

**Anderson Tavares de Andrade
Felipe Augusto Dardin
João Francisco Goes Braga Takayanagi**

Construção e controle de temperatura de um forno para solda SMD

São Paulo
2017

**Anderson Tavares de Andrade
Felipe Augusto Dardin
João Francisco Goes Braga Takayanagi**

Construção e controle de temperatura de um forno para solda SMD

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia

São Paulo
2017

**Anderson Tavares de Andrade
Felipe Augusto Dardin
João Francisco Goes Braga Takayanagi**

Construção e controle de temperatura de um forno para solda SMD

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia

Área de concentração: Engenharia
Elétrica – Sistemas Eletrônicos e
Telecomunicações e Controle

Orientador: Prof. Dr Diego Colón

São Paulo
2017

RESUMO

A soldagem de componentes eletrônicos é um processo básico na fabricação de circuitos, mas pode ser trabalhosa e propensa a falhas quando feita à mão, especialmente para componentes pequenos ou circuitos muito complexos. Para resolver este problema, foram criados processos automáticos de soldagem, dentre os quais focamos no método por refusão. O objetivo deste projeto é construir e controlar um forno para possibilitar a soldagem de componentes SMD (Surface Mount Design) de forma a implementar esse processo de forma confiável e com um custo baixo e torná-lo acessível para uso em pequena escala, seja para empresas menores ou entusiastas da eletrônica.

Palavras chave: Forno elétrico. Soldagem eletrônica. Controle (Teoria de sistemas e controle). Circuitos eletrônicos.

ABSTRACT

Electronic component soldering is a basic process in the fabrication of electronic circuits, but can be an arduous task, and very susceptible to errors when handmade. In order to solve this problem, automated soldering processes were created, among which is the reflow soldering process. The objective of this project is to build and control an electric oven to enable the soldering of SMD (Surface Mount Design) components, to improve the soldering process' reliability at a low cost and make it accessible for low scale use by small businesses and electronic enthusiasts.

Keywords: Electric Oven. Electronic soldering. Control (Control Systems Theory). Electronic circuits.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Diego Colón pela orientação, incentivo, apoio e sabedoria que compartilhou conosco.

Aos membros da banca examinadora: professor Fuad Kassab Júnior, José Jaime da Cruz, Paulo Sérgio, Felipe Miguel Pait, Bruno Augusto Angélico e Marcelo Zuffo pela paciência, apoio e instruções ao longo das 6 apresentações realizadas.

Agradecimento especial ao professor Maurício Oka que foi sempre atencioso e prestativo em seus conselhos e ajuda com materiais.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e seus funcionários por disponibilizar seus laboratórios, ferramentas e ótima prestação de serviços.

Às nossas famílias pelo constante incentivo, apoio e companheirismo durante todo o curso, possibilitando que os integrantes chegassem até aqui.

Aos nossos amigos que fizeram do longo caminho da graduação uma experiência não só acadêmica, mas também valiosa para vida, ajudando a formar as pessoas que somos hoje.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de temperatura típica do processo de soldagem por refluxo	13
Gráfico 2: Parâmetros de uma resposta ao degrau típica	46
Gráfico 3: Resposta ao degrau para 20% da potência.	47
Gráfico 4: Curva de temperatura - Sem exaustor	48
Gráfico 5: Curva de temperatura - Com exaustor	49
Gráfico 6: Curva de solda para pasta no clean SAC305	50
Gráfico 7: Curva de temperatura - Controle chaveado.	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resistor SMD posicionado na placa de circuito impresso	11
Figura 2: Linha de produção para SMD	15
Figura 3: Forno de refluxo com zonas de diferentes temperaturas	15
Figura 4: Decomposição funcional nível 0 do projeto	23
Figura 5: Decomposição funcional nível 1 do projeto	24
Figura 6: Módulo funcional de alimentação	25
Figura 7: Módulo funcional de interface	25
Figura 8: Módulo funcional do controlador	26
Figura 9: Módulo funcional do sistema de aquecimento	26
Figura 10: Módulo funcional do sistema de resfriamento	27
Figura 11: Circuito de controle do motor	35
Figura 12: Design da carcaça interna do forno	36
Figura 13: Design da carcaça interna do forno	36
Figura 14: Gaveta do forno	37
Figura 15: Imagem interna do forno	38
Figura 16: Exaustor dentro do suporte de PVC em funcionamento	38
Figura 17: Imagem interna do forno, destacando as conexões	39
Figura 18: Encaixe da parede lateral interna	39
Figura 19: Parede lateral interna	40
Figura 20: Camada isolante de lã de vidro	40
Figura 21: Visão frontal do forno	41
Figura 22: Visão traseira do forno	41
Figura 23: Protótipo da placa utilizada para realizar a ligação elétrica de baixa tensão	42
Figura 24: Placa com os componentes eletrônicos soldados	42
Figura 25: SSR acoplado na carcaça do forno	43
Figura 26: Caixa com os componentes, arduino e disjuntor dentro	43
Figura 27: Máquina de estados	53
Figura 28: Interface do forno de solda SMD	53
Figura 29: Placa de teste antes da soldagem.	56
Figura 30: Placa de teste após soldagem.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Analogias entre sistemas elétricos e térmicos	18
Tabela 2: Fórmulas do número de Nusselt em placas verticais	29
Tabela 3: Fórmulas do número de Nusselt em placas horizontais	30
Tabela 4: Características térmicas dos materiais do forno	32
Tabela 5: Cálculo do volume de ar frio para resfriamento	33
Tabela 6: Lista de materiais	44
Tabela 7: Orçamento	45
Tabela 8: Método de Ziegler-Nichols para resposta ao degrau	47
Tabela 9: Parâmetros da resposta ao degrau.	48
Tabela 10: Coeficientes para os controles PID	48

SUMÁRIO

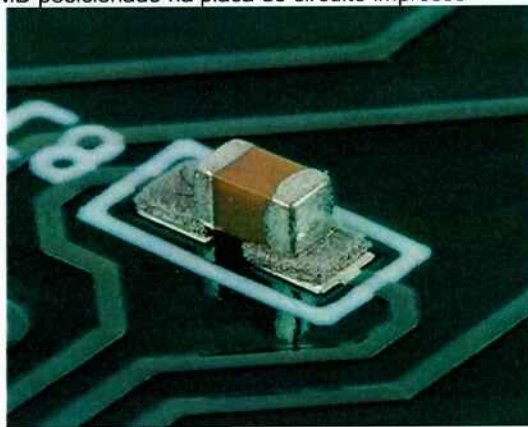
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 O processo de soldagem por refusão	13
2.2 O que existe no mercado	14
2.3 Modelagem de fornos	16
2.3.1 Conceitos de termodinâmica	16
2.3.2 Simulação em CFD	19
2.3.3 Modelagem de fornos sem simulações	20
2.4 Tecnologias Relevantes	21
3 PROJETO DO FORNO	23
3.1 Decomposição funcional do projeto	23
3.1.1 Nível 0	23
3.1.2 Nível 1	23
3.1.3 Nível 2	24
3.2 Dimensionamento dos componentes	27
3.2.1 Tamanho, estrutura e composição do forno	27
3.2.2 Cálculo do isolamento térmico	28
3.2.2.1 Cálculo do coeficiente de convecção natural do ar	28
3.2.2.2 Cálculo do fluxo de calor pela parede	30
3.2.3 Cálculo da potência do forno	31
3.2.4 Cálculo da vazão de ar para resfriamento	32
3.2.5 Chaveamento dos atuadores	34
3.2.6 Sensor de temperatura	35
3.2.7 Design do forno	36
4 CONSTRUÇÃO DO FORNO	37
4.1 Confecção das peças e montagem	37
4.2 Lista de Materiais e orçamento	43
4.2.1 Lista de Materiais	44
4.2.2 Orçamento	45
5 PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DE TEMPERATURA	46
5.1 Implementação do controle	46
5.1.1 Controle PID - Método Ziegler Nichols	46
5.1.2 Controle chaveado e Máquina de estados	49
5.2 Programação do arduino	52

5.3 Programação da interface	53
6 RESULTADOS	55
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	59
ANEXOS	61
Anexo A: Propriedades termofísicas do ar a pressão atmosférica	61
Anexo B: Código do microcontrolador	62
Anexo C: Código da interface	67

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia SMD se trata de componentes eletrônicos muito pequenos, cujos terminais são soldados no lado da Placa de Circuito Impresso (PCI) em que se localiza o componente. Se contrapõe aos componentes convencionais through-hole, cujos terminais são longos para que atravessem a placa e sejam fixados nos contatos na outra face desta.

Figura 1: Resistor SMD posicionado na placa de circuito impresso



Fonte: <http://blog.usinainfo.com.br> (2015)

Esta tecnologia afirmou-se devido a evolução e conseqüente miniaturização da eletrônica, gerando demanda por componentes mais compactos. Seu desenvolvimento teve início em torno da década de 1960, e seu uso se expandiu rapidamente, sendo que na década de 90 já representava a maior parte dos componentes eletrônicos consumidos (DS TOOLS, 2011a). Hoje em dia, certos componentes mais modernos são comercializados apenas na tecnologia SMD, evidenciando sua prevalência sobre a técnica tradicional.

Entre as vantagens da tecnologia SMD sobre a through-hole, temos o menor tamanho, disponibilidade de novos componentes, menor índice de falhas e defeitos e menor captação de ruídos.

As desvantagens desta tecnologia estão ligadas ao maior investimento em pesquisa e desenvolvimento para sua produção, dificuldade de soldagem à mão e reparo consideravelmente mais trabalhoso que a tecnologia convencional.

Desta forma, objetivo deste projeto é automatizar o processo de soldagem dos componentes SMD, reduzindo o trabalho manual do projetista e acelerando o processo ao realizar todas as soldagens simultaneamente. Esta automação do processo será realizada através do aquecimento controlado de um forno, onde será colocada a placa com os componentes devidamente posicionados. Informações do processo serão expostas ao usuário, de modo que ele possa acompanhar a soldagem dos componentes. Diferentes técnicas de Controle serão usadas tanto na fase de aquecimento quanto na fase de resfriamento a fim de otimizar a soldagem, tendo como referência seu perfil de temperatura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O processo de soldagem por refusão

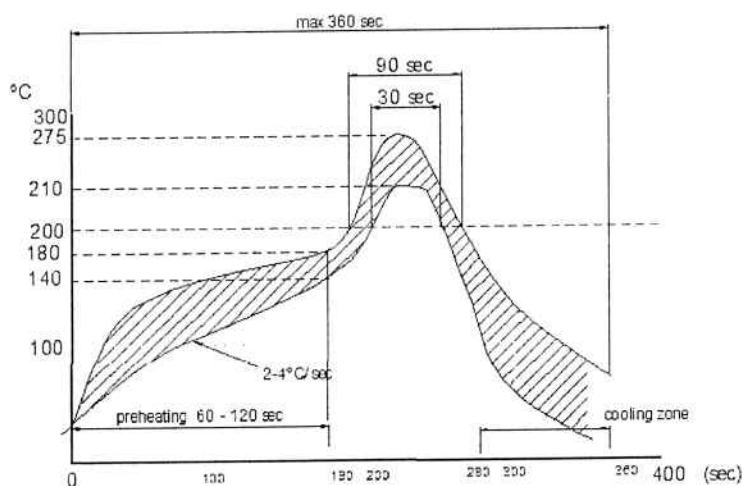
Visando automatizar o processo de soldagem dos componentes SMD, devemos estudar a soldagem por refusão, que já é um processo comum na indústria de eletrônicos.

Na soldagem por refusão (em inglês reflow soldering), pasta de solda é aplicada aos pads onde será realizada a soldagem, e em seguida os componentes eletrônicos são posicionados sobre a PCI no lugar que serão fixados, de modo que seus terminais fiquem em contato com a pasta.

A pasta de solda é uma liga metálica em pó, geralmente estanho e chumbo, que formará a ponte entre os dois metais a serem soldados, dispersa em fluxo para solda, cuja função é manter a liga uniformemente dispersa, em natureza pastosa para facilitar sua aplicação, e tem a propriedade de desoxidar os contatos a serem unidos, facilitando o processo.

