadora a vácuo de bancada

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 18 de julho de 2025.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

ALEX FABIANO BUENO

Data: 30/07/2025 14:32:23-0300

CPF: ***.810.780-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Alex Fabiano Bueno, Dr.
UFSC



Documento assinado digitalmente

FERNANDO LUIS PEIXOTO

Data: 08/08/2025 19:48:31-0300

CPF: ***.373.879-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Fernando Luis Peixoto, Dr.
UFSC



Documento assinado digitalmente

Sheila Santisi Travessa

Data: 08/08/2025 21:01:43-0300

CPF: ***.584.507-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^ª. Sheila Santisi Travessa, Dra.
UFSC

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um equipamento denominado de termoformadora, sendo neste caso, de bancada em escala laboratorial, capaz de moldar termoplásticos através de uma matriz com força de sucção. Para isso foi buscado na literatura e em equipamentos industriais as características para a confecção e a partir deste material, projetada uma estrutura física, através do software SolidWorks com a ferramenta de chapas metálicas. Também foi empregado uso de componentes como o Arduino para as lógicas e um controlador de temperatura para controle de uma resistência tubular de 750W que atinge 3,41 A de corrente sobre tensão de 220V. Os resultados obtidos demonstram as dificuldades perante as escolhas dadas, como os materiais empregados e possíveis melhorias para futuras implementações. Mesmo com as dificuldades de manufatura do aço inox de 2mm, do processo de aquecimento da chapa polimérica e da conformação sobre o invólucro de vácuo, o equipamento cumpriu o seu propósito de termoformar e obter um protótipo funcional, o qual servirá para fins educacionais no laboratório de expressões gráficas da UFSC Campus Blumenau.

Palavras-chave: automação; prototipagem de bancada; controle térmico; termoformagem a vácuo; modelagem.

ABSTRACT

This work aims to develop a piece of equipment called a thermoformer, in this case, a benchtop model on a laboratory scale, capable of molding thermoplastics using a mold with suction force. To achieve this, characteristics were researched in the literature and in industrial equipment to guide the construction process. Based on this information, a physical structure was designed using SolidWorks software with its sheet metal tool. Components such as an Arduino were used to implement control logic, along with a temperature controller to regulate a 750W tubular heating element, which operates at 3.41 A under 220V. The results obtained highlight the challenges encountered, including material selection and design choices, as well as suggestions for potential improvements in future versions. Despite difficulties in manufacturing the 2 mm stainless steel structure, heating the polymer sheet, and achieving conformation over the vacuum chamber, the equipment successfully fulfilled its purpose of thermoforming and producing a functional prototype. This prototype will serve educational purposes in the graphics expression laboratory at UFSC – Campus Blumenau.

Keywords: automation; benchtop prototyping; thermal control; vacuum thermoforming; modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dois tipos básicos de termoformagem: a) Sobre molde macho com assistência de vácuo. b) Sobre molde fêmea com assistência de vácuo.	15
Figura 2 – Termoformadoras a vácuo.	16
Figura 3 – Controlador de temperatura.	18
Figura 4 – Elementos de um sistema de controle de malha fechada.	19
Figura 5 – Elementos de um sistema de medição.	20
Figura 6 – Desenho bidimensional planificado da caixa de vácuo.	24
Figura 7 – Representação tridimensional da caixa de vácuo.	24
Figura 8 – Desenho bidimensional planificado da base.	25
Figura 9 – Representação tridimensional da base.	25
Figura 10 – Estruturas laterais.	26
Figura 11 – Desenho bidimensional planificado da superfície.	27
Figura 12 – Termoformadora montada.	28
Figura 13 – Diagramas	29
Figura 14 – Cossinete e macho M3.	31
Figura 15 – Confecção das roscas na caixa base.	31
Figura 16 – Montagem do invólucro com a base	32
Figura 17 – Resistência montada.	33
Figura 18 – Montagem do quadro	34
Figura 19 – Instalação eletroeletrônica	35
Figura 20 – Termoformadora	36
Figura 21 – Moldes para termoformagem.	38
Figura 22 – Moldes para termoformagem.	38
Figura 23 – Moldes para termoformagem.	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação dos aquecedores de termoformagem	13
Quadro 2 – Características das termoformagens de baixo e alto calibre	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sensibilidade e faixa de temperatura dos diferentes tipos de termopares	20
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
IDE	Integrated Development Environment
LABEX	Laboratório de Expressão Gráficas
NR	Norma Regulamentadora
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	TERMOFORMAGEM	13
2.1.1	Termoformagem a vácuo	14
2.1.1.1	<i>Processo</i>	14
2.1.1.2	<i>Equipamentos</i>	15
2.1.1.3	<i>Termoplásticos</i>	16
2.2	CONTROLES E ACIONAMENTOS	18
2.2.1	Temperatura	18
2.2.2	Sensores	19
2.2.3	Arduíno	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	PROJETO ESTRUTURAL	23
3.1.1	Invólucro de vácuo	24
3.1.2	Base	25
3.1.3	Suportes laterais	26
3.1.4	Cobertura	27
3.1.5	Projeto Termoformadora	28
3.2	PROJETO ELETROELETRÔNICO	29
3.3	MONTAGEM	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	ANÁLISE ESTRUTURAL E ELÉTRICA	37
4.2	PRODUTO TERMOFORMADO	38
4.3	ANÁLISE CRÍTICA DO PROCESSO DE TERMOFORMAGEM E LIMITAÇÕES EXPERIMENTAIS	39
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – Código do programa implementado no Ar- duíno	44

1 INTRODUÇÃO

A termoformagem, uma técnica que remonta à pré-história, foi utilizada pelos egípcios, que moldavam cascos de tartaruga aquecidos em óleo quente para produzir recipientes com o propósito de armazenar comida. No continente americano e na região da Micronésia cascas de árvores eram aquecidas em água quente para serem transformadas em potes e canoas. Já em meados de 1870 o estadunidense John Wesley Hyatt, que é considerado o pai dos processos modernos de plásticos, viabilizava a termoformagem de nitrato de celulose, que era colocada em moldes de aço e aquecidos com vapor sobre pressão, sendo posteriormente resfriados com água. Neste processo foram desenvolvidas pequenas mamadeiras, chocalhos e estojos para espelhos (JAMES L. THRONE, 2008). Avançando para o início do século XX, a termoformagem a vácuo surgiu como uma inovação significativa, consistindo em um processo no qual é aquecido um material polimérico que toma a forma de uma matriz com o auxílio de vácuo, empregado para o desenvolvimento de grandes peças, a exemplo banheiras e caixas. (HAROLD BELOFSKY, 1995).

Desde a terceira revolução industrial até os tempos modernos é utilizado para produção em grande escala de pequenos produtos, como na fabricação de recipientes, copos, entre outros objetos. A priori sendo um método mais simples e barato de produção em relação aos métodos existentes como extrusão, injeção, outros formatos de moldagem, estes que configuram características distintas tanto na linha de produtos como no resultado. Estes processos de moldagem consistem na aplicação de uma força sobre um material que toma a forma de acordo com o orifício ao qual é pressionado. A extrusão possibilita a criação de produtos mais simples e uniformes, ou seja, toda a peça com o mesmo formato, enquanto a injeção possibilita o desenvolvimentos de peças mais elaboradas, injetando o material em um molde.

Alguns estudos mais recentes começam a trazer avanços ainda mais distintos nos usos da termoformagem a vácuo, como o desta técnica na produção de empacotamento de componentes eletrônicos flexíveis (VALAVAN *et al.*, 2023) e na conversão de placas eletrônicas para formato tridimensional (ZULFIQAR *et al.*, 2021). Ou até mesmo pesquisas relacionadas a otimização na confecção de moldes dinâmicos para a termoformadora, caso do ProtoMold (YAMAOKA; KAKEHI, 2017), onde além de produzir moldes cerca de 83% mais rápidos, também possibilita a reutilização do produto termoformado por até 20 vezes. Além destes estudos, há ainda novos desenvolvimentos de termoformadoras, que empregam diferentes metodologias e materiais, caso dos trabalhos escritos por Soni *et al.* (2018) e Birton e Gergely (2021) onde indicam que ainda há possibilidade de melhora no design e na implementação da termoformagem a vácuo.

A automação está cada vez mais introduzida em cada ramo da indústria, otimizando, coletando dados e tornando possível a execução de processos continuamente mais complexos, o que também acontece nas técnicas de produção citadas. Partindo deste princí-

pio e atribuindo os conhecimentos obtidos na execução do curso de Engenharia de Controle e Automação surge este trabalho de conclusão de curso, no qual será desenvolvida uma termoformadora a vácuo de bancada, um equipamento para fins laboratoriais de pequena escala. Neste projeto serão vistas diversas aplicações de engenharia como o modelamento estrutural e as escolhas dadas para atingir os objetivos, bem como a atribuição de soluções de automatização do mecanismo que transporta a chapa polimérica que permite ser acionado através do controle de temperatura. Uma outra vertente do princípio da construção deste equipamento é dada pela necessidade do laboratório de expressão gráfica (LABEX) da UFSC - Campus Blumenau de possuir a ferramenta necessária para ensino, pesquisa, extensão e serviços que demandem da utilização dos produtos termoformados.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho, os quais abordam uma descrição das atividades que serão elaboradas.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento e construção de uma termoformadora a vácuo, envolvendo o modelamento estrutural, elétrico e eletrônico do equipamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar e dimensionar a parte estrutural (corpo físico) do equipamento;
- Desenvolver sistema eletroeletrônico de acionamento e controle;
- Implementar controladores de temperatura;
- Implementar acionamento eletroeletrônicos;
- Desenvolver protótipo de termoformagem funcional;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos envolvidos na termoformagem, dando um foco à termoformagem a vácuo dado o objetivo do trabalho. Serão apresentados também os principais produtos, insumos e equipamentos, o que trará uma noção geral de como e porque esta metodologia de desenvolvimento de produtos é tão utilizada. A seguir, serão tratados componentes fundamentais para esta gama de equipamentos, o controle do aquecimento, e como este processo é implementado por meio de dispositivos específicos, como controladores e sensores.