A placa com os componentes posicionados passa então por um processo de aquecimento controlado, cuja curva de temperatura segue o padrão mostrado na figura a seguir.

Gráfico 1: Curva de temperatura típica do processo de soldagem por refluxo



Fonte: <http://www.dstools.com.br/> (2011b)

Esta etapa é dividida em quatro partes: a fase de pré-aquecimento, a fase de ativação, a fase de refusão e a fase de resfriamento.

Na fase de pré-aquecimento, ocorre o aquecimento gradual dos componentes e os solventes mais voláteis da pasta de solda são eliminados. Para garantir a qualidade da solda, este aquecimento deve ser feito de forma linear e controlada, assegurando a expulsão destes solventes.

Na fase de ativação, é atingida a temperatura em que os componentes do fluxo são ativados eliminando os óxidos nos terminais dos componentes, enquanto a pasta de solda bloqueia o oxigênio evitando a oxidação dos metais. Neste estágio a temperatura varia de forma mais lenta, para que os componentes com diferentes capacidades atinjam todos a temperatura de ativação.

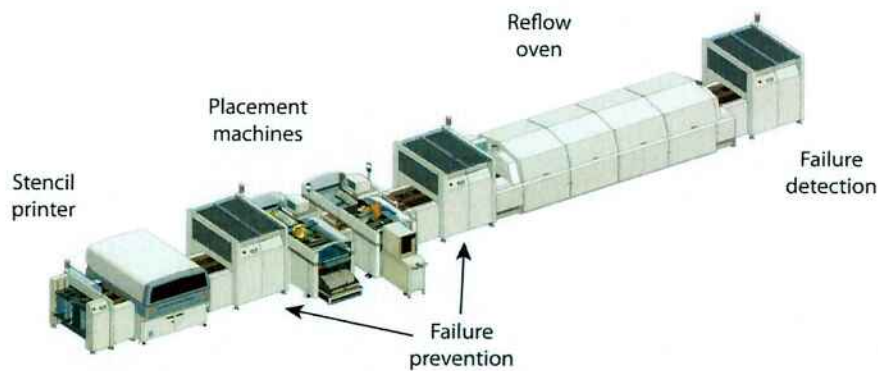
Na fase de refusão, a temperatura de fusão da liga metálica é atingida. O fluxo ativado diminui a tensão superficial dos contatos, permitindo uma boa interligação metálica. Esta etapa deve durar o suficiente para garantir que a fusão ocorra em todas as regiões da placa, mas uma exposição prolongada a alta temperatura pode resultar em soldas frágeis e aumenta o risco de componentes queimarem.

Finalmente, na fase de resfriamento, a PCI é esfriada de forma controlada para consolidar a solda, evitando formações metálicas indesejadas e choques térmicos que pudessem danificar o circuito.

2.2 O que existe no mercado

Para processos de soldagem por refusão em larga escala, cada etapa do processo é realizada por uma máquina específica.

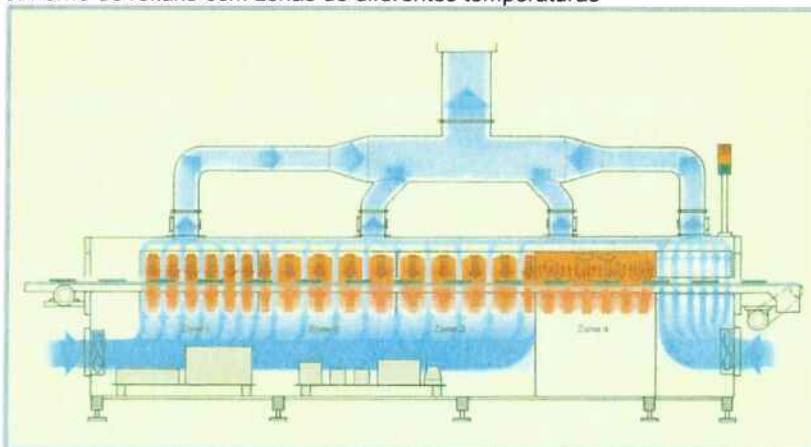
Figura 2: Linha de produção para SMD



Fonte: <http://www.surfacemountprocess.com/> (2015)

Primeiramente é usado um stencil, que é uma folha metálica perfurada nos pontos onde serão fundidos os contatos, que permite a aplicação automática da pasta de solda. Então, os componentes são posicionados por uma máquina "Pick and Place". A placa é então transferida para o forno de refusão. Estes fornos muitas vezes são separados em diferentes áreas que correspondem às fases do processo de refluxo, e a variação da temperatura é controlada pela extensão destas áreas e pela velocidade da esteira móvel que carrega a PCI.

Figura 3: Forno de refluxo com zonas de diferentes temperaturas



Fonte: <http://www.pcbpower.com> (2017)

Naturalmente, este processo é inviável para o produtor em pequena escala, devido ao custo elevado das máquinas. A alternativa a este processo é aplicar a pasta de solda aos contatos e posicionar manualmente os componentes, e controlar a temperatura do forno para seguir o perfil desejado. Este método, apesar de mais trabalhoso e propenso a erros, torna o processo acessível para criação de circuitos SMD fora da escala industrial.

Para isso, existem algumas opções de forno de refluxos mais baratas no mercado, ou então é comum a prática de se utilizar um forno elétrico comum com um método de regulação da temperatura (CORDEIRO, 2016; SANT'ANNA JÚNIOR, 2013), ou mesmo construir um forno voltado especificamente para esta função, cujo projeto está parcialmente desenvolvido (MECENEIRO et al, 2016; MORGENSZTERN, 2011). Deste modo, o processo se torna muito mais acessível e viável para o público que se deseja atingir.

2.3 Modelagem de fornos

A modelagem de fornos deve ser feita levando em conta a sua temperatura de operação, a duração do processo a ser realizado e o custo de sua construção, para que se possa determinar quais são os atuadores, sensores e materiais adequados para composição de sua estrutura, assim como o controlador a ser usado.

Para determinar corretamente as especificações destes componentes, é necessário então analisar as propriedades térmicas do forno, de forma a avaliar como o calor é criado, propagado e perdido ao longo do processo.

2.3.1 Conceitos de termodinâmica

A transmissão de calor entre fluidos envolve equações diferenciais que podem ser complexas e, muitas vezes, difíceis de se resolver analiticamente, como mostrado em (MORAN, 2005). O método analítico de resolução se mostra apropriado para sistemas simplificados, porém problemas mais complexos utilizam simulações por métodos numéricos, como o método dos elementos finitos (LEWIS, 2004).

Na modelagem de sistemas térmicos, são levadas em consideração os três tipos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. As equações de transferência de calor por são dadas, portanto, por:

Transferência de calor por convecção

$$q = hA\Delta\theta \quad (2.1)$$

Onde q é a transferência de calor (kcal), h é o coeficiente de transferência de calor por convecção (kcal/m²sK) e A é a área normal ao fluxo de calor (m²).

Transferência de calor por radiação

$$q = \varepsilon A \sigma (\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad (2.2)$$

Onde ε é a emissividade do material da superfície, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Boltzmann, θ_1 é temperatura do emissor (K) e θ_2 é temperatura do receptor (K).

Transferência de calor por condução

$$q = K_c A \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \quad (2.3)$$

onde K_c é a condutividade térmica do material (kcal/m.s.K).

Para relacionar a quantidade de calor que é absorvida por um objeto com a variação de sua temperatura, é usada a equação da calorimetria

Equação da calorimetria

$$q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (2.4)$$

onde m é a massa do corpo (Kg) e

c o calor específico do material

De acordo com (MORAN, 2005), um sistema térmico pode ser modelado em espaço de estados através das seguintes equações:

Equações diferenciais da troca de calor

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{1}{c} [q_i(t) - q_o(t)] \quad (2.5)$$

$$q(t) = \frac{1}{R} [\theta_1(t) - \theta_2(t)] \quad (2.6)$$

onde C é a capacitância térmica (J/K),

C=mc, com m em [kg] e

c (calor específico) em [J/kgK];

R é a Resistência térmica, com $R = d/(A\alpha)$, com

d sendo a espessura do condutor térmico e a condutividade térmica do material condutor (W/mK ou J/msK);

A é a área normal ao fluxo de calor.

É possível realizar uma analogia a sistemas elétricos, facilitando o entendimento para simulação, na qual:

Tabela 1: Analogias entre sistemas elétricos e térmicos

Sistema elétrico	Sistema térmico
Tensão (V)	Temperatura (θ)
Corrente (i)	Fluxo de calor (q)
Resistência elétrica (R)	Resistência térmica (R)
Capacitância (C)	Capacitância térmica (C)

Fonte: Autores

Além das dificuldades impostas pela simulação da transferência de calor geradas pela radiação, a equação de Navier-Stokes também considera a convecção forçada do ar, um fluido, da seguinte maneira:

Equação de Navier-Stokes

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot P + \rho f \quad (2.7)$$

$$P = \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

onde: E σ representa a tensão normal,

τ representa a tensão tangencial (cisalhamento),

p a pressão estática.

É notável a dificuldade de implementação em simulação das equações mencionadas, de tal forma que a modelagem matemática uma vez feita, o espaço pode ser discretizado conforme a precisão necessária e as equações diferenciais aproximadas por equações de diferenças no espaço e no tempo. Este novo problema discreto pode ser resolvido computacionalmente; porém, ao fim do processo, é necessário analisar a convergência da solução.

2.3.2 Simulação em CFD

As simulações usando Computational Fluid Dynamics (CFD), ou fluidodinâmica computacional em português, são extremamente poderosas, sendo uma ferramenta muito útil no projeto de fornos. Resolve as equações de mecânica dos fluidos através de métodos numéricos, sendo capaz de descrever sistemas de escoamento de fluidos extremamente complexos.

Para tal, o software utiliza técnicas de discretização do espaço, sendo o método dos volumes finitos o mais comum para esta aplicação. Isto permite aplicar as equações de conservação de massa, momento e energia em cada volume discretizado até a malha convergir.

O modelo CFD pode simular diversas situações de transferência de calor e dinâmica de fluidos. Um exemplo disto pode ser visto em (PINELLI, 2017), onde um forno rotativo para assar pães com convecção de ar forçada real é modelado numericamente em três dimensões a fim de compreender sua dinâmica e propor melhorias.

Outro artigo analisando o uso de CFD no estudo de cozimento de alimentos pode ser encontrado em (CHHANWAL, 2010), na qual um forno doméstico foi analisado, de forma a criar seu modelo e comparar os resultados obtidos nas simulações com medidas empíricas. Antes da escolha do modelo a ser utilizado, foi notado pelo autor que nos fornos elétricos, apesar das três formas de transferência de calor estarem presentes (radiação, condução e convecção), o processo de radiação domina sobre os demais.

Em (MISTRY, 2006), é desenvolvido um modelo CFD robusto, flexível e previsível para fornos elétricos. A modelagem envolve três dimensões, num regime não permanente, das transferências de calor por radiação e por convecção e das perdas associadas (perdas permanentes, em steady state) através das paredes,

saídas de ar e pelo vidro da porta. O modelo inclui a carcaça e o ar interno (levando-se em consideração o vapor de água presente neste), e a resistência modelada como uma fonte volumétrica de calor, com capacidade térmica e calor específico, para poder simular mais adequadamente os transitórios do sistema. Em seu artigo, Mistry et al. afirmam através de suas pesquisas que a forma predominante de transferência de calor é através da radiação, e que o campo de calor (thermal field) interno do forno tem menos dependência do calor refletido/emitido pela parede e maior dependência da própria fonte.

No entanto, a simulação em CFD também possui suas desvantagens. Primeiramente, requer um alto poder computacional, consumindo memória e tempo de processamento do computador. Também não garante a convergência da solução, especialmente em simulações de 3 dimensões. Finalmente, possui uma barreira de entrada considerável: requer conhecimentos avançados de fenômenos de transporte, para determinação das equações que regem o sistema, das condições de contorno e de métodos de modelagem de movimentos turbulentos.

2.3.3 Modelagem de fornos sem simulações

Também é possível modelar o comportamento térmico de um forno através de hipóteses simplificadoras e estudos de pior caso. Este método foca em determinar os sensores e controladores adequados, o tipo de aquecedores a potência necessária para o aquecimento do sistema e a estimativa das perdas de calor, para definir o isolamento térmico necessário, além de outras estruturas que o forno em questão possua para funcionalidades específicas de seu processo.

Em (SILVA, 2016), temos o projeto de um forno de fundição de alumínio, com temperatura de operação máxima de 800 °C. Foram usadas resistências do tipo Kanthal A1, consumindo 6000W de potência, e isolamento de fibra de vidro.

Em (CARVALHO, 2011), construiu-se um forno tubular rotativo para a síntese de nanopartículas. A temperatura de operação máxima 700 °C, utilizando 6 lâmpadas halógenas de 1000W de potência, o isolante térmico usado foi de lã de rocha, e termopares tipo K como sensores de temperatura.

2.4 Tecnologias Relevantes

Microcontrolador: é um computador de pequeno porte que pode ser programado para realizar aplicações embarcadas, sendo muito comuns na automação e controle de periféricos. É composto de um núcleo processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída. No projeto de forno de refluxo, é o responsável pelo controle da alimentação da fonte de calor, assim como a comunicação com a interface.

Sensores de temperatura: são necessários para acompanhamento do processo de solda, fornecendo ao microcontrolador informações sobre o estado do forno. Existem diversos tipos, tais quais termistores, componentes cujo valor varia de acordo com a temperatura a que estão expostos, pirômetros, termômetros que medem a radiação térmica de uma superfície, entre outros.

Dentro desta classe de sensores, destaca-se o termopar, devido ao seu preço acessível e alta faixa de operação. Consiste em dois fios de metais diferentes com uma junção em uma das pontas. Uma diferença de temperatura entre a junção e as extremidades soltas cria uma diferença de potencial, que pode ser medida para determinar a variação de temperatura. Existem diversos tipos de termopar, com duplas de metais e, conseqüentemente, propriedades distintas usadas, o que permite que esta classe de sensores se adeque a diferentes aplicações.

Resistência de aquecimento: componentes que permitem a transformação de corrente elétrica em calor. É um dos modos mais simples de se implementar uma fonte de calor controlada por corrente elétrica, sendo amplamente utilizada em chuveiros, aquecedores e em fornos elétricos.

Pode-se também usar lâmpadas halógenas no lugar de resistências tradicionais, feitas de liga de níquel e cromo, por possuir uma inércia térmica menor.

Triac: é um componente eletrônico que serve para chavear circuitos de corrente alternada. É composto de dois tiristores, ligados em anti-paralelo, e um terminal de gatilho. Quando este terminal é alimentado por uma corrente, suas outras duas portas passam a conduzir a corrente.

Optoacopladores: são componentes eletrônicos usados para o disparo de triacs. São compostos de um disparador óptico, que geralmente é conectado ao

dispositivo de baixa tensão que se deseja proteger, e um foto-diac, que conduz corrente quando o disparador ótico é ligado. Por não possuir contato elétrico ou mecânico entre suas partes, serve como proteção entre circuitos sensíveis e circuitos de elevada tensão.

Sistemas de resfriamento: são usados para diminuir a temperatura de um ambiente ou corpo. Os tipos mais comuns usados em fornos são os trocadores de calor, que possuem um fluido que é bombeado ao longo de uma tubulação, absorve o calor do local e o dissipa em uma etapa posterior, e os exaustores, que expõem ar quente para o exterior da estrutura, eliminando também calor que estava armazenado no interior do forno.

Materiais isolantes: são materiais com baixa condutividade térmica, que bloqueiam a condução de calor e evitam perdas de temperatura do forno. São usados para forrar as paredes, sendo os materiais mais comuns para o isolamento de fornos a fibra de vidro, a lã de rocha e a lã de vidro.

3 PROJETO DO FORNO

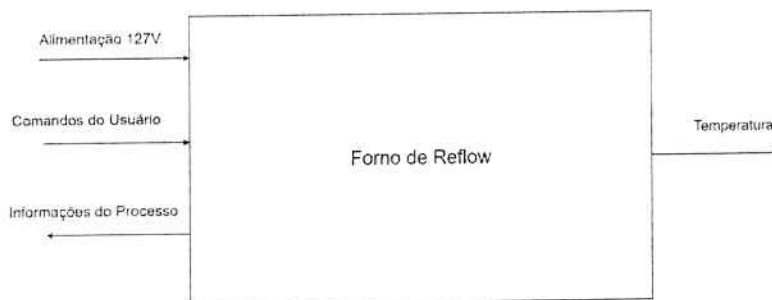
3.1 Decomposição funcional do projeto

Visando explorar melhor o conceito adotado, pode-se dividi-lo em módulos funcionais para analisar como será feita a implementação do projeto. É feito primeiramente uma análise do sistema em nível mais baixo, com descrições genéricas de suas funções e gradativamente aumenta-se o nível para que se torne claro como as partes do projeto contribuem para o resultado final.

3.1.1 Nível 0

Para o nível 0, temos o forno de reflow, que recebe uma alimentação de 127 Volts AC e comandos do usuário para fornecer a temperatura necessária para a solda de componentes SMD, ao mesmo tempo que informa o usuário do estado do processo.

Figura 4: Decomposição funcional nível 0 do projeto

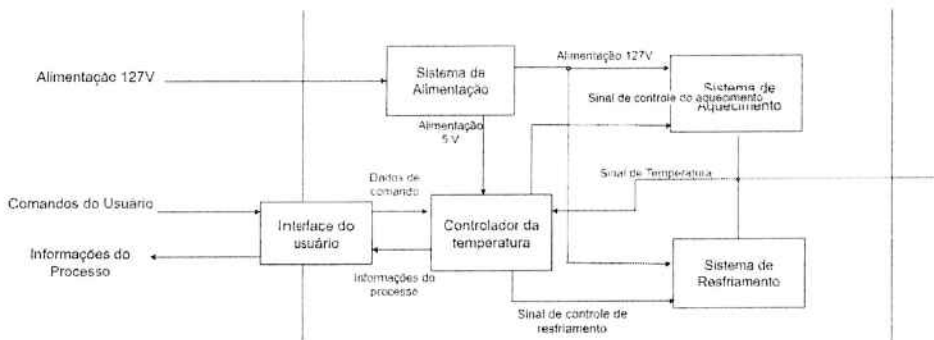


Fonte: Autores

3.1.2 Nível 1

Para o nível 1, dividimos o forno de reflow em 5 módulos: Sistema de Alimentação, Interface do usuário, Unidade de Controle, Sistema de Aquecimento e Sistema de resfriamento.

Figura 5: Decomposição funcional nível 1 do projeto



Fonte: Autores

O Sistema de Alimentação é responsável por distribuir as tensões de alimentação adequadas para os outros módulos, fornecendo uma saída de 12 V para o microcontrolador de 127 V AC para os sistemas de aquecimento e resfriamento.

A Interface do usuário é responsável por permitir a comunicação entre o usuário e o microcontrolador, recebendo os comandos de início do processo, definição de curva de temperatura e interrupção, e devolvendo as informações de temperatura e de estado atual do processo fornecidas pela unidade de controle.

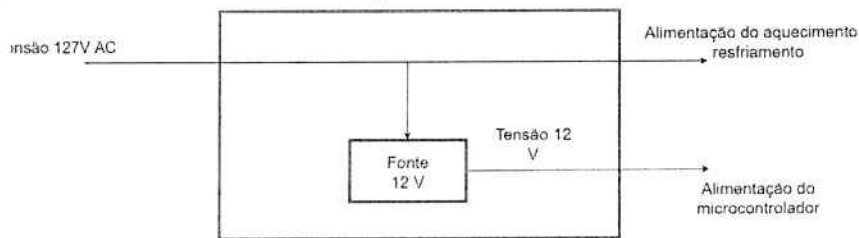
O controlador de temperatura é responsável por integrar os dados recebidos da interface e com a medição da temperatura do sistema, e então enviar um sinal de comando para os atuadores, que são os sistemas de aquecimento e refrigeração.

Finalmente, temos os dois sistemas atuantes na temperatura do forno, de aquecimento e de resfriamento, que são alimentados pela tensão de 127 V AC e pelo sinal de controle

3.1.3 Nível 2

- Sistema de alimentação

- Figura 6: Módulo funcional de alimentação

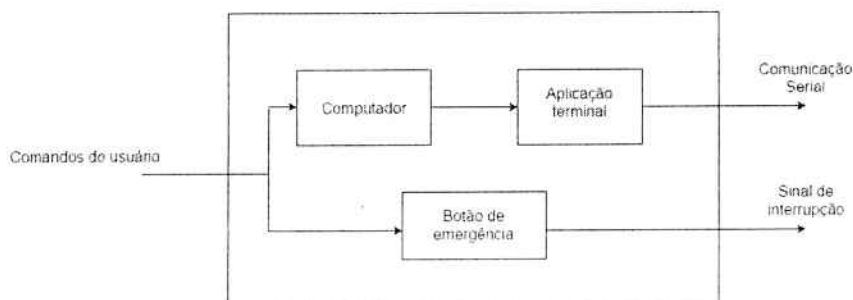


Fonte: Autores

Este módulo é relativamente simples, fornecendo alimentação para os outros blocos. Como os sistemas de aquecimento usam a tensão de 127 V AC como alimentação, não é necessário alterá-la. Para o microcontrolador, no entanto, é necessário utilizar uma fonte de 12 V para adequar a tensão ao nível adequado.

- Interface do usuário

Figura 7: Módulo funcional de interface

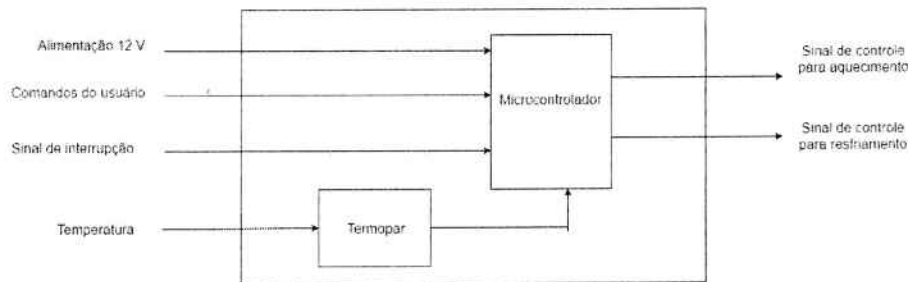


Fonte: Autores

A interface do usuário é responsável por permitir a comunicação deste com o microcontrolador. Esta comunicação é feita majoritariamente por comunicação serial, o que permite a implementação de diferentes funções para o forno de reflow. No entanto, é importante a existência de um botão de emergência localizado no forno, para enviar um sinal de interrupção para o microcontrolador e encerrar o processo.

- Controlador de temperature

Figura 8: Módulo funcional do controlador

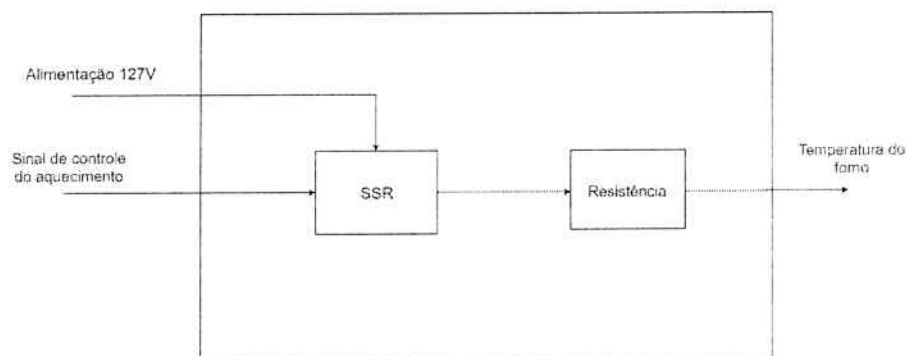


Fonte: Autores

O controlador de temperatura é constituído de um microcontrolador e um sensor termopar. O Sensor termopar é responsável por medir a temperatura atual do forno e transformar este número em um sinal elétrico que o microcontrolador possa processar. O microcontrolador é alimentado por uma tensão de 12V, e recebe os comandos do usuário para, juntamente com os dados de temperatura, para realizar o controle do forno e enviar sinais PWM para os relés dos módulos de aquecimento e resfriamento.