2.1 TERMOFORMAGEM

De acordo com o livro *Plastic Product Material and Process Selection Handbook* o processo de termoformagem é descrito pela conversão de um termoplástico em uma casca, onde podem ser empregadas uma folha ou filme plástico como materiais pré-formados. É citado também o uso desta técnica de manufatura em diversas áreas como a de construção, ferramentas, paletes industriais e transporte, incluindo os setores como automotivo e aéreo, entre outros. Na confecção dos produtos o maquinário é diversificado, podendo operar para produzir um único produto, como poder ter uma linha de produção contínua para produção em massa. São inúmeros métodos de termoformagem, dos mais diversos tipos,

Todo método depende de uma fonte de calor para aquecimento da folha ou do filme utilizado, que podemos nomear de modo geral de insumo deste processo. Portanto, estes insumos podem ser aquecidos por alguns tipos de fontes de aquecimento como descrevem Donald Rosato, Dominick Rosato e Matthew Rosato (2004) no quadro 1, onde citam também as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Quadro 1 – Comparação dos aquecedores de termoformagem

Tipo de Aquecedor	Vantagens	Desvantagens
Haste tubular	Baixo custo, durabilidade, rápido aquecimento, fácil limpeza	Perda rápida de eficiência, difícil de controlar, precisa de refletores, os refletores devem ser limpos, ferrugem, difícil de zonear
Quartzo tubular	Aquecimento mais rápido, excelente faixa de aquecimento, grande faixa de potência	Frágil, pode ser picado
Cerâmico	Durabilidade, boa faixa de aquecimento, mais barato, bom controle de temperatura	Alto custo para instalação, difícil de encontrar elementos queimados, tempo de resposta da temperatura abaixo da média
Painel elétrico	Aquecimento estável, disponível com tecido de quartzo, metal, faces cerâmicas, fácil instalação	Grande, alto custo de substituição
Gás catalítico	Aquecimento uniforme, baixo custo de operação, companhia de gás pode subsidiar	Grande, difícil de zonear, resposta de temperatura muito baixa, custo de instalação muito alto
Gás não-catalítico	Fonte de energia barata, muito durável	Alto custo para instalação, fonte de energia intensa, pode causar incêndio, restrito para alto calibre
Halogênio	Calor pulsado, aquecimento muito rápido, excelente faixa de aquecimento, elementos muito pequenos	Frágil, muito caro, alto custo para instalação, confiabilidade desconhecida

Fonte: Adaptado de Donald Rosato, Dominick Rosato e Matthew Rosato (2004)

A maioria dos termoformadores prefere o uso de lâmpadas de quartzo, aquecedores que possui como fonte de calor o radiação infravermelha, visto que podem ser ligadas e desligadas rapidamente, além da possibilidade do uso de escudos, proteções sobre a folha para aquecer menos determinadas regiões. A superfícies de radiação tem que chegar a pelo menos 540°C com capacidade entre 30 e 60 kw/m² (HAROLD BELOFSKY, 1995).

Há diversos tipos de termoformagem e algumas categorizações, como a tratada por James L. Throne (2008), na subdivisão entre baixo e alto calibre, uma divisão simples a qual permite atribuir características a cada método. As características e a comparação entre essa classificação está disponível no Quadro 2. Nele são vinculados usos específicos dependentes de diversos fatores que envolvem desde a folha inicial até o tipo de pressão aplicada no processo. Essa comparação auxilia na distinção de ambas as classificações.

Quadro 2 – Características das termoformagens de baixo e alto calibre

Característica	Baixo calibre	Alto calibre
Grossura inicial da folha	<1.5mm	>3mm
Produtos dominantes	Embalagens, descartáveis	Armários, industriais
Tipo de manuseio da folha	Alimentação por rolo	Folha cortada paletizada
Maquinário típico	Corrente de pinos linear	Prensa rotativa
Aspectos de controle do maquinário	Automatizado	Automatizado para manual
Aspectos de controle do aquecimento	Calor de saída KW/m ²	Condução na folha
Aquecimento padrão	Não é feito normalmente	Comum
Tendência do tamanho da parte	Pequeno	Médio para muito grande
Número de cavidade do molde	Muitos	Um ou dois normalmente
Assistência mecânica	Plugue	Plugue, onda, caixa de vácuo
Tipo do molde	Fêmea normalmente	Macho, fêmea, misturado
Materiais do molde	Alumínio usinado	Alumínio fundido, madeira, gesso, espuma sintática, metal branco
Resfriamento do molde	Controlado ativamente	Ativo e sem para o protótipo
Resfriamento da superfície livre	Usualmente ambiente	Ar forçado, névoa, neblina
Aspectos de corte	Regra de aço, matriz forjada, rolamento de aro	Roteamento de multieixos
Nível de corte fora do produto	Cerca de 50%	Menos de 20%
Tolerância da grossura da parede normal	20%	20%
Tolerância da grossura da parede fina	10,00%	10,00%
Pressão da formação aplicada	Desenho profundo, borda formada	Desenho formado, superfícies texturizadas

Fonte: Adaptado de James L. Throne (2008)

Há também uma categorização do tipo de termoformagem atribuído pelo número de passos necessários para a confecção do material termoformado, sendo de uma etapa, duas etapas e três etapas, além de dois outros métodos denominados de formação por folhas duplas e por contato. Dentro dos métodos que executam o processo em um etapa estão os métodos de formação forçada, a vácuo, livre, de aquecimento não uniforme, moldes correspondentes, autoclave e diafragma. Na categoria executada por duas etapas estão distribuídos nas pré-formações pneumática e mecânica, e as formações por pressão e por forja (JAMES L. THRONE, 2008).

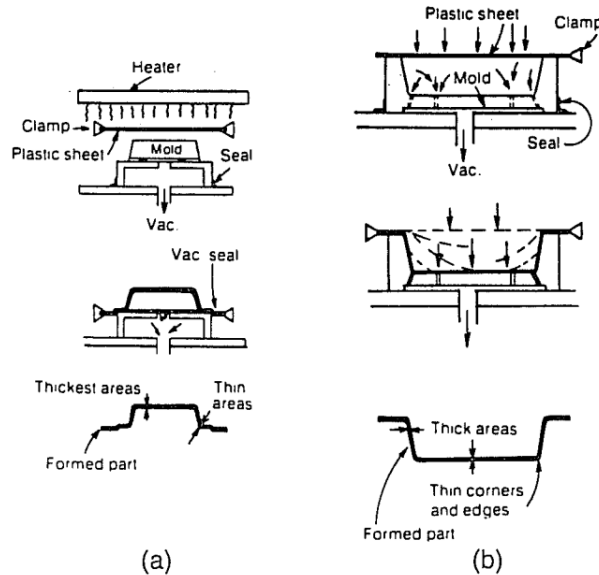
2.1.1 Termoformagem a vácuo

2.1.1.1 Processo

Descrito por Rosato (2004) como um dos processos da termoformagem de produtos plásticos, composto por uma caixa fechada com um molde que molda uma folha plástica aquecida, e quando o ar da caixa é retirado, a pressão atmosférica força a folha sobre o molde. A termoformagem a vácuo é um processo que conforma uma chapa polimérica sobre uma matriz com o auxílio de vácuo, a fim de obter o formato mais similar possível de seu molde. Harold Belofsky (1995) coloca o processo de termoformagem a vácuo como um processo de estágio único, em que uma folha cortada é presa em um quadro, amolecida por uma fonte de calor e sobreposta em um molde frio ainda presa no quadro. A pressão atmosférica acima e o vácuo abaixo são responsáveis por forçar a folha sobre o contorno

do molde. Os tipos básicos de termoformagem a vácuo são representados pelo formato do molde, podendo ser macho ou fêmea, na Figura 1 são representadas ambas as distinções.

Figura 1 – Dois tipos básicos de termoformagem: a) Sobre molde macho com assistência de vácuo. b) Sobre molde fêmea com assistência de vácuo.



Fonte: Harold Belofsky (1995).

Nestas representações encontram-se além do processo em formato visual das definições trazidas, as características dos materiais termoformados, por exemplo, no molde macho a região mais fina será a parte central, devido ao repuxo do material sobre o molde, enquanto no material por molde fêmea a região mais fina será a lateral, com cantos e arestas finas. A grossura da parede formada neste processo pode ser determinada pela seguinte expressão

$$t_f = t_0 \cdot A_0 / A_f \quad (1)$$

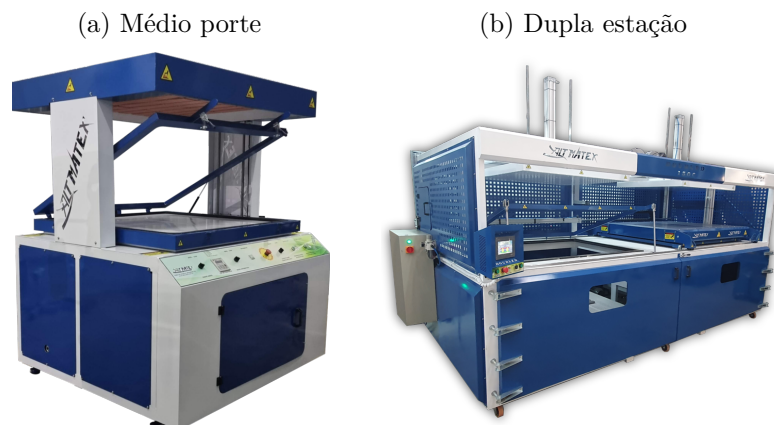
onde t_f representa a grossura final do material termoformado, t_0 a grossura inicial da folha, ou chapa polimérica, A_0 e A_f , sendo a área do material inicial e a área do material final, respectivamente. Assim, é possível projetar ou determinar diversos fatores desejados e prever as demais variáveis (HAROLD BELOFSKY, 1995).

2.1.1.2 Equipamentos

O processo de termoformagem é executado por uma termoformadora, que depende de diferentes características esperadas para o produto final. Alguns tipos de termoformadoras comercializadas para âmbito profissional estão disponíveis na Figura 2.

Nestas máquinas é possível observar as características diferentes de cada uma delas, principalmente o que envolve a movimentação do quadro de transporte da chapa polimérica. Na Figura 2a o movimento é vertical, implicando no processo de aquecimento,

Figura 2 – Termoformadoras a vácuo.



Fonte: Altmatrix (2023).

que é superior. Na Figura 2b este movimento é horizontal, o processo de aquecimento é realizado em um dos lados, e transportado horizontalmente até o molde que é conformado de baixo para cima (contrário do exemplo anterior).