- Sistema de aquecimento

Figura 9: Módulo funcional do sistema de aquecimento

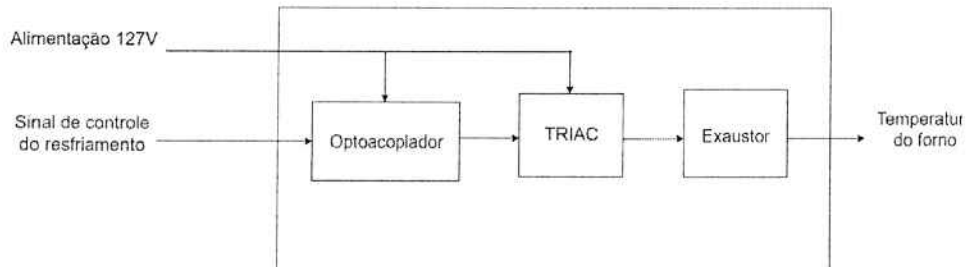


Fonte: Autores

O sistema de aquecimento consiste em um relé SSR e uma resistência. O sinal de controle do microcontrolador determina se o SSR estará conduzindo ou não, e conseqüentemente se a resistência está gerando calor para que o forno alcance a temperatura desejada.

- Sistema de resfriamento

Figura 10: Módulo funcional do sistema de resfriamento



Fonte: Autores

O sistema de resfriamento consiste num controle por ângulo de disparo de triac para definir a tensão eficaz no motor do exaustor.

3.2 Dimensionamento dos componentes

Uma vez definidos os sistemas que compõem o forno, é necessário dimensioná-los. Para isto, utilizou-se das equações térmicas descritas anteriormente para estimar a espessura do isolamento, a potência do aquecedor, a potência do exaustor e os demais componentes que garantirão o funcionamento adequado do forno.

3.2.1 Tamanho, estrutura e composição do forno

A camada externa do forno é uma carcaça cúbica de zinco, com dimensão 30x30x30cm. Este tamanho permite que o forno solde placas de circuito impresso de até 10x10cm, ao mesmo tempo que mantém um porte relativamente pequeno e evita custos exagerados com material. Já o zinco foi escolhido como o material para a carcaça por proporcionar resistência a estrutura e proteção à oxidação, a um custo acessível

A placa de circuito impresso será inserida no interior do forno por uma entrada de gaveta com fundo vazado, para permitir o fluxo de ar através dela. Acima desta, estará localizada a resistência para o aquecimento.

Por fim, haverá uma entrada e uma saída de ar nas paredes laterais, permitindo o fluxo de ar passar pela placa soldada e resfriá-la.

3.2.2 Cálculo do isolamento térmico

Como camada de isolamento das paredes do forno, foi escolhida a lã de vidro como material, por apresentar uma condutividade térmica menor que a lã de rocha ou a fibra de vidro, além de ser um material incombustível e que suporta as temperaturas de operação do forno.

Para o cálculo da espessura necessária, assumimos que o forno esteja operando em um estado estacionário, com temperatura interna de 275 °C e que a temperatura externa da carcaça esteja em 80 °C, o limite estabelecido neste projeto. A condição para que a temperatura externa não suba é que a quantidade de calor fornecida a chapa externa, por condução através do isolante térmico, seja igual a quantidade dissipada pela placa para o ambiente, por radiação e convecção.

Desta forma, precisamos definir o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção h para a convecção natural nas quatro paredes verticais e nas duas paredes horizontais.

3.2.2.1 Cálculo do coeficiente de convecção natural do ar

Para o cálculo de h , usa-se o teorema π de Vaschy-Buckingham, que se aproveita de análise dimensional para determinar o valor desta grandeza através do cálculo dos seguintes números adimensionais:

Número de Rayleigh

$$Ra = \frac{\rho^2 g \beta \Delta \theta L^3}{\mu k / c_p} \quad (3.1)$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (3.2)$$

Número de Nusselt

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.3)$$

onde L é a dimensão característica (m),
 $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade,

ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3),
 μ é seu coeficiente de viscosidade (N.s/m^2),
 k é sua condutividade térmica,
 c_p seu calor específico e
 β é o coeficiente de expansão térmica a pressão constante do fluido e para gases ideais vale $1/T$.

Os valores das propriedades termofísicas do ar se encontram no anexo A.

Substituindo os valores para $T_f = (T_{\text{superfície}} + T_{\text{ambiente}})/2 = 450 \text{ K}$ e usando $L = 30\text{cm}$ que é a altura do forno, encontramos $Ra = 68.917.894,19$ e $Pr = 0,7$.

Para uma placa plana isotérmica vertical, temos:

Tabela 2: Fórmulas do número de Nusselt em placas verticais

Convecção natural sobre placa isotérmica vertical:

Fluido	Regime	Nusselt	Gama Ra	Gama Pr
Gás ou líquido	Estagnado	$Nu = 1$	$< 10^4$	-
	Laminar	$Nu = 0.59 Ra^{1/4}$	$10^4 - 10^9$	-
	Turbulento	$Nu = 0.10 Ra^{1/3}$	$10^9 - 10^{13}$	-
	Geral	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{1/4} \right]^{1/4}} \right\}^2$	$10^4 - 10^{13}$	-
	Laminar, mais precisa	$Nu = 0.68 + \frac{0.670 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{1/4} \right]^{1/4}}$	$10^4 - 10^9$	-

(dimensão característica $L = H$ altura da placa; propriedades a $T_f = 0.5(T_s + T_\infty)$)

Fonte: <http://webx.ubi.pt/> (2014)

Então, para as 4 placas de zinco verticais, temos:

Número de Nusselt para placas verticais

$$Nu_v = 0.59 Ra^{1/4} \quad (3.4)$$

Então, temos $Nu_v = 53,74$. Substituindo na equação 3.4, encontramos $h_v = 5,37 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Para as placas horizontais, temos:

Tabela 3: Fórmulas do número de Nusselt em placas horizontais

Convecção natural sobre **placa isotérmica horizontal**:

Configuração	Regime	Nusselt	Gama Ra	Gama Pr
Placa horizontal aquecida virada para cima (ou arrefecida, para baixo)	Estagnado	$Nu = 1$	$< 10^4$	-
	Laminar	$Nu = 0.54 Ra^{1/4}$	$10^4 - 10^7$	-
	Turbulento	$Nu = 0.15 Ra^{1/3}$	$10^7 - 10^{11}$	-
Placa horizontal aquecida virada para baixo (ou arrefecida, para cima)	Laminar	$Nu = 0.27 Ra^{1/4}$	$10^4 - 10^{11}$	-

(dimensão característica $L = A/P$, A -área, P -perímetro; propriedades a $T_f = 0.5(T_s + T_\infty)$)

Fonte: <http://webx.ubi.pt/> (2014)

Para as placas superior e inferior, as equações que definem Nu são:

Número de Nusselt para placa superior

$$Nu_s = 0.15 Ra^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

Número de Nusselt para placa inferior

$$Nu_i = 0.27 Ra^{\frac{1}{4}} \quad (3.5)$$

Logo, $Nu_s = 61,5$ e $Nu_i = 24,6$, e conseqüentemente $h_s = 6,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $h_i = 2,46 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Com estes valores obtidos, podemos calcular o calor perdido pela parede de zinco por convecção e resolver a equação do fluxo de calor pela parede isolante do forno.

3.2.2.2 Cálculo do fluxo de calor pela parede

A equação que descreve o fluxo de calor pela parede é

Fluxo de calor pela parede

$$q_{cond} = q_{conv} + q_{rad} \quad (3.6)$$

que pode ser expandida em

$$k_{\text{lã}} A (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) / x = h_v A_v (T_{\text{ext}} - T_{\text{amb}}) + h_s A_s (T_{\text{ext}} - T_{\text{amb}}) + h_i A_i (T_{\text{ext}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon A \sigma (T_{\text{ext}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (3.7)$$

onde $k_{\text{lã}}$ é a condutividade térmica da lã de vidro,

T_{int} é a temperatura do interior do forno,

T_{ext} é a temperatura do exterior do forno,

T_{amb} é a temperatura do ambiente,

x é a espessura do isolante térmico,
 A_v é a área das placas verticais,
 A_s da placa superior e A_i da placa inferior.

Usando $\varepsilon = 0,05$ para o zinco comercial e a condutividade da lã de vidro à 250 °C de 0,047 Kcal/m.h.°C = 0,055 W/m.K, resolvendo a equação, temos:

$$5,7915/x = 154,3617 + 1,539 \quad (3.8)$$

logo $x = 0,038 \text{ m}$.

Ou seja, a espessura da camada isolante deve ser no mínimo de 3,8 cm para que os fluxos de calor se equilibrem. É importante ressaltar que esta espessura seria necessária para manter a temperatura externa a 80 °C no caso do forno estar operando a 275 °C em regime estacionário, o que não será o caso no processo de solda.

As paredes serão compostas então de uma camada externa de zinco, de placas de 30x30cm, uma camada de isolante de 3,5 cm de espessura e uma camada interna de zinco, de 23x23cm, para estruturar a câmara interna do forno

3.2.3 Cálculo da potência do forno

Para calcular a potência do forno, precisamos determinar a energia que deve ser consumida pela resistência para fornecer calor o suficiente para esquentar a placa de circuito impresso a 2°C por segundo.

No forno real, haverá gradientes de temperatura, e com um posicionamento adequado da resistência, a placa será aquecida mais rápido que os demais componentes do forno. No entanto, aqui assume-se que o calor se distribui uniformemente no interior do forno, para simplificar os cálculos. Usa-se então a equação 4 para estimar a potência necessária para aquecer o interior do forno a 2°C/s, com as massas e calores específicos de cada material, como descreve a tabela a seguir.

Tabela 4: Características térmicas dos materiais do forno

Componente	<i>Espaço</i>	<i>Placa</i>	<i>Paredes</i>	<i>Hélice</i>
Material	Ar	Fibra de vidro	Zinco	Ferro
Dimensão	25cmx25cmx25cm	10cmx10cmx1,6mm	23cmx23cmx0,6mm	-
Volume (m ³)	0,0156	0,000036	0,000031	-
Densidade (kg/m ³)	1,2	1350	7140	7870
Calor específico (J/kgK)	1.019,00	843,00	389,372	460,548
Peso (kg)	0,019	0,0486	1,34	0,2
Potência máxima para aquecimento a 2°C/s (W)	37,681	81,94	1042,545	184,219

Fonte: Autores

A potência total necessária para aquecer todos os componentes a 2°C/s é a soma das potências parciais somada às perdas de calor das paredes calculadas anteriormente, resultando em

$$Pot = 1346,445 + 154,36 + 1,539 = 1502,284 \text{ W} \quad (3.9)$$

Foi escolhida, portanto, uma resistência de 1500W para o aquecimento do forno.

3.2.4 Cálculo da vazão de ar para resfriamento

Para dimensionar o exaustor que será usado no sistema de exaustão, é preciso calcular a dispersão de calor necessária para resfriar o forno a 50°C/min. Assume-se que a perda de calor se deve à dissipação do calor pelas paredes, como descrito anteriormente, e pela expulsão de ar quente devido à circulação de ar criada pelo sistema ventilador/exaustor, sendo o volume de ar frio introduzido ao sistema igual ao volume de ar quente expulso. Também considera-se que o calor do forno está distribuído de forma uniforme os componentes.

Devemos então calcular a vazão de ar frio introduzido no forno para que ele alcance a taxa de resfriamento desejada. Utilizando novamente as características térmicas dos materiais descritas na tabela 8 e a equação de calorimetria, temos que

a quantidade de calor que deve ser dissipada para que o sistema sofra uma queda de temperatura de 50°C

$$q_{\text{resfriamento}} = (m_{\text{ar}}c_{\text{ar}} + m_{\text{placa}}c_{\text{placa}} + m_{\text{parede}}c_{\text{parede}} + m_{\text{ar}}c_{\text{ar}}) \times (\Delta\theta) \quad (3.10)$$

$$q_{\text{resfriamento}} = (19,36 + 40,96 + 521,76 + 92,11) \times (-50) = -33.709,5 J \quad (3.11)$$

A diferença de calor entre o ar quente e o ar frio é

$$\Delta q = q_{\text{ar quente}} - q_{\text{ar frio}} = m_{\text{ar frio}}c_{\text{ar frio}}(T_{\text{interior}} - T_{\text{amb}}) - m_{\text{ar quente}}c_{\text{ar quente}}(T_{\text{interior}} - T_{\text{amb}}) \quad (3.12)$$

$$\Delta q = (V_{\text{ar}}\rho_{\text{ar frio}}c_{\text{ar frio}} - V_{\text{ar}}\rho_{\text{ar quente}}c_{\text{ar quente}}) \times (T_{\text{interior}} - T_{\text{amb}}) \quad (3.13)$$

$$V_{\text{ar}} = \frac{\Delta q}{(\rho_{\text{ar frio}}c_{\text{ar frio}} - \rho_{\text{ar quente}}c_{\text{ar quente}}) \times (T_{\text{interior}} - T_{\text{amb}})} \quad (3.12)$$

Para temperatura ambiente de 27°C e temperatura interior do forno de 275°C, 175°C e 75°C, o volume de ar frio que deve ser introduzido será

Tabela 5: Cálculo do volume de ar frio para resfriamento

T (K)	R_o (kg/m ³)	C (J/kgK)	V (m ³)
300	1.1614	1007	-
350	0.995	1009	4.072
450	0.774	1014	0.584
550	0.6329	1040	0.264

Fonte: Autores

Portanto, precisamos de um exaustor que forneça uma vazão de ar de pelo menos 4,07 m³/min, ou seja, 244,2 m³/h.

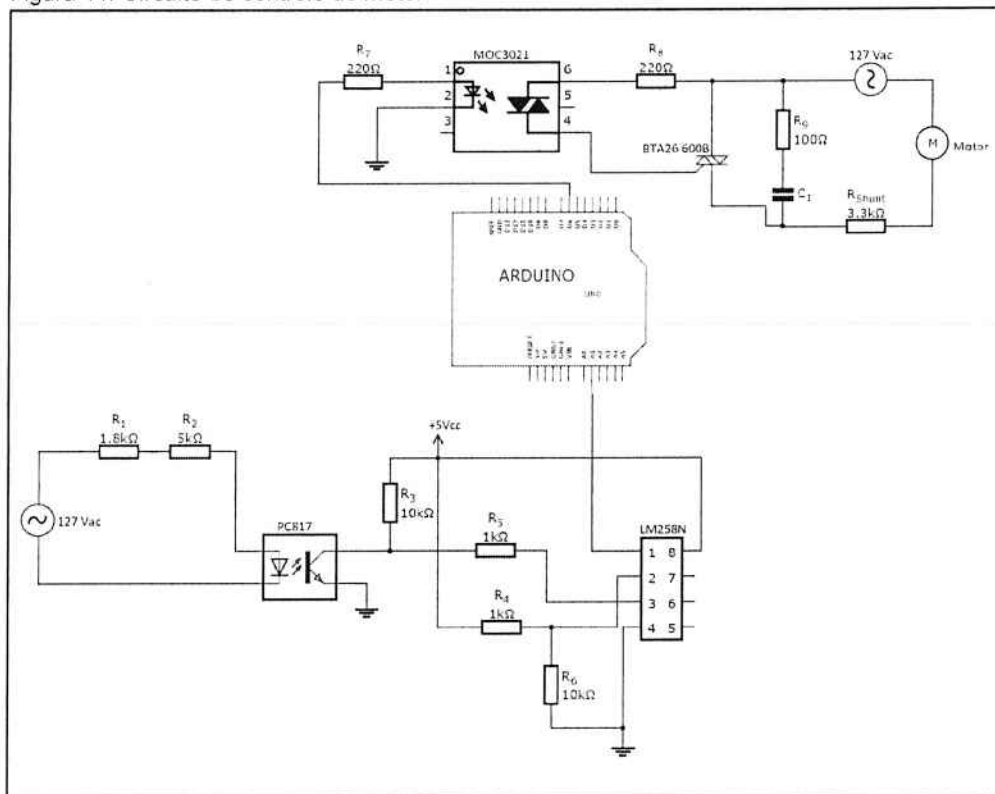
Um exaustor de hélice de 15mm de diâmetro [31], resistente a temperaturas de até 300°C, possui vazão de 427,5 m³/h, de forma que supriria as necessidades deste projeto.

3.2.5 Chaveamento dos atuadores

O microcontrolador é responsável por enviar o sinal de controle para ativar a resistência e o exaustor, ajustando a temperatura para atingir o valor desejado. Estes atuadores são alimentados por uma tensão de 127V e consomem uma potência considerável para realizar as mudanças de temperatura no ambiente. A resistência tem potência de 1500W e 127V de tensão efetiva de operação, requer aproximadamente 12A de alimentação, valor extremamente elevado para circuitos eletrônicos convencionais. Portanto, é preciso um componente de chaveamento que atenda estes requisitos para o funcionamento correto do forno.

Para chavear o motor, será utilizado um TRIAC, cujo disparo será controlado pelo Arduino através de um optoacoplador. Já para a resistência, é utilizado um SSR, para isolar o arduino ao realizar o chaveamento, que será acoplado à carcaça exterior para promover a dissipação do calor gerado pelo componente.

Figura 11: Circuito de controle do motor



Fonte: Autores

3.2.6 Sensor de temperatura

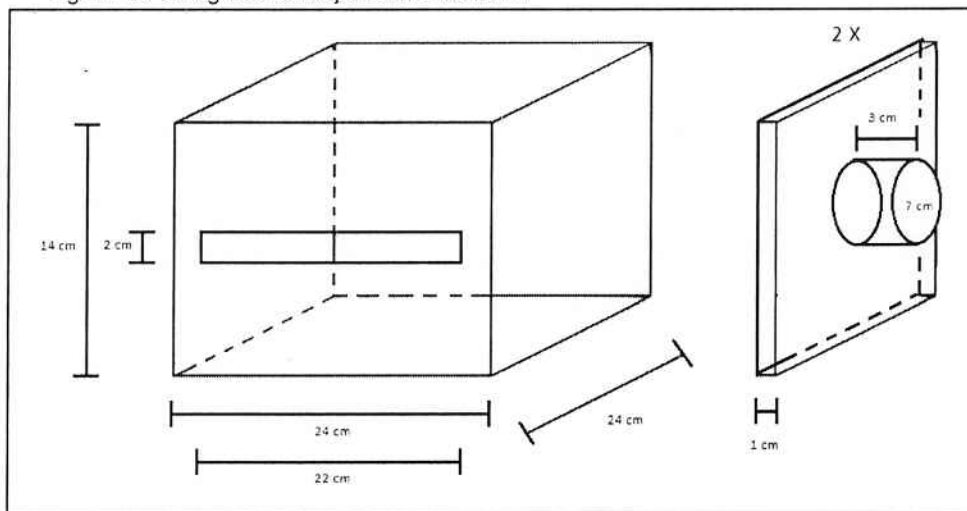
O sensor de temperatura escolhido foi o termopar tipo K, composto de uma liga de cromel e alumel, é conhecido por ser um termopar de uso genérico. Sua faixa de operação é de $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, e possui um erro máximo de 1°C , estando dentro da faixa de erro de 5°C proposta. Logo, este tipo de sensor atende os requisitos estabelecidos a um custo acessível.

Para transmitir o sinal produzido pelo termopar, que não varia linearmente com a temperatura, é usado o CI MAX6675. A saída deste CI é um dado digital da temperatura em 12 bits, que pode ser enviado ao microcontrolador por comunicação SPI.

3.2.7 Design do forno

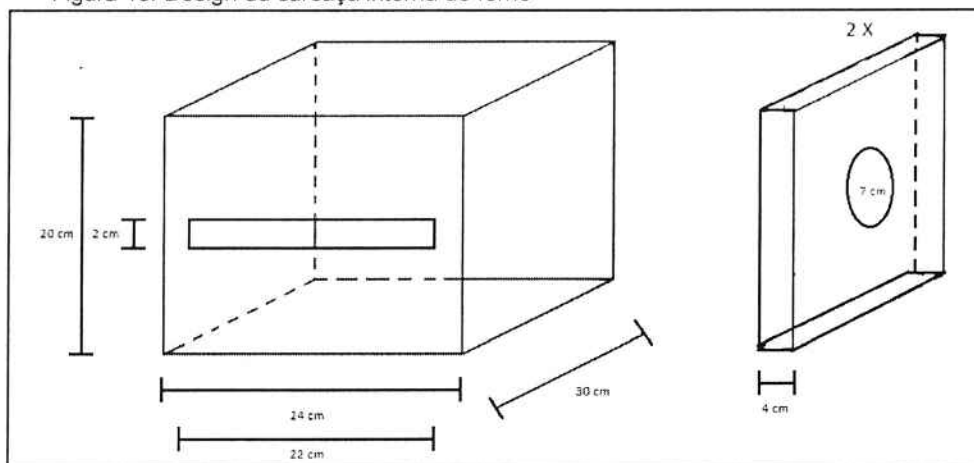
Tem-se a seguir o design das carcaças do forno, evidenciando o buraco frontal para inserção da gaveta que apoiará o circuito a ser soldado e os buracos laterais por onde será expelido o ar quente durante o processo de resfriamento.

Figura 12: Design da carcaça interna do forno



Fonte: Autores

Figura 13: Design da carcaça interna do forno



Fonte: Autores

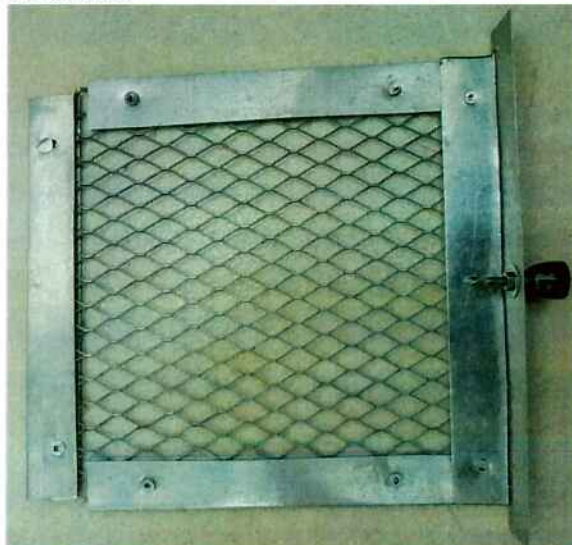
4 CONSTRUÇÃO DO FORNO

4.1 Confeção das peças e montagem

A montagem do forno teve várias etapas que tiveram de ser realizadas cuidadosamente na ordem descrita abaixo. Nos itens a seguir está detalhada cada etapa da montagem, especificando o material utilizado e finalidade. Todos os custos dos materiais encontram-se na Tabela 7.

- a) Confeção das carcaças externas e internas feitas em zinco, conforme 3.2.7. Esta confeção foi feita por encomenda em uma Serralheria.
- b) Confeção da gaveta (tela de 22x22cm com placas rebitadas às beiradas) e de deslizadores feitos de cantoneiras, rebitados às paredes internas do forno

Figura 14: Gaveta do forno



Fonte: Autores

c) Sistema de aquecimento:

- Fixação da resistência a uma altura de 4 cm em relação a gaveta (esta distância é regulável) utilizando 2 parafusos de 15 cm fixados no teto da carcaça interna;
- Criação de uma placa de prova (1 cm x 3.5 cm) onde foi fixado o termopar, mantendo o contato elétrico com sua superfície;

- Fixação do termopar a uma altura de 1 cm em relação a gaveta (esta distância é regulável) utilizando um parafuso de 15 cm fixado no chão;
- Realização de um furo em cada carcaça central na parte inferior de 0.7 mm de diâmetro para passagem do fio da resistência e do termopar.