2.1.1.3 Termoplásticos

São empregados diversos materiais como insumo no desenvolvimento de produtos nos vários tipos de termoformadoras, uma ampla variedade de termoplásticos. De acordo com Sebastião V. Canevarolo Jr. (2017) os plásticos são parte de uma classificação de comportamento mecânico dos polímeros, sendo os termoplásticos materiais que amolecem e fluem com um aumento de temperatura e pressão, e que solidificam com a retirada destes efeitos, adquirindo a forma do molde. Este processo pode ser reiniciado, ou seja, é um material reciclável e reutilizável. Outras características dos termoplásticos são a solubilidade e o formato de suas cadeias, podendo ser linear ou ramificada, como por exemplo: Poliestireno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), entre outros.

Além da classificação quanto ao comportamento mecânico, há também uma separação quanto ao desempenho mecânico dos polímeros, possuindo a seguinte composição: Termoplásticos convencionais (commodities), termoplásticos especiais, termoplásticos de engenharia (TE) e termoplásticos de engenharia especiais. Os convencionais tratam de polímeros de baixo custo e com uma baixa exigência mecânica, representando a maior porcentagem da produção total, cerca de 90%. Já os especiais possuem um custo pouco superior se comparados aos termoplásticos convencionais, mas que possuem características um pouco melhores, tendo como exemplo o etileno-acetato de vinila (EVA) e o estireno-acrilonitrila (SAN). Os termoplásticos de engenharia são empregados para confecção de dispositivos mecânicos, onde exige-se uma certa rigidez, uma boa tenacidade e estabilidade dimensional, dentre os materiais desta classificação estão as poliamidas, os poliacetais, policarbono (PC), o chamado ABS (copolímero de estireno-butadieno-acrilonitrila),

PPO (polioxi-fenileno) e os polímeros termoplásticos como polietileno-tereftalato (PET) e polibutileno-tereftalato (PBT). Finalização esta classificação tem os termoplásticos de engenharia especiais, que possuem uma estabilidade térmica para uso acima de 150°C, visto a grande quantidade de anéis aromáticos em sua cadeia principal, dentre eles tem-se os polímeros que contêm enxofre, poliimidas, poliuretanos, polieter-eter-cetona(PEEK) e os polímeros de cristal líquido polimérico (SEBASTIÃO V. CANEVAROLO JR., 2017).

Ademais, a termoformagem de plásticos amorfos é considerada mais fácil de controlar do que as que envolvem plásticos de alta cristalinidade, já que permitem uma faixa mais ampla da temperatura de operação. Segundo Harold Belofsky (1995) estão entre os materiais de utilização mais fácil os seguintes materiais:

- estirenos e copolímeros de estireno, como ABS;
- acrílicos, como o polimetilmetacrilato (PMMA);
- celulósicos, como acetato butirato de celulose (ABC);
- policarbonatos e seus copolímeros;
- PVC plastificados e algumas de suas misturas;
- ligas de PC/PET;
- grades de poliolefinas e nylons.

2.2 CONTROLES E ACIONAMENTOS

2.2.1 Temperatura

O controle de temperatura é empregado em sistemas que possuem fontes de calor e necessitam manter uma determinada faixa de temperatura, a qual influencia diretamente no resultado final do processo. A utilização de um controlador de temperatura (Figura 3) permite o ajuste preciso dos valores desejados. Esses controladores são amplamente utilizados em diversos tipos de equipamentos, além das termoformadoras, como muflas, estufas, fornos, entre outros. O controlador é um dispositivo responsável por interpretar os sinais elétricos provenientes dos sensores e convertê-los em valores de temperatura, além de comandar a fonte de calor para que opere dentro da faixa estabelecida.

Figura 3 – Controlador de temperatura.



Fonte: Novus (2023).

O modelo em questão é um controlador de temperatura de uso geral, amplamente aplicado na indústria devido à sua confiabilidade, precisão e baixo custo, o que o torna uma solução viável, especialmente quando se considera o desempenho em relação ao investimento. Para aplicações mais simples, que operam dentro de faixas de temperatura menos rigorosas e toleram certa instabilidade térmica, pode-se empregar o modo de controle automático do tipo liga/desliga (on/off), que também está disponível neste dispositivo. Uma representação do sistema de controle de temperatura, com a inserção de um controlador na malha de controle, pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 – Elementos de um sistema de controle de malha fechada.

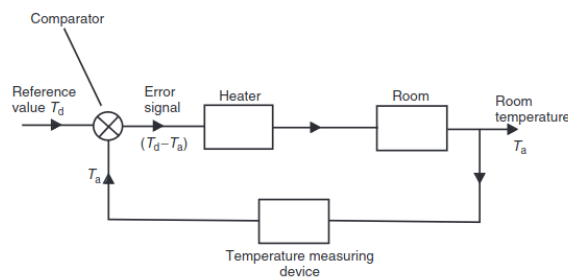


Figure 1.2
Elements of a simple closed-loop control system.

Fonte: Adaptado de Morris e Langari (2015).

No diagrama adaptado tem-se um caso de controle de temperatura de um quarto, mas que pode ser generalizado para outros casos similares. Descrevendo o processo, T_a que é a temperatura da sala é medida pelo dispositivo medidor de temperatura que realimentará este valor ao sistema, possibilitando determinar o erro, tendo em vista a comparação com o valor T_d que é a referência, este valor de erro permite o controlador ajustar as perdas do processo para garantir que a temperatura esteja mais próxima do valor desejada, assim em um ciclo de realimentação de valores e correção da temperatura do aquecedor.

2.2.2 Sensores

Um controlador de temperatura precisa de um dado, uma entrada de um valor de temperatura para poder operar. Esses valores são conferidos por sensores de temperatura, dispositivos que justamente determinam esta faixa. Vários tipos de sensores podem ser encontrados e são empregados por suas características, como termopares, termistores e de termorresistência (MORRIS; LANGARI, 2015).

No diagrama da Figura 5 é possível visualizar onde são aplicados os sensores de um sistema de medição. Uma determinada variável é medida através de um sensor, o dado é então convertido, processado e transmitido, possibilitando o seu armazenamento ou sua representação, a saída deste valor. No caso do uso de sensores para o controle de

temperatura na termoformagem, é nessa ponta do diagrama que estaria o controlador de temperatura, o qual aciona a resistência.

Figura 5 – Elementos de um sistema de medição.

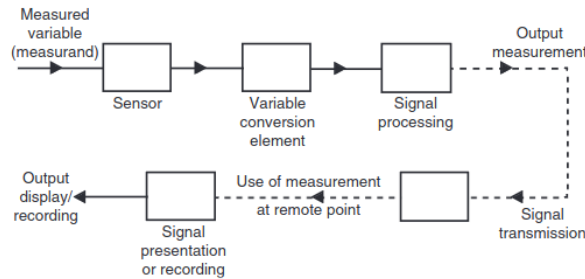


Figure 1.1
Elements of a measuring system.

Fonte: Morris e Langari (2015).

Os termopares são sensores baseados no princípio físico da geração de um campo eletromagnético proveniente do aquecimento de dois metais. Este campo magnético é então equivalente ao produto da temperatura absoluta e um coeficiente.

Há uma grande variedade de tipos de termopares, que variam conforme a combinação dos metais empregados em sua confecção. Os autores Morris e Langari (2015) trazem uma distinção entre termopares feitos de metais e termopares feitos de metais nobres. Dentre os termopares de metais mais comuns estão o Tipo E (cromel-constantan), Tipo J (ferro-constantan), Tipo K (cromel-alumel), Tipo N (nicrosil-nisil) e o Tipo T (cobre-constantan). Cada um deles possui características distintas como sensibilidade e faixa de temperatura de operação, dispostas na tabela 1.

Tabela 1 – Sensibilidade e faixa de temperatura dos diferentes tipos de termopares

Termopar	Sensibilidade	Faixa de temperatura
Tipo E	68 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	-200 $^{\circ}\text{C}$ a 900 $^{\circ}\text{C}$
Tipo J	55 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	-40 $^{\circ}\text{C}$ a 750 $^{\circ}\text{C}$
Tipo K	41 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	700 $^{\circ}\text{C}$ a 1200 $^{\circ}\text{C}$
Tipo T	43 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	-200 $^{\circ}\text{C}$ a 350 $^{\circ}\text{C}$
Tipo N	39 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	acima de 1300 $^{\circ}\text{C}$

Fonte: Morris e Langari (2015).

Compõem a classificação de termopares de metais nobres os tipos B, R, S (platina - ródio-platina ródio) feitas com diferentes composições no percentual de ródio. Os tipos C, D, G (tungstênio- tungstênio rênio) com variações na composição de rênio na liga de tungstênio-rênio. O Tipo K (paládio - platina-ouro). E outros tipos baseados na composição dos termopares, como cromel e liga de ouro-ferro, irídio-ródio, ouro-platina e platina-paládio.

Há uma outra classificação de sensores de temperatura, os baseados no princípio físico da variação de resistência com a temperatura. O material de confecção do dispositivo designa a nomenclatura empregada, sendo metal os sensores de termorresistência e os termistores no caso de ser feito de semicondutores.

Os termoressistores são citados por Morris e Langari (2015) como RTD (resistance temperature device), e são feitos por poucos metais, platina, cobre e níquel por exemplo. A principal vantagem destes sensores é a precisão de medições abaixo de 600°C, sendo normalmente a escolha para esta faixa de temperatura. Conforme as faixas de operação são extrapoladas o erro é aumentado, mas chega a certa de $\pm 1,2\%$ mesmo acima de 1000°C. A relação de resistência e temperatura proposta pelo princípio destes sensores possibilita uma faixa de operação entre -200°C e 40°C com variações de $\pm 0,4\%$, e nesta faixa a relação é linear.

A faixa de operação dos termoressistores baseados em platina está entre -270°C e 1000°C, de cobre entre -200°C e 260°C, de níquel entre -200°C e 430°C, tungstênio entre -270°C e 1100°C e de carbono está entre -273°C e -173°C.

Já os termistores são feitos de materiais semicondutores, os tipos são PTC (positive temperature coefficient) e NTC (negative temperature coefficient), que correspondem respectivamente a coeficientes positivos e negativos de temperatura. Estes tipos de sensores são ditos de baixo custo e pequenos, o que possibilita uma ampla aplicação em dispositivos eletrônicos, mas o tamanho menor impacta na área de dissipação de calor, o que consequentemente aumenta o efeito de aquecimento (MORRIS; LANGARI, 2015).