Figura 15: Imagem interna do forno



Fonte: Autores

d) Sistema de resfriamento:

- Fixação do motor (hélice de diâmetro 15 cm) dentro de um suporte cilíndrico de PVC (diâmetro de 17 cm/ espessura de 1 cm) de forma que a hélice gire livremente (3 parafusos de 1 cm);
- Fixação do suporte de PVC a uma lateral externa do forno (3 parafusos de 1 cm);
- Vedação da superfície de contato entre o suporte e a lateral do forno (silicone);
- Adição de um pézinho para o suporte na altura de 5 cm.

Figura 16: Exaustor dentro do suporte de PVC em funcionamento

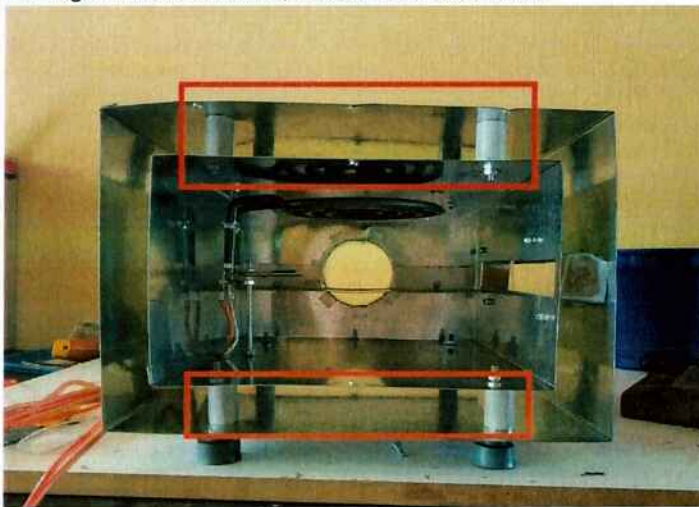


Fonte: Autores

e) Espaçamento para o sistema de isolamento

- Realização de 4 furos no teto e no chão de ambas as peças centrais (5 mm);
- Utilizando 4 parafusos de 4 cm e porcas, unir o teto das peças de forma a deixar um espaçamento de 3 cm entre elas; para garantir que os 3cm foram deixados e dar maior estabilidade ao forno, foram utilizados espaçadores (destacados pelos quadrados vermelhos);
- Nos parafusos do chão do forno foram colocados pés.

Figura 17: Imagem interna do forno, destacando as conexões



Fonte: Autores

f) Encaixe das paredes laterais internas na peça central interna:

- Realização de 2 furos (4 mm) na parte superior e inferior da união das peças laterais com a peça central;
- Inserção de parafusos (5mm x 1 cm) unindo as peças.

Figura 18: Encaixe da parede lateral interna



Fonte: Autores

Figura 19: Parede lateral interna



Fonte: Autores

Figura 20: Camada isolante de lã de vidro



Fonte: Autores

h) Fechamento do forno (parte II):

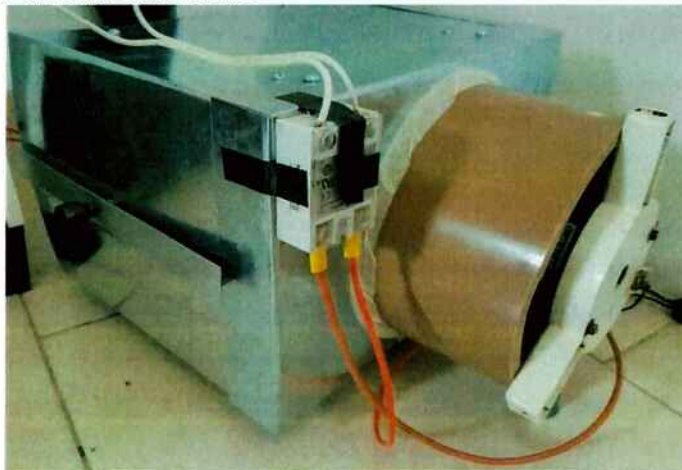
- Encaixe das paredes laterais externas na peça central externa;
- Realização de 2 furos (4 mm) na parte superior e inferior da união das peças laterais com a peça central;
- Inserção de parafusos (5mm x 1 cm) unindo as peças.

Figura 21: Visão frontal do forno



Fonte: Autores

Figura 22: Visão traseira do forno



Fonte: Autores

i) Ligações elétricas - Resistência:

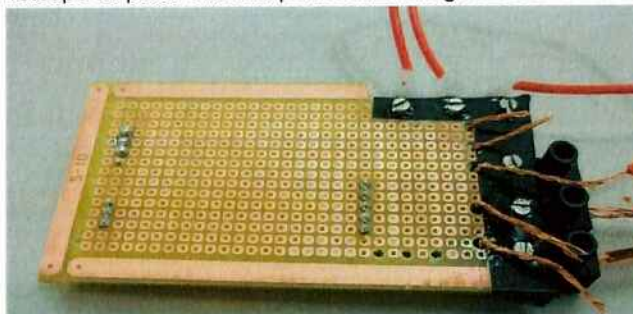
- Conexão dos fios da resistência no SSR (40A);
- União dos fios do neutro da resistência e do motor em uma tomada de 20 A;
- Sinal de controle (baixa tensão) de entrada do SSR é conectado ao Arduino.

j) Ligações elétricas - Motor e Baixa tensão:

- Motor: Projeto e confecção da plaquinha PCB de controle do motor;
- Baixa tensão: Confecção de uma placa de circuito impresso conectada ao arduino contendo as seguintes conexões:
 - ◆ Sinal de controle da Resistência (Saída);

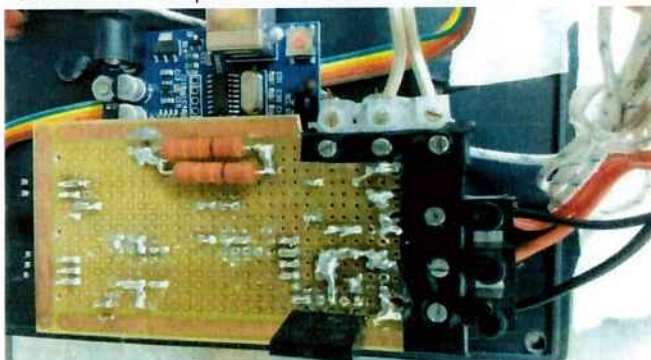
- ◆ Sinal de controle do motor (Saída);
- ◆ Conexão com o termopar (Entrada/Saída);
- ◆ Alimentação de alta tensão (Entrada);
- ◆ Alimentação de baixa tensão (Entrada).

Figura 23: Protótipo da placa utilizada para realizar a ligação elétrica de baixa tensão



Fonte: Autores

Figura 24: Placa com os componentes eletrônicos soldados

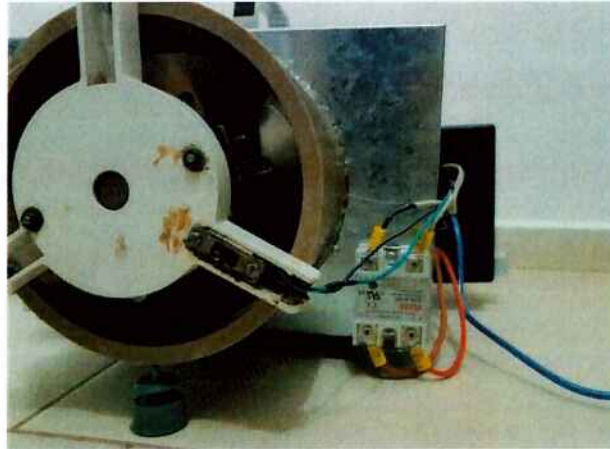


Fonte: Autores

I) Integração forno - parte física/elétrica:

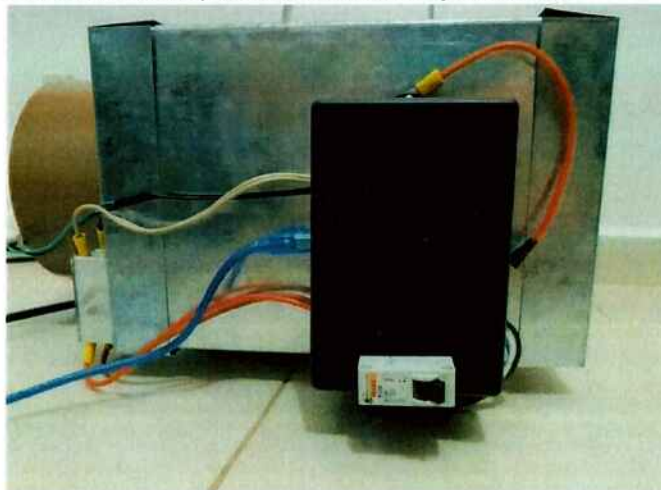
- Inserção do arduino e da placa de circuito impresso em uma caixa de plástico fixada na lateral do forno;
- Adicionar furos para cada conexão descrita no slide anterior, adicionando a saída USB ligando o arduino ao computador;
- Fixação do SSR do SSR na lateral do forno, na parte metálica, para dissipação de calor.

Figura 25: SSR acoplado na carcaça do forno



Fonte: Autores

Figura 26: Caixa com os componentes, arduíno e disjuntor dentro



Fonte: Autores

4.2 Lista de Materiais e orçamento

Uma vez construído o forno, fez-se a lista de materiais utilizados na tabela abaixo e o seu respectivo custo no orçamento, usado para estimar o custo total do projeto.

4.2.1 Lista de Materiais

Tabela 6: Lista de materiais

Quantidade	Item	Quantidade	Item
1	Rele SSR		
1	Arduino		
Resistores		Carcaça	
1	Resistor 3.3K		Carcaça externa
1	Resistor 100		Carcaça interna
2	Resistor 220		Laterais internas
2	Resistor 10K		Laterais externas
2	Resistor 1K	2	cantoneiras (guias)
1	Resistência 1300W	1	tela zinco 23x23cm
Capacitor		Parafusos	
1	0.22uF	8	parafusos 4cm
Cis		15	parafusos 1cm
1	Ampop LM358N	3	parafusos 15cm
1	Optoacoplador PC817	28	porcas 5mm
1	Optoacoplador MOC3021	15	rebites
1	Triac BTA26 600B	Outros	
2	Termopar tipo K	1	Cano de PVC 15cm
Fios		1	Hélice 15cm
5m	Fio 2.5mm	5	pés
7m	Fio Silicone 2.5	1m ²	Lã de vidro
Outros Elétrica		1	motor
0	Fonte 5Vdc		
1	Placa de Fibra de Vidro 5x5		
3	Placa de Fibra de Vidro 10x10		
1	Protoboard 20cm		
10	Conectores (emenda de fio)		
2	Fita isolante		
1	Plug tomada 20A		

Fonte: Autores

4.2.2 Orçamento

Tabela 7: Orçamento

Data	Produto	Preço
31/08	Carcça do forno	\$ 80.00
09/10	Parafusos	\$ 10.00
06/10	Protoboard	\$ 22.00
03/05	Arduino	\$ 43.70
31/07	Helice	\$ 33.90
31/08	Resistencia airfryer	\$ 29.90
15/05	Termopar	\$ 18.90
12/07	Rele SSR	\$ 48.89
19/07	Componentes eletroni	\$ 65.60
19/07	Cabo silicone	\$ 26.60
13/09	Placa+Estanho+Clis	\$ 13.80
18/09	Pézinhos	\$ 10.00
10/11	Caixa + componentes	\$ 57.30
	Total	\$ 460.59

Fonte: Autores

5 PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DE TEMPERATURA

5.1 Implementação do controle

5.1.1 Controle PID - Método Ziegler Nichols

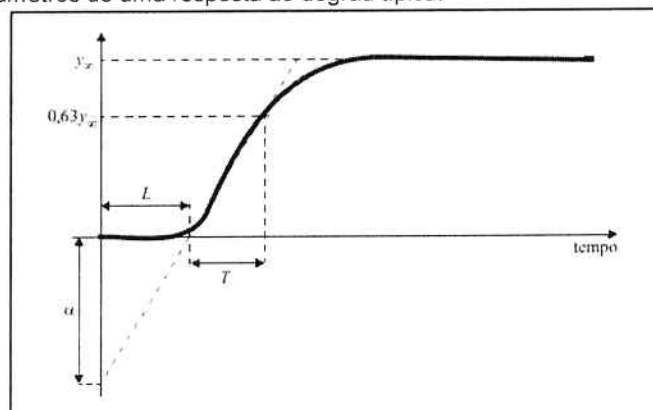
O controle PID de malha fechada é uma das técnicas de controle mais utilizadas na indústria em geral devido a sua fácil implementação e os amplos estudos que há sobre ela na literatura em geral. Este controle implica na implantação de um controlador com três partes: Proporcional (K_p), Integrativo (K_i) e Derivativo (K_d). O sinal de controle $U[n]$ é calculado segundo a seguinte equação:

Técnica de controle PID

$$u(t) = K_p * e(n) + K_i * \int_{t=0}^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1)$$

Há diversos métodos para o cálculo dos coeficientes K_p , K_i e K_d na literatura. Neste trabalho optamos por escolher o método Ziegler Nichols no domínio do tempo (LABORATÓRIO DE CONTROLE, 2015), o qual consiste na análise da resposta ao degrau do sistema e, com base nesta, o levantamento dos parâmetros α, L, T, y_∞ , conforme o Gráfico 2. A partir destes, é calculado os parâmetros do controle PID, conforme Tabela 8.