Dispositivos semicondutores e termômetros de radiação também conferem a possibilidade de medir temperatura, cada um com seu princípio de funcionamento. Com grande utilização, como um exemplo, tem os sensores de circuito integrado(CI) como o LM35, com formato similar a um transistor, facilitando o uso em placas "protoboard" e protótipos.

A gama de sensores para medição de temperatura é ampla, variando em diversos aspectos, princípios de funcionamento, composição, construção, adequação, faixa de operação, sensibilidade e custo. Cabe a cada projeto selecionar qual o tipo mais adequado a cada situação, baseado nas especificações e nos objetivos perante as necessidades.

2.2.3 Arduíno

O Arduíno é um microcontrolador de baixo custo que permite a programação em uma versão simplificada do C++ através de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE)(STEVAN JR; SILVA, 2015).

Na IDE do Arduíno é escrito o código, que será compilado e carregado para a placa. Permite ao usuário carregar bibliotecas e realizar configurações na placa de acordo com o modelo empregado.

Tratando do Arduino Uno que é um dos modelos mais populares e de fácil acesso no mercado, esta placa é baseada no ATmega328P, e possui cerca de 14 conexões de

entradas e saídas digitais, 6 entradas analógicas, um ressonador de cerâmica de 16 MHz, além de um conector USB, e um conector de energia (ARDUINO, 2025). De acordo com o próprio site do Arduíno o chip pode ser substituído facilmente em uma situação em que tiver problemas na utilização, destacando a característica de baixo custo atribuída ao chip de processamento. Possui memória interna com 32KB FLASH, 2KB de SRAM e 1KB de EEPROM.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na seção de materiais e métodos serão apresentados os instrumentos e as metodologias empregadas para o desenvolvimento da termoformadora a vácuo, como os softwares para modelagem estrutural e elétrica, os materiais de construção e como eles serão utilizados.

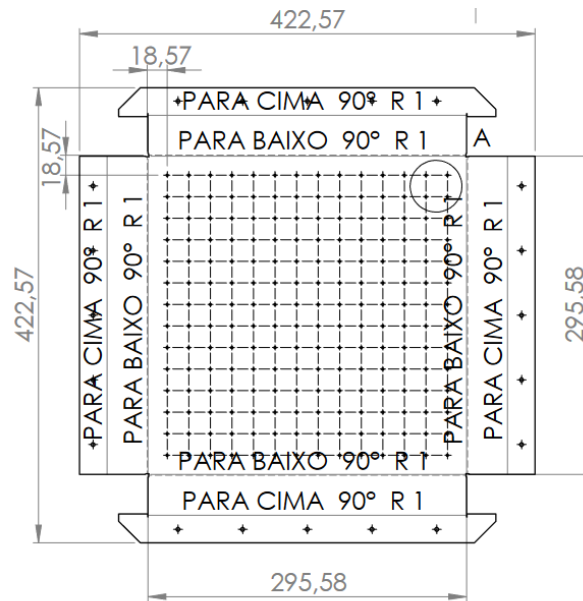
3.1 PROJETO ESTRUTURAL

Para projetar a parte estrutural do maquinário, e tornar possível visualizar e realizar adaptações foi utilizado o *SolidWorks*, software CAD que permite uma visualização 3D dos desenhos feitos. Nele é possível obter arquivos que permitem o corte de chapas metálicas diretamente do mesmo projeto, o que torna a escolha essencial para a confecção do protótipo e também para qualquer implementação em maior escala, tornando o projeto replicável e customizável. A seguir serão apresentados os elementos do projeto estrutural da termoformadora: base, invólucro de vácuo, suportes laterais e cobertura. A confecção das estruturas utilizam a função de chapas disponível no CAD, atribuindo medidas e adaptando com valores ideais, ressaltando que as medidas de todos os desenhos são expressos em milímetros(mm). A partir da função de planificação do software é obtido o desenho tridimensional, quando este é planificado mostram-se componentes de dobras, presentes nas representações bidimensionais. As informações de corte, dobra e as medidas são orientativas para a confecção física dos modelos apresentados.

3.1.1 Invólucro de vácuo

O invólucro que comporta o vácuo não deve permitir nenhuma passagem da região interna com a parte externa além das furações da superfície, responsáveis pela conformação do termoplástico sobre o molde. O desenho bidimensional do invólucro pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Desenho bidimensional planificado da caixa de vácuo.

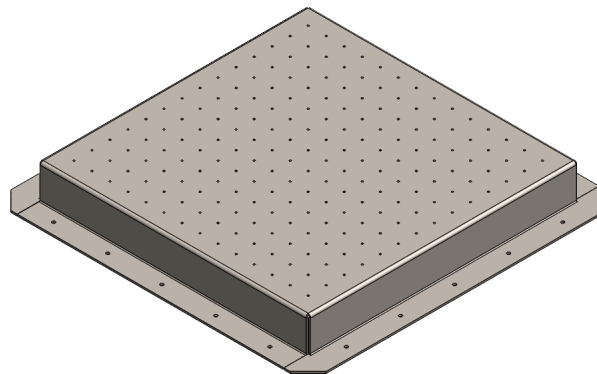


Fonte: Autor (2025).

Nesta figura está representado as 8 dobras necessárias para o processo de construção física, as diversas furações da superfície e as medidas de corte.

A representação tridimensional desta peça está disponível na Figura 7.

Figura 7 – Representação tridimensional da caixa de vácuo.

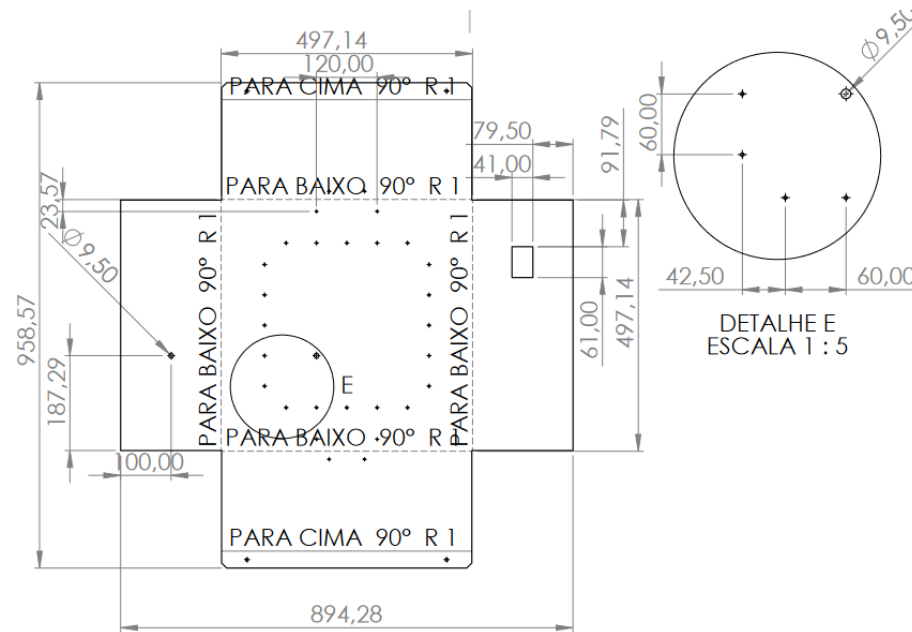


Fonte: Autor (2025).

3.1.2 Base

As medidas do invólucro de vácuo representam uma referência à outras componentes do projeto, como a base do equipamento (Figura 8), que comportam a parte elétrica, composta pela fonte, controlador, motores, drivers e os fios, além de comportar a ligação de tubos que conectam a caixa com a bomba de vácuo.

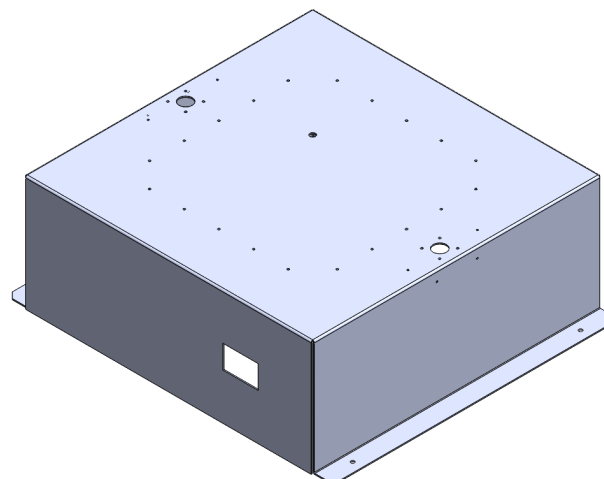
Figura 8 – Desenho bidimensional planificado da base.



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 9 encontra-se a representação tridimensional desta parte, onde é possível observar além das dobras, as furações para os motores e parafusos, com o furo na região central que conecta a bomba de vácuo ao invólucro vedado.

Figura 9 – Representação tridimensional da base.

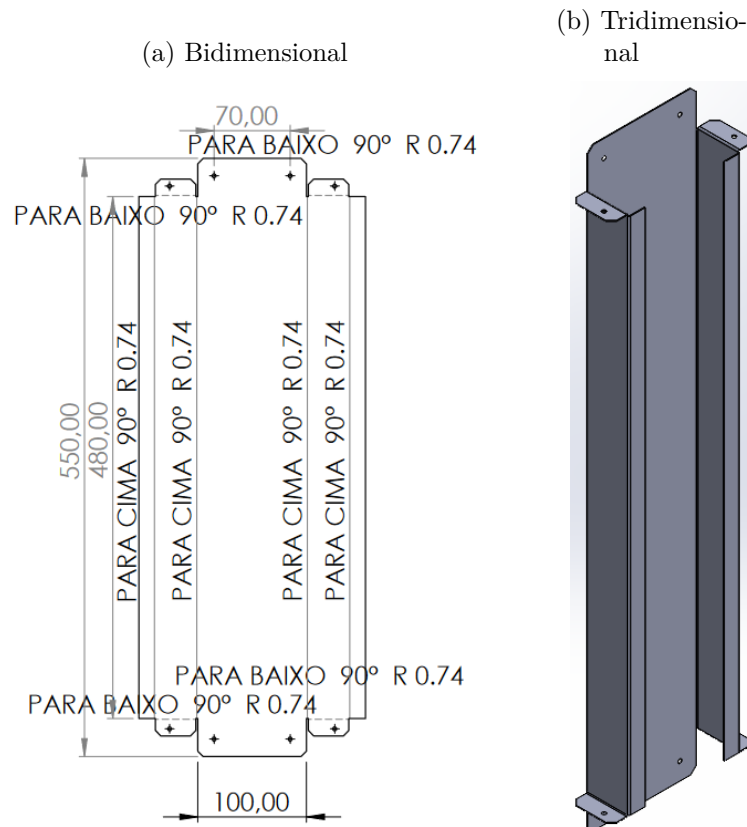


Fonte: Autor (2025).