Gráfico 2: Parâmetros de uma resposta ao degrau típica.



Fonte: LABORATÓRIO DE CONTROLE (2015)

Tabela 8: Método de Ziegler-Nichols para resposta ao degrau

Controlador	K_p	T_I	T_D
P	$1/\alpha$		
P+I	$0,9/\alpha$	$3L$	
P+I+D	$1,2/\alpha$	$2L$	$0,5L$

Fonte: LABORATÓRIO DE CONTROLE (2015)

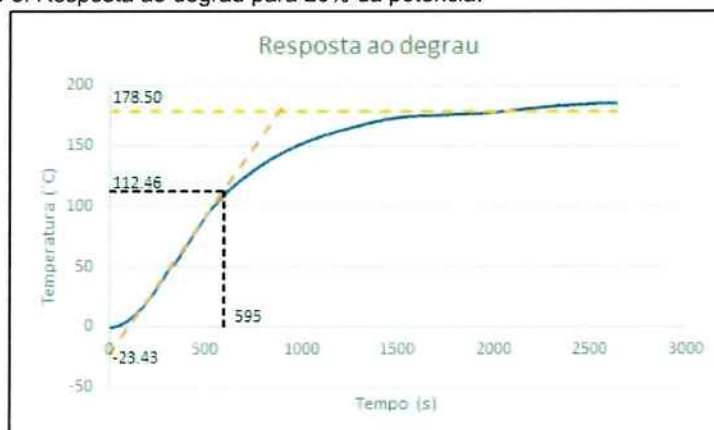
Os parâmetros T_i e T_d podem ser transformados nos parâmetros K_i e K_d conforme equação (5.2). Foi escolhido o período de amostragem T_a igual a um segundo. Devido a lentidão típica de sistemas térmicos, não é necessária uma alta frequência de amostragem.

Transformação de parâmetros

$$K_d = K_p * \frac{T_d}{T_a} \quad K_i = K_p * \frac{T_a}{T_i} \quad (5.2)$$

Devido ao limite de confecção do forno, não é seguro levantar a resposta ao degrau a potência máxima pois o isolamento e os componentes internos foram construídos para operar em uma temperatura máxima de 250 graus. Por isso, adaptou-se o teste para 20% da potência total da resistência. Assim foi possível garantir que a temperatura estivesse dentro dos limites esperados.

Gráfico 3: Resposta ao degrau para 20% da potência.



Fonte: Autores

Tabela 9: parâmetros da resposta ao degrau.

Parâmetro	Valor
y_{∞}	178.50
$0.63 * y_{\infty}$	112.46
α	23.43
L	102.51
T	492.49

Fonte: Autores

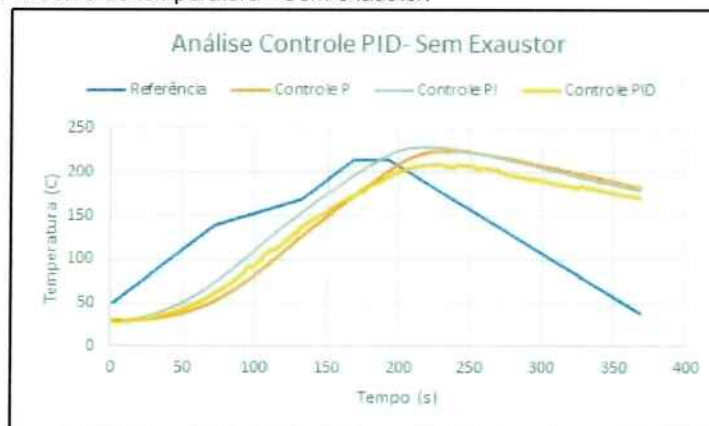
Tabela 10: Coeficientes para os controles PID

Controlador	Potência: 20%			Potência: 100%		
	Kp	Ki	Kd	Kp	Ki	Kd
P	0.0427	-	-	0.2134	-	-
PI	0.0384	2.498e-5	-	0.1920	1.249e-4	-
PID	0.0512	5.120e-5	0.5249	0.2560	2.560e-4	2.6246

Fonte: Autores

Aplicando-se os controles P, PI e PID a planta do forno obteve-se diferentes respostas, dentre as quais os controles P e PI apresentaram uma resposta com menor atraso, porém apresentaram um grande sobressinal, enquanto o controle PID não teve sobressinal, porém seu atraso foi de quase cem segundos. Vale ressaltar que, dentre os 3 controladores, o controlador PI apresentou o melhor resultado.

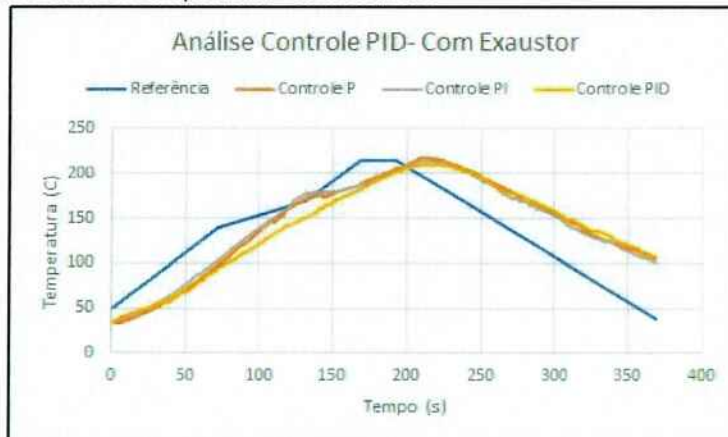
Gráfico 4: Curva de temperatura - Sem exaustor.



Fonte: Autores

Para corrigir o sobressinal, optou-se pelo uso do exaustor. Desta forma, assim que a temperatura medida estiver maior que a temperatura de referência, o exaustor é ativado, evitando o sobressinal. Com esta modificação, os controladores apresentaram uma resposta sem sobressinal, porém ainda com atraso relevante.

Gráfico 5: Curva de temperatura - Com exaustor



Fonte: Autores

Além disso, o resfriamento de maneira natural é muito lenta, o que faz com que o processo de soldagem dure mais que o esperado. Isto mostra a necessidade de utilizar ambos os atuadores no processo: Resistência e exaustor. Desta forma obteve-se um resfriamento até 4 vezes mais rápido.

Mesmo com o uso de ambos os atuadores, a curva de temperatura ainda apresenta um erro muito alto em relação a curva de referência devido a lentidão e atraso da planta que, apesar de serem consideradas no método utilizado, o controle PID ainda não apresentou uma solução satisfatória para o processo como todo, porém apresentou um erro baixo para determinadas etapas da curva. Com base nisso, uma nova abordagem é apresentada no capítulo 5.1.2.

5.1.2 Controle chaveado e Máquina de estados

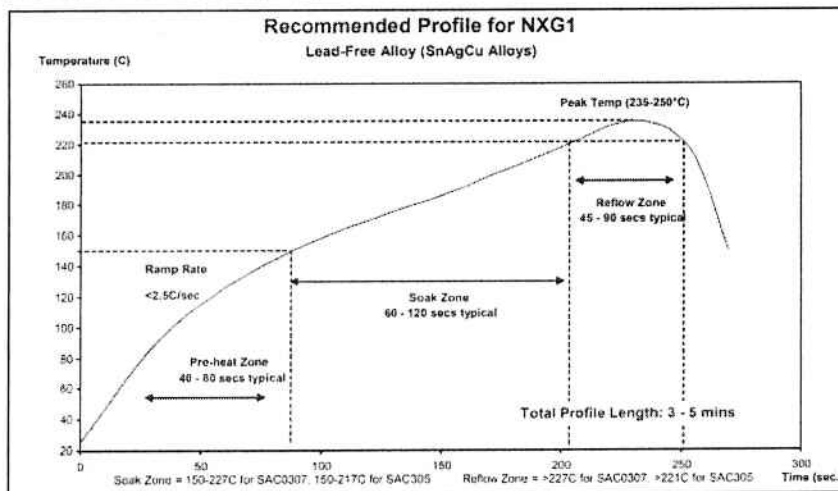
A planta em questão é um sistema híbrido, por ser um sistema com dois tipos de dinâmicas diferentes que coexistem e interagem (aquecimento e resfriamento). Sistemas híbridos são naturalmente indisciplinados, e um sistema chaveado pode ser entendido como uma família de subsistemas dinâmicos com uma lei e

chaveamento entre eles (LIBERZON; MORSE, 1999), sendo este uma particularidade de um sistema híbrido.

Uma máquina de estados, programada em Arduino, pode implementar um controle chaveado, cuja lei de comutação vai ser controlada e dependente do tempo (i.e. o sinal de chaveamento - de mudança de estado - será controlado diretamente dependente do estado ou do tempo). A máquina de estados será do tipo Moore, com sinais de controle associados ao estado, cujas transições serão determinadas pelo tempo (temporizador interno do Arduino) e pela temperatura (sinal do termopar).

O controle chaveado consiste no particionamento do espaço de estados e imposição de controles a cada estado. Para efeitos de simplificação, apenas um estado será considerado, uma vez que o objetivo é o controle da curva de temperatura. A curva sugerida de temperatura é a que segue:

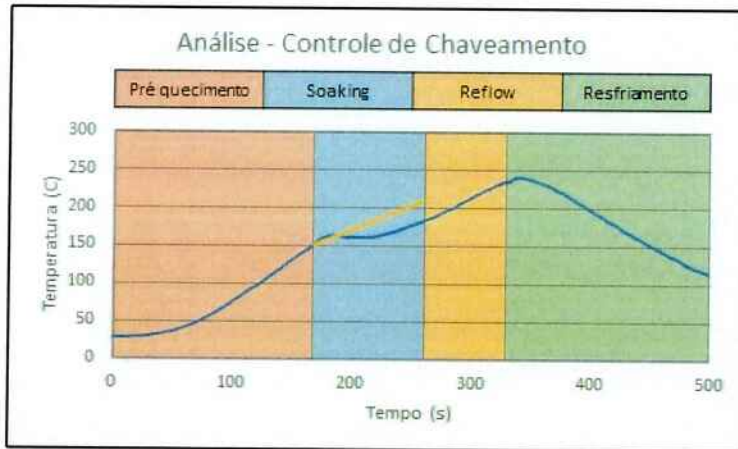
Gráfico 6: Curva de solda para pasta no clean SAC305



Fonte: www.kester.com

Quatro etapas serão implementadas em estados: Pré aquecimento, Soaking, Reflow e Resfriamento. Os estados serão seis: Desligado (Estado inicial - idle), Resfriamento forçado, Pré aquecimento, soaking, Reflow e Resfriamento. O chaveamento entre os estados será dado pela interação com o usuário, tempo e temperatura. A cada estado será imposto uma lei de controle. O controle de chaveamento é apresentado no gráfico à seguir.