3.1.3 Suportes laterais

Sobre a base são parafusados o invólucro de vácuo e as chapas laterais (Figura 10a) que devem garantir estrutura e servir como segurança para o mecanismo que transporta o quadro da chapa polimérica. A representação tridimensional das laterais estruturais pode ser vista na Figura 10b.

Figura 10 – Estruturas laterais.

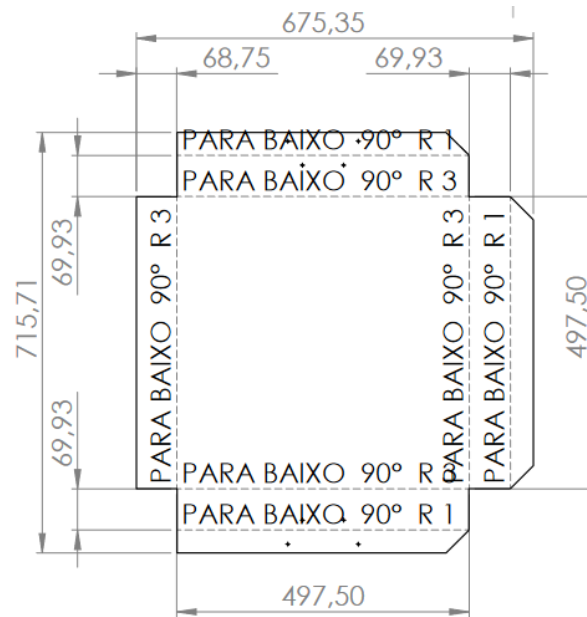


Fonte: Autor (2025).

3.1.4 Cobertura

A cobertura deve ser projetada para contemplar as mesmas medidas de comprimento e largura da base, e permitir que as estruturas laterais se encaixem. Além destas características, a cobertura abriga a fonte de aquecimento do equipamento. A seguir está representado bidimensionalmente a cobertura na Figura 11:

Figura 11 – Desenho bidimensional planificado da superfície.

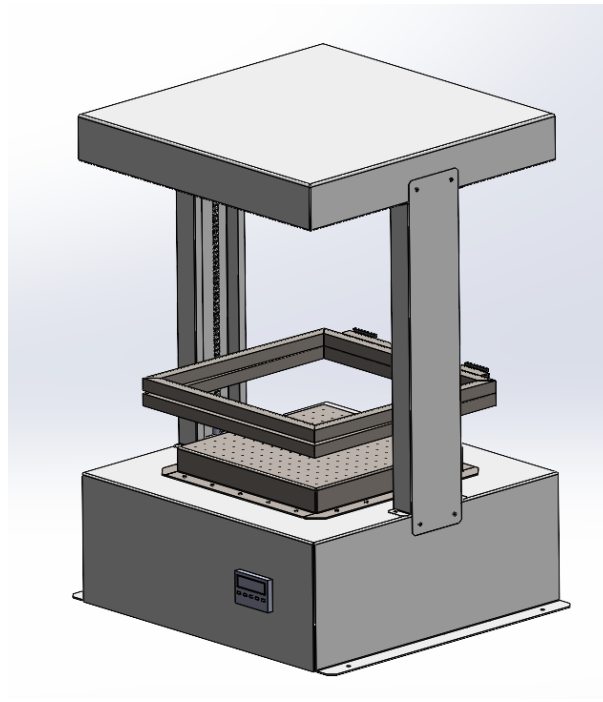


Fonte: Autor (2025).

3.1.5 Projeto Termoformadora

A partir dos projetos realizados, todas estas componentes devem ser parafusadas com um parafuso M3, M4 e M5 resultando na estrutura física da termoformadora de bancada, o projeto com as medidas se encontra na Figura 12.

Figura 12 – Termoformadora montada.



Fonte: Autor (2025).

Nesta representação tridimensional do projeto da termoformadora foram empregadas outras peças como o quadro que transporta o material polimérico. Esta parte encontra-se incompleta na montagem devido a utilização de componentes que não foram projetados, como o engate rápido.

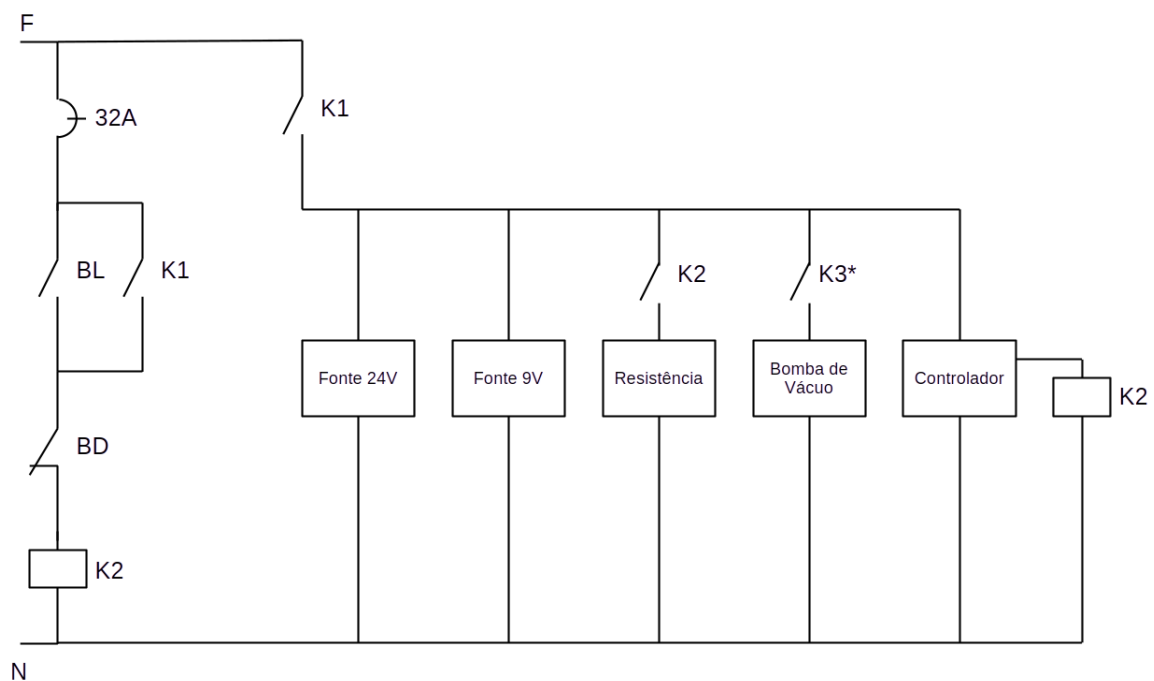
3.2 PROJETO ELETROELETRÔNICO

Na parte elétrica, os esquemas foram desenvolvidos em ferramentas como o Libre-Office Draw. A programação do microcontrolador foi feita pela IDE do Arduino.

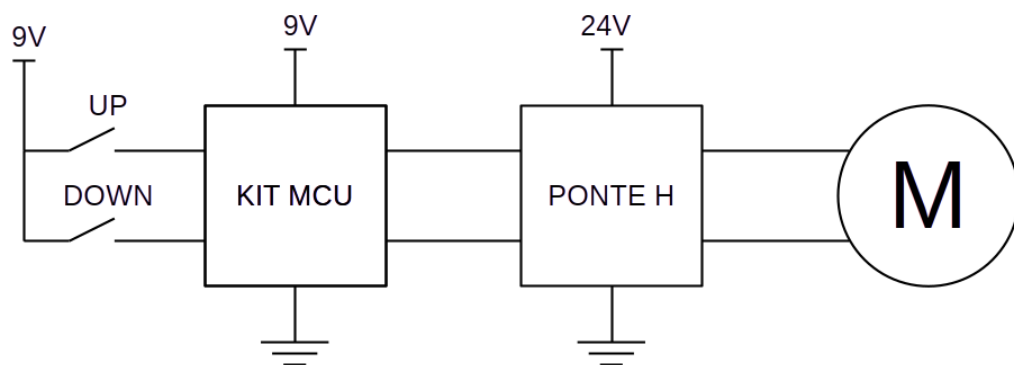
O projeto elétrico contempla: uma fonte de 24V, um controlador, dois motores DC 24V de 20000rpm, um driver, um microcontrolador, botões e um termopar tipo K. Uma visão ampla deste projeto é disposta na Figura 13, onde estão presentes as conexões de comando e de acionamento (Figura 13a) e o diagrama motor (Figura 13b).

Figura 13 – Diagramas

(a) Diagrama de acionamento



(b) Diagrama motor



Fonte: Autor (2025).

Nestas conexões estão dispostas as relações entre os componentes do projeto, como a fonte que é conectada ao contator K1, e este ao disjuntor responsável por desligar o sistema caso haja sobrecorrente, afim de servir como um dispositivo de segurança. A fonte de 24V alimenta os motores e o driver de ponte H. A fonte de 9V energiza o Arduíno, que por sua vez fornece energia elétrica para uma botoeira, e neste caso, retorna o sinal para o próprio Arduíno, indicando o pressionamento do usuário e realizando a ação correspondente programada. Enquanto a alimentação da resistência é controlada por um relé (K2) controlador de temperatura. A bomba de vácuo é ligada no contator K1 e é acionada por K3, um chaveamento próprio da bomba, a ser ligada manualmente, .

O código que implementa a lógica de programação do Arduíno pode ser visualizado no apêndice A. Neste código, são definidas as variáveis "RPWM" e "LPWM", "SOBE" e "DESCE". Através do comando SOBE e DESCE são controlados os movimentos dos motores. Note que, quando lido "SOBE" o RPWM possui velocidade 10 e LPWM possui 0, enquanto que "DESCE" representa o inverso desta lógica. Sobe e desce representam as entradas lidas das botoeiras, e implementadas com "if" para a mudança das escritas nas portas analógicas conectadas com o driver de ponte H.

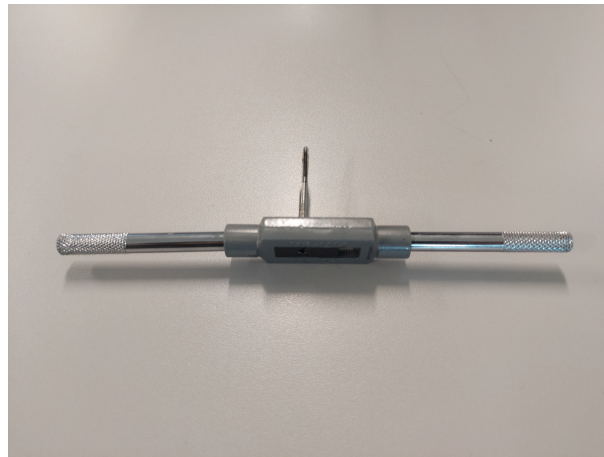
Devem ser levados em consideração na programação do microcontrolador: os motores, o driver e o fuso utilizado. Portanto, os valores empregados podem ser alterados conforme a necessidade de velocidade e de tempo do processo.

Tratando do projeto elétrico, serão consideradas algumas soluções atribuídas a diversidades e limitações do projeto. Como, por exemplo, o dimensionamento da componente de aquecimento, que é dada por sua potência. A resistência a ser utilizada possui 750 W e é alimentada por 220 V (resistência tubular de forno elétrico), sendo assim, a corrente necessária para alimentar essa fonte de calor seria aproximadamente de 3,41 A.

3.3 MONTAGEM

A montagem de todo o equipamento é a mescla do que foi projetado da estrutura com o que foi projetado para a parte elétrica e eletrônica, compondo assim uma máquina funcional. Para a confecção das roscas dos parafusos foram empregados o uso de um cossinete com macho M3, vistos na Figura 14.

Figura 14 – Cossinete e macho M3.



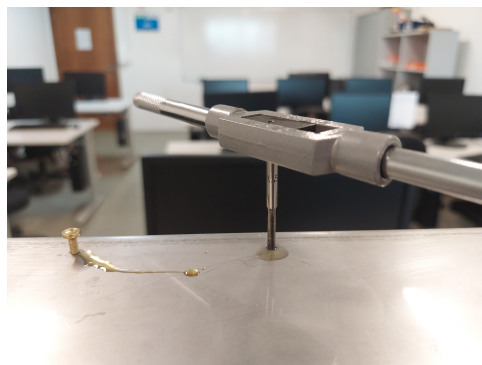
Fonte: Autor (2025).

Visto a utilização de macho M3, também será empregado o uso de 36 parafusos M3, roscas e porcas referentes.

Ao todo, cinco placas metálicas de aço inox com dimensões diversas serão necessárias para a confecção da estrutura, conforme já visto no capítulo referente ao projeto estrutural (Seção 3.1). Estas chapas possuem espessura de 2mm previamente cortadas a laser e cada parte sendo soldada por eletrodos específicos para aço inox.

A seguir temos algumas imagens que representam os passos realizados para a junção de tudo que foi feito no projeto. A junção das partes foi feita com parafusos M3, e para tal foi realizada a confecção das roscas nos furos, um dos exemplos é a feita na parte base (Figura 15).

Figura 15 – Confecção das roscas na caixa base.

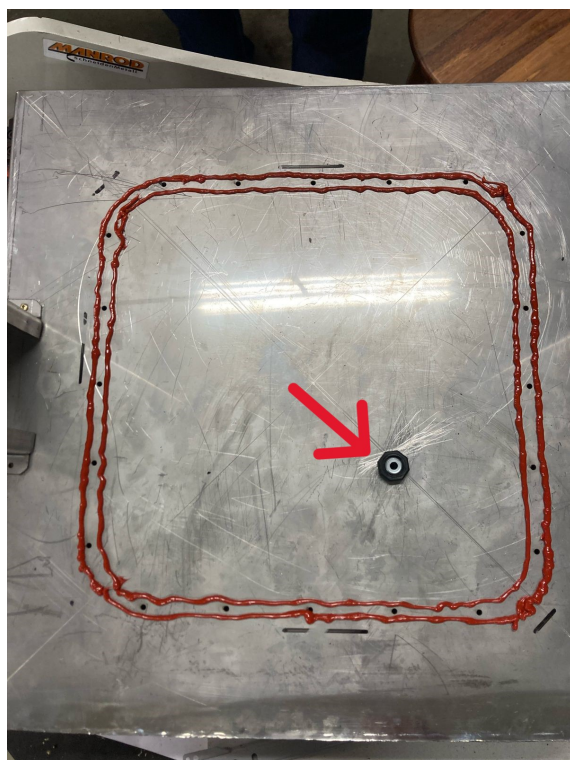


Fonte: Autor (2025).

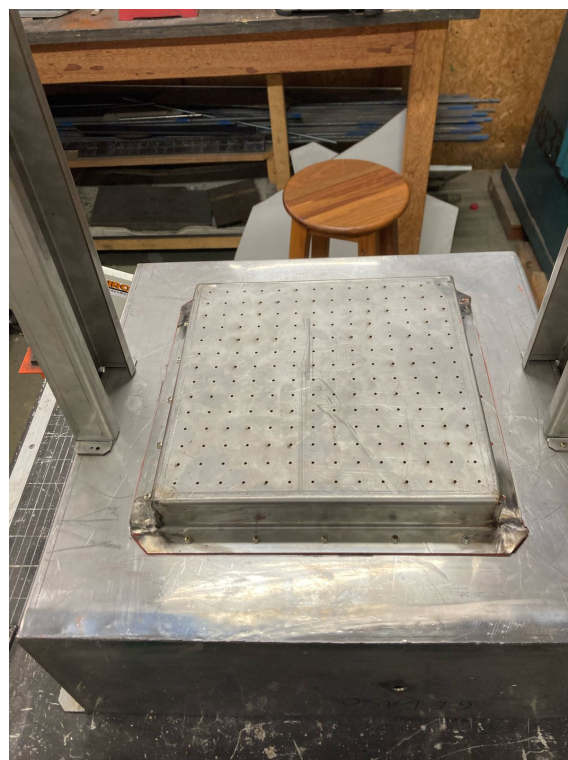
Na etapa de montagem da base com o invólucro de vácuo é aplicado silicone em todas as laterais, para vedar o invólucro com a caixa (Figura 16a). Na superfície da base, o espigão é conectado para propiciar a ligação da bomba de vácuo que pode ser visto indicado em vermelho também na Figura 16a e parafusada à base (Figura 16b).

Figura 16 – Montagem do invólucro com a base

(a) Aplicação do silicone na base.



(b) Invólucro de vácuo acoplada a base.



Fonte: Autor (2025).

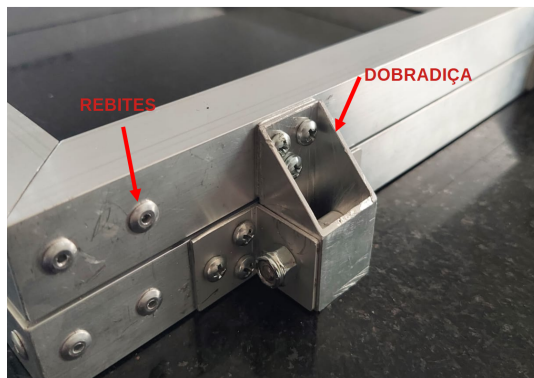
Separadamente é feito o acoplamento da resistência (tubular) e do sensor termopar do tipo K na parte superior do equipamento (Figura 17), e sucedido de sua montagem sobre as bases laterais já aparafusadas à base.

Figura 17 – Resistência montada.

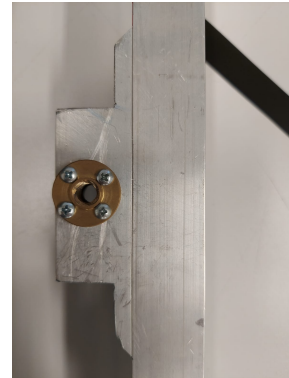


Fonte: Autor (2025).

O quadro de transporte foi feito em alumínio, com recortes de tubos de 1 polegada, tendo juntas rebitadas com cantoneiras de alumínio. As duas partes do quadro são unidas por dobradiças, que também são feitas com os mesmos materiais cortados, permitindo a abertura, conforme o projeto do equipamento (18a). Na lateral deste quadro foram colocados espaçadores que possuem um furo passante, o qual permite a colocação da castanha, conforme Figura 18b.



(a) Quadro de alumínio.



(b) Castanha acoplada ao quadro.

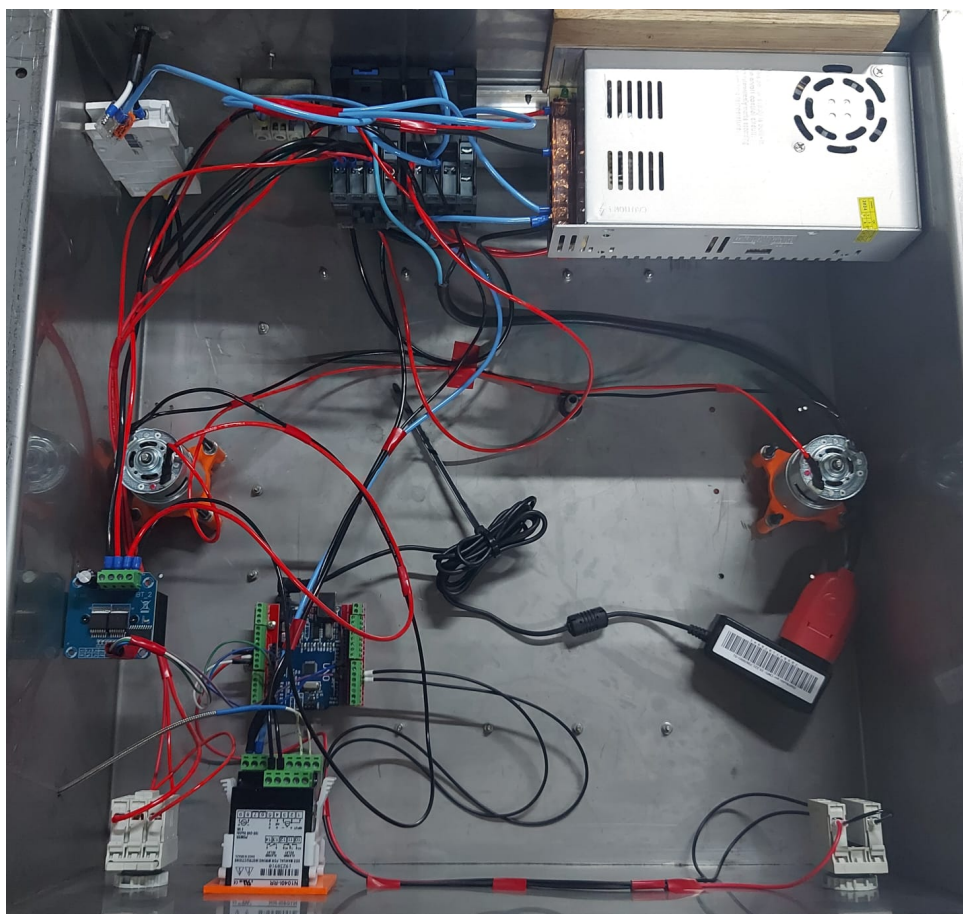
Figura 18 – Montagem do quadro
Fonte: Autor (2025).

O quadro representa a junção dos fusos, permitindo, a partir das castanhas transformar a rotação dos motores em movimentos verticais da chapa polimérica.

As instalações elétrica e eletrônica, assim como foi projetado, foram montadas dentro da base do equipamento (Figura 19), conforme descrito na seção 3.2.

Os motores são montados com suportes na base do equipamento e acoplados os fusos de movimentação através de acopladores de 5mm (eixo do motor) para 8mm (fuso). O driver é conectado com os motores e alimentados com 24V, sendo controlados pelo arduino que recebe alimentação de uma fonte 9V 1A, conectada à tomada e aos sinais de comando. Estão presentes o contator para ligar e desligar a máquina, o contator para o controle de temperatura, e o próprio controlador de temperatura.

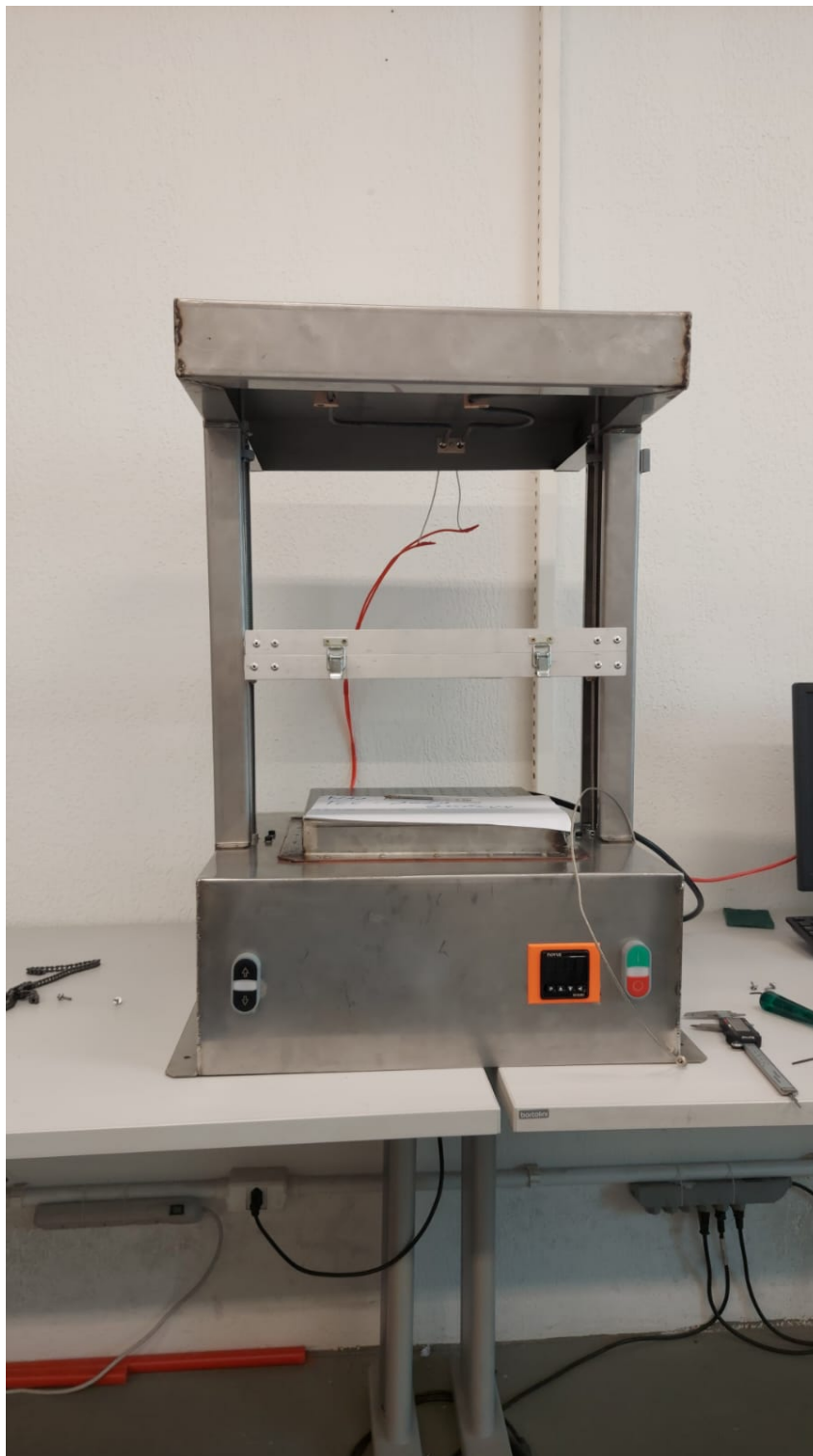
Figura 19 – Instalação eletroeletrônica



Fonte: Autor (2025).

O resultado final da montagem das partes mecânica e elétrica é visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Termoformadora



Fonte: Autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL E ELÉTRICA

O projeto foi desenvolvido visando utilizar os desenhos, para poder construir através de chapas cortadas a laser, para tornar mais fácil e mais rápida a montagem. Mas diversas furações tiveram que ser refeitas, atribuídas aos processos de dobras e soldas que não foram eficientes em garantir o posicionamento projetado. Portanto, para confeccionar a montagem completa do equipamento, foram realizadas furações e cortes nas chapas para permitir o encaixe correto e também foram feitas furações para colocação de botoeiras (não contempladas na fase de projeto), para realizar os comandos necessários.

O equipamento traz robustez devido a chapa de 2mm de aço inox utilizada na sua construção, que acarretou em um peso elevado atribuído ao tipo de material e a quantidade usada nesta espessura. É interessante o aço inox para construção de equipamentos, principalmente industriais envolvidos em ambientes severos, mas se tratando de um protótipo que teve de ser manejado diversas vezes para a confecção do projeto não se mostrou a escolha ideal neste caso.

Uma espessura menor ou até mesmo a escolha de outro material como o alumínio, que permitiriam a mesma aplicação, mas trariam a vantagem de serem mais leves e mais fáceis de perfurar e de montar, podendo garantir as mesmas características desejadas para este equipamento. Fruto desta conclusão é na revisão deste trabalho, não ter sido visualizado outros equipamentos da mesma natureza utilizando este material, vide Capítulo 2.1.1.2 e os trabalhos utilizados como fonte.

A escolha do material implicou em problemas nas dobras, nos cortes e nas furações, dificultando também as adaptações e correções necessárias, como no caso da montagem, que foi projetada para que as furações fossem passantes e colineares, mas que na prática foram deslocadas pelas dobras, fazendo com que os parafusos pudessem ser parafusados. O efeito disso foi o retrabalho das furações e onde novamente sentiu-se a dificuldade de trabalhar com o aço inox nesta espessura.

A montagem da parte elétrica foi desenvolvida dentro do equipamento, como visto no Capítulo 3.2, tendo em vista a facilidade por questão de espaço e os próprios componentes empregados que facilitavam esta opção.

Novamente tornou-se uma escolha questionável na construção do equipamento e na manutenção da parte elétrica e eletrônica. A construção de um painel externo é comum em equipamentos industriais, ou pelo menos, aberturas que possibilitem a manutenção, assim como também é visualizado no capítulo 2.1.1.2. Portanto o equipamento desenvolvido neste trabalho não contempla as normas regulamentados NR10 e NR12, referentes respectivamente a "Instalações e Serviços de Eletricidade" e "Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos". Esses pontos não foram contemplados para o desenvolvimento deste trabalho, mas devem ser considerados para futuros trabalhos de equipamentos elétricos.

Ademais, o uso do disjuntor de 32A mostrou-se eficiente, permitindo o funcionamento do equipamento e de seus componentes internos. Assim como a fonte de alimentação de 720W e 30A, que permitiu a alimentação dos motores e do driver.

4.2 PRODUTO TERMOFORMADO

Após a montagem do equipamento foi possível realizar testes, confeccionando produtos termoformados, visando analisar o resultado dos mesmos. Para isso, foram utilizados dois moldes (Figura 21) para avaliar o resultado em tipos de moldes distintos, uma mais simples e com poucos detalhes (direita) e outro mais complexo (esquerda), com cantos aparentes.

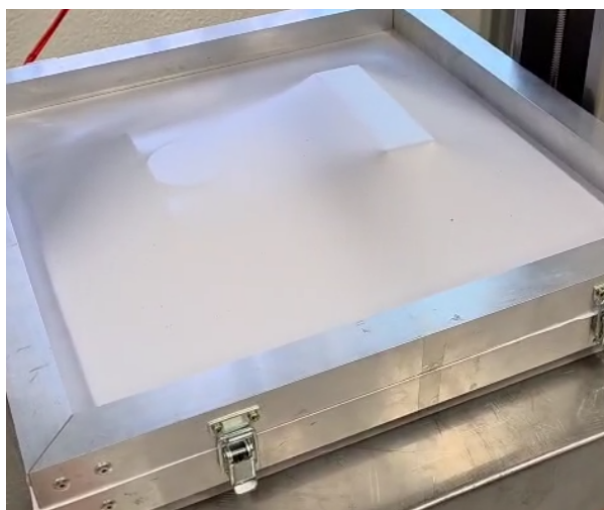
Figura 21 – Moldes para termoformagem.



Fonte: Autor (2025).

A máquina foi configurada para atender a 125°C e teve um tempo de exposição da chapa polimérica de 5 minutos. O resultado dos produtos termoformados pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Moldes para termoformagem.



Fonte: Autor (2025).

Verificou-se que com as duas peças sobre o invólucro o sistema não foi eficiente, não tendo capacidade para sucção e deformação da chapa. Realizou-se um segundo experimento com apenas uma das peças (Peça com maiores detalhes), foram utilizados os mesmos parâmetros de temperatura e tempo de exposição, porém também não obteve-se êxito na sucção e deformação, conforme pode ser visto na Figura 23

Figura 23 – Moldes para termoformagem.



Fonte: Autor (2025).

O produto termoformado apresenta o formato do molde, mas não os detalhamentos. É observado também a presença de nervuras aparentes, não corrobora em um produto bem acabado.

4.3 ANÁLISE CRÍTICA DO PROCESSO DE TERMOFORMAGEM E LIMITAÇÕES EXPERIMENTAIS

Ao submeter a chapa polimérica ao processo de termoformagem, observou-se que, embora o equipamento tenha operado conforme o projetado em seus subsistemas de controle, o resultado final da conformação da peça não atingiu a qualidade esperada. A chapa, após aquecida, não foi succionada contra o molde com força suficiente para replicar com precisão os detalhes, resultando em um produto com deformações rasas e pouca definição.

A análise do processo prático revelou que este resultado insatisfatório é fruto de uma combinação de dois fatores críticos: a perda de calor durante o transporte da chapa e a ineficiência do sistema de vácuo. Primeiramente, foi identificada uma perda térmica significativa no intervalo de tempo entre o fim do aquecimento e o posicionamento da

chapa polimérica sobre a câmara de vácuo. O deslocamento vertical, embora rápido, expôs a chapa aquecida à temperatura ambiente, fazendo com que ela perdesse parte de sua plasticidade ideal antes mesmo do acionamento da sucção. Em uma tentativa de mitigar este efeito, foi necessário improvisar um isolamento térmico ao redor da área de operação com lâminas de papelão, o que confirmou a sensibilidade do processo à convecção de ar e à perda de calor.

Em segundo lugar, e agravando o problema da perda térmica, a bomba de vácuo utilizada demonstrou ter uma potência e uma vazão (capacidade de deslocamento de ar) insuficientes para evacuar o ar retido entre a chapa e o molde de forma vigorosa. No processo de termoformagem, a velocidade com que a pressão diferencial é estabelecida é crucial. Um vácuo fraco ou lento demais, combinado com uma chapa que já chega à base com temperatura abaixo do ideal, torna a conformação completa praticamente impossível. O polímero já em processo de enrijecimento não cede à sucção, impedindo a reprodução de detalhes finos, cantos vivos e geometrias complexas.

Este resultado, embora não ideal, é de grande valor para a validação e o aprimoramento do projeto. Ele evidencia que o sucesso da termoformagem depende de um balanço delicado entre a manutenção da temperatura e a potência do vácuo. A experiência prática demonstrou que a especificação da bomba e o isolamento térmico do sistema não são fatores secundários, mas sim pilares para a repetibilidade e qualidade do processo. Portanto, a ineficiência na termoformagem não invalida o projeto estrutural ou de controle, mas expõe limitações que são inerentes ao design e aos componentes escolhidos. O protótipo cumpriu seu objetivo de integrar os sistemas e validar o conceito geral.

Para trabalhos futuros, as recomendações se concentram em duas frentes: Otimização do Sistema de Vácuo: Substituir a bomba atual por um modelo de maior potência e vazão, dimensionado a partir do volume da câmara. Minimização da Perda Térmica: Estudar a implementação de um invólucro ou câmara mais fechada para o equipamento, utilizando materiais isolantes térmicos (como lã de rocha ou cerâmica) em vez de soluções provisórias. Isso garantiria que a chapa mantenha sua temperatura ótima por mais tempo. Com estas melhorias, espera-se que o equipamento seja capaz de produzir peças de alta qualidade, validando completamente a concepção original do projeto e habilitando a termoformadora para seu uso em atividades de ensino e pesquisa no laboratório LABEX.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a construção de uma termoformadora a vácuo de bancada, um projeto que abrangeu desde o modelamento estrutural e eletrônico até a montagem de um protótipo funcional.

Os objetivos específicos de projetar a estrutura física, desenvolver o sistema eletroeletrônico de acionamento e controle, e implementar os controladores de temperatura foram alcançados com sucesso. O equipamento foi construído com uma estrutura robusta em aço inox de 2mm e seus sistemas elétricos e eletrônicos, incluindo o disjuntor de 32A e a fonte de 720W, mostraram-se eficientes e bem dimensionados para a operação segura dos componentes.

A análise crítica do projeto, no entanto, revelou aprendizados importantes. A escolha do aço inox, embora garanta durabilidade, resultou em um protótipo de peso elevado e dificultou processos de ajuste fino, como furações e dobras. Para futuras versões, materiais como o alumínio poderiam oferecer um balanço mais adequado entre robustez e facilidade de manufatura para um equipamento de escala laboratorial. Similarmente, a montagem dos componentes elétricos dentro da base, embora funcional, apresentou desafios de manutenção que poderiam ser solucionados com a implementação de um painel externo, prática comum em equipamentos industriais.

A fase de testes práticos de termoformagem foi particularmente instrutiva. Os resultados insatisfatórios na conformação das peças permitiram identificar duas limitações críticas no sistema: a perda térmica acentuada durante o deslocamento da chapa polimérica e a baixa potência da bomba de vácuo. Ficou evidente que o sucesso do processo depende de um delicado equilíbrio entre a manutenção da temperatura da chapa e a rápida evacuação do ar. Este diagnóstico não invalida o projeto, mas, ao contrário, fornece um direcionamento claro e fundamentado para futuras otimizações, como a implementação de um melhor isolamento térmico e a substituição da bomba de vácuo por um modelo mais potente.

Ademais, a questão da sincronização dos motores DC, que apresentou incertezas quanto à perda de rotações, destaca outro ponto de melhoria, onde a implementação de um sistema de malha fechada com encoders poderia garantir maior precisão no posicionamento do quadro.

Conclui-se, portanto, que o projeto cumpriu seu propósito fundamental: construir uma plataforma de termoformagem funcional e, mais importante, gerar conhecimento prático e aprofundado sobre os desafios do processo. As dificuldades encontradas não representam falhas, mas sim valiosas lições de engenharia que pavimentam o caminho para aperfeiçoamentos futuros. O protótipo desenvolvido serve como uma excelente base para trabalhos futuros e como uma ferramenta de grande potencial didático, cujas limitações agora documentadas são, elas mesmas, um resultado relevante do projeto.

REFERÊNCIAS

ALTMATEX. **Máquinas**. 2023. Disponível em:

<https://www.altmatex.com.br/maquinas>.

ARDUINO. **Uno R3**. 2025. Disponível em:

https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/?__x_tr_hist=true.

BIRTON, Botond-Antal; GERGELY, Attila. Design and Implementation of a Vacuum Forming Machine. **Sciendo**, v. 4, n. 2, p. 75–78, 2021.

HAROLD BELOFSKY. **Plastics: Product Design and Process Engineering**. 1. ed. Nova Iorque: Hanser Pub Inc, 1995. P. 648.

JAMES L. THRONE. **Understanding Thermoforming**. 2. ed. Ohio: Hanser, 2008. P. 286.

MORRIS, A. S.; LANGARI, R. **Measurement and Instrumentation: Theory and Application**. 2. ed. [S.l.]: Academic Press Inc., 2015.

NOVUS. **Controladores**. 2023. Disponível em:

<https://www.novus.com.br/pt/categoria/controladores>.

ROSATO, Donald; ROSATO, Dominick; ROSATO, Matthew. **Plastic Product Material and Process Selection Handbook**. 1. ed. Nova Iorque: Elsevier Science, 2004. P. 870.

SEBASTIÃO V. CANEVAROLO JR. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2017. P. 282.

SONI, J. S.; PRASHANTH, C.; MAHESH, G.; SATISH, A. S. Design AMD Fabrication of Optimized Vacuum Moulding Machine. **International Journal of Engineering Computational Research and Technology**, v. 3, n. 2, p. 31–35, 2018.

STEVAN JR, Sergio; SILVA, Rodrigo. **Automação e Instrumentação Industrial Com Arduino - Teoria e Projetos**. [S.l.]: Saraiva, out. 2015. ISBN 9788536514789.

VALAVAN, Ashwini; KOMOLAFE, Abiodun; HARRIS, Nick R.; BEEBY, Steve. Vacuum Thermoforming for Packaging Flexible Electronics and Sensors in E-Textiles.

IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, v. 13, n. 5, p. 715–723, 2023.

YAMAOKA, Junichi; KAKEHI, Yasuaki. ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping. *In*: CHI 2017. Denver, USA: [s.n.], 2017. P. 2106–2115.

ZULFIQAR, S.; M.F.M. SHARIF, A.A. Saad and; SAMSUDIN, Z.; ALI, M.Y.T.; ANI, F.C.; AHMAD, Z.; ABDULLAH, M.K. Alternative manufacturing process of 3-dimensional interconnect device using thermoforming process. **Elsevier**, v. 127, n. 114373, p. 1–10, 2021.

APÊNDICE A – Código do programa implementado no Arduíno

```
#define RPWM 6
#define LPWM 9

#define SOBE 5
#define DESCE 4

void setup() {

  pinMode(RPWM, OUTPUT);
  pinMode(LPWM, OUTPUT);
  pinMode(SOBE, INPUT_PULLUP);
  pinMode(DESCE, INPUT_PULLUP);
  analogWrite(RPWM, 0);
  analogWrite(LPWM, 0);

}

void loop() {

  if (digitalRead(SOBE) == LOW){
    analogWrite(RPWM, 10);
    analogWrite(LPWM, 0);
  }

  if (digitalRead(DESCE) == LOW){
    analogWrite(RPWM, 0);
    analogWrite(LPWM, 15);
  }
}
```