Gráfico 7: Curva de temperatura - Controle chaveado.



Fonte: Autores

Em relação ao funcionamento dos estados:

- i. Desligado: estado de idle, aguardando interação do usuário para iniciar o processo;
- ii. Pré-aquecimento: neste estado, os sinais de controle de temperatura (resistência) são setados em 100% até que a temperatura de 150 graus seja atingida;
- iii. Soaking: neste estado foi utilizado um controle PI;
- iv. Reflow: neste estado a resistência é setada em 100%;
- v. Resfriamento: neste estado a resistência é desligada e o exaustor ligado em 100% por tempo indeterminado. É o estado final do processo, para voltar ao estado Desligado é necessário Desligar o processo (botão de desligar na interface); e
- vi. Resfriamento Forçado: Estado auxiliar, em caso de algum problema, no qual o usuário poderá forçar o resfriamento a 100% e desligar a resistência.

O principal objetivo é a melhor automatização do processo, isto é, fazer com que o forno siga da melhor maneira possível o perfil de temperatura adequado. A escolha do controle chaveado (através da máquina de estados) deu-se por ter-se mostrado alternativa funcional, com resultados muito próximos do desejado.

A justificativa para os controladores utilizados encontra-se em 5.1.1: O controle PI combinado ao controle on/off do exaustor apresentou o melhor resultado,

com menos atraso em relação à referência e pouco sobressinal. A escolha do controle foi experimental.

5.2 Programação do arduino

O microcontrolador escolhido para integrar os módulos do forno foi o Arduino Rev3 Atmega 328, e sua programação feita com o próprio software Arduino. O código desenvolvido para o microcontrolador se encontra no anexo B.

Ao microcontrolador, foram conectados pinos de saída para o SSR, que chaveia a alimentação da resistência, e para o TRIAC, que chaveia a alimentação do exaustor. Também foram ligados os pinos de entrada ao CI MAX6675, que lineariza o valor de temperatura lido pelo termopar.

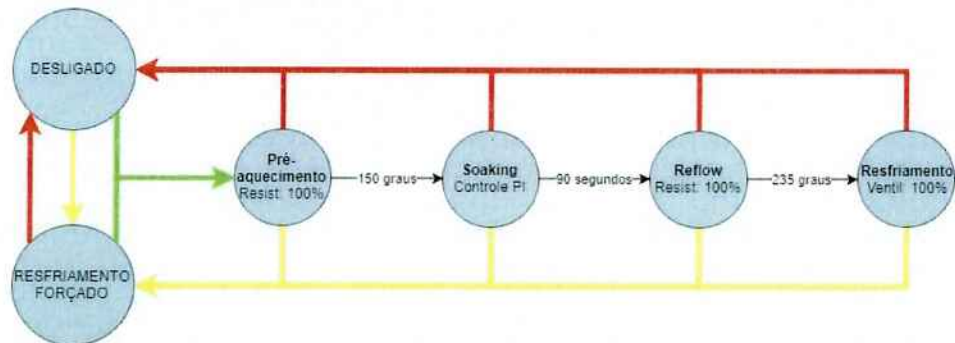
Também é utilizado um cabo micro USB para alimentar o arduino e para estabelecer a conexão serial entre o microcontrolador e o computador, onde é rodado o programa de interface do usuário.

Durante seu funcionamento, o microcontrolador sofre uma interrupção a cada segundo, que atualiza os valores de tempo e temperatura. De acordo com os valores amostrados e com a fase em que processo de soldagem que ele se encontra, os pinos de saída são ativados ou desativados, para chavear a resistência e o exaustor e controlar a temperatura de acordo com o perfil de solda definido.

Pode-se ver na máquina de estados a seguir as etapas do processo de fusão da solda SMD, que regem o funcionamento dos atuadores, assim como o efeito da intervenção do usuário ao apertar os botões coloridos vermelho, amarelo e verde.

Após o processo de interrupção, o arduino envia pela porta serial um string contendo o valor do tempo, da temperatura e a fase atual do processo, para serem exibidos ao usuário através da interface. Ao mesmo tempo, o programa da interface pode enviar a qualquer momento uma mensagem serial definindo se o forno deve ligar, desligar ou resfriar.

Figura 27: Máquina de estados



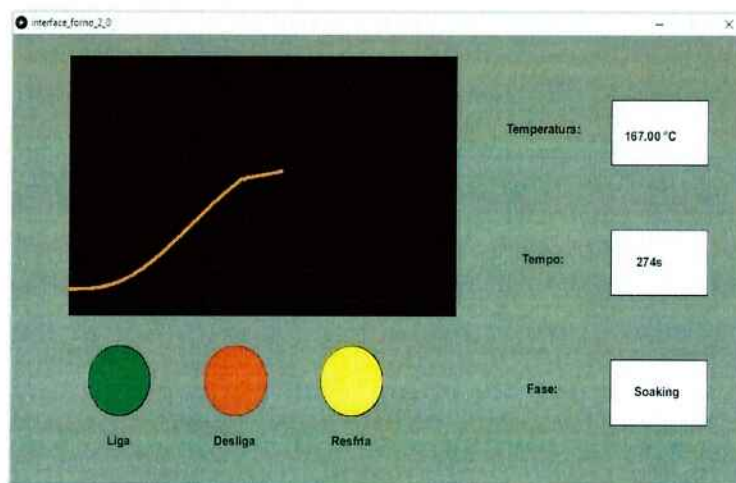
Fonte: Autores

5.3 Programação da interface

O programa utilizado para criar a interface do forno foi o Processing, uma ferramenta de desenvolvimento comumente usada para dispor dados provenientes do arduino de forma gráfica.

O código criado, encontrado no anexo C, recebe a cada segundo um string do arduino contendo a temperatura, o tempo e a fase atual do processo de soldagem. Estes valores são dispostos no lado direito da tela, para que o usuário possa acompanhar o processo e verificar se não há falhas no funcionamento do forno.

Figura 28: Interface do forno de solda SMD



Fonte: Autores

Na parte inferior da interface, encontram-se os botões que determinam o estado do forno: Ligado, Desligado ou Resfriamento. O tempo só é contado enquanto o forno estiver ligado, caso contrário será zerado, até que o processo seja iniciado novamente.

Enquanto o forno está no modo ligado, os valores de temperatura recebidos do microcontrolador são armazenados e mostrados em um gráfico de temperatura por tempo, exibindo em tempo real o perfil de temperatura do processo até o tempo de 500s. Observa-se na figura a seguir uma captura da interface durante tal processo.

6 RESULTADOS

Após o teste do controle de temperatura, projeto da máquina de estados e programação da interface, o forno de solda SMD está pronto para realizar testes de soldagens.

O teste foi feito com uma placa de fibra de vidro de medidas 10cm x 10cm, pasta de solda "SAC305 *no clean*" e três resistores de valores variáveis. Para analisar a uniformidade da solda, foram espalhadas gotas da pasta de diferentes tamanhos por toda a superfície da placa a ser soldada.

Após a aplicação da solda, a placa foi levada ao forno e colocada corretamente na parte de trás da bandeja, de forma a placa ficar abaixo da resistência. Desta forma o calor será mais uniformemente espalhado pela superfície da placa.

O processo de soldagem durou por volta de 600 segundos (10 minutos) até que a placa estivesse em uma temperatura segura para que seja retirada (40 graus). Após a retirada com cuidado da placa, constatou-se que a solda foi realizada de forma correta apesar de apresentar resíduos de fluxo não evaporado.

O fluxo, parte aquosa da solda, é essencial para evitar a oxidação dos metais durante o processo de formação das ligas e, portanto, deve estar presente ao longo deste. Porém durante o processo este vai evaporando de forma que, em condições ideais, ao fim do processo o fluxo 100% do fluxo seja evaporado e a solda esteja pronta. Este ponto é crítico pois caso falte o fluxo, a solda não será feita com perfeição, podendo ficar porosa e quebradiça.

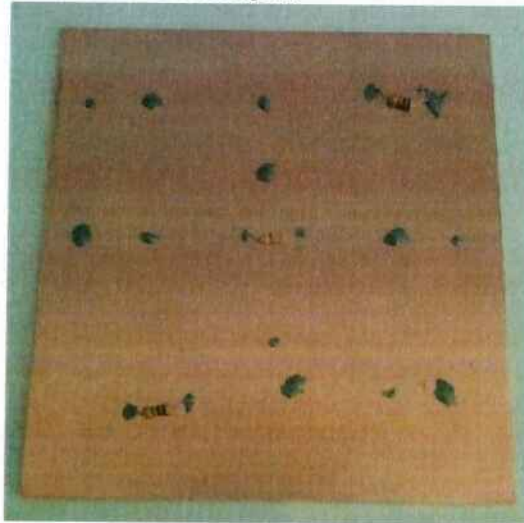
No teste realizado, todos os pontos de solda chegaram a uma consistência satisfatória. No entanto, o fluxo de solda não foi completamente evaporado, restando resíduos ao redor dos pontos de solda, em especial os que possuíam grande quantidade de pasta de solda.

Este resultado pode-se dever ao fato de a pasta de solda usada, apesar de se tratar de um produto *no clean*, era relativamente antiga, o que pode ter ocasionado alterações nas propriedades do fluxo presente nela. Maiores tempo e temperatura de exposição não melhoraram a qualidade do processo.

Desta forma, para finalizar o processo, limpou-se a placa com o uso de álcool isopropílico e uma superfície macia como uma flanela. Uma vez feito isso, esta apresentou o resultado esperado.

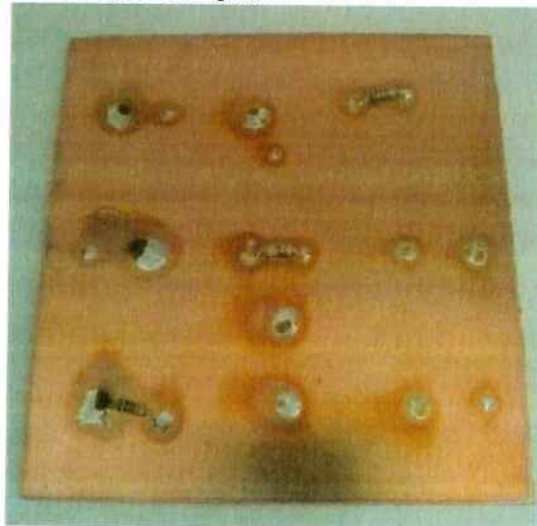
Vale ressaltar também que não houve delaminação da placa, que pode ser ocasionada quando a placa é exposta a temperaturas muito altas por um longo período de tempo, garantindo a integridade do circuito.

Figura 29: Placa de teste antes da soldagem.



Fonte: Autores

Figura 30: Placa de teste após soldagem.



Fonte: Autores

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este projeto de formatura apresentou o projeto, montagem e automação de um forno com controle de temperatura para soldas de componentes eletrônicos SMD, no qual os resultados foram apresentados no capítulo 6.

Para uma melhor compreensão do trabalho efetuado, o Capítulo 2 trata-se de um estudo bibliográfico de artigos, livros e textos acadêmicos, cuja finalidade foi compreender e comprovar a base teórica para o projeto do forno. Foram revisadas as principais leis da termodinâmica, o processo de modelagem de sistemas térmicos e o processo de soldagem por refusão.

No Capítulo 3 foi projetado o forno através da divisão do seu funcionamento em módulos, suas correlações e integração, dimensionamento da estrutura física, materiais adequados para a carcaça e isolamento, cálculo do isolamento térmico adequado e da potência da resistência. Aqui é apresentado o projeto final, desenhado e dimensionado. A construção do forno e suas etapas são apresentadas detalhadamente no Capítulo 4, o qual pode ser usado como manual para a reconstrução do produto.

A partir do Capítulo 5, implementa-se o controle e realiza-se os testes funcionais a fim de verificar qual é a melhor estratégia a ser seguida para que o forno siga a curva de temperatura. Foram feitos testes com controles P, PI e PID, controle chaveado (através de máquina de estados) com e sem o exaustor (resfriamento) ativado, e verificou-se que o controle chaveado apresentou melhores resultados.

Após as análises feitas (Capítulo 6), verificou-se que o forno foi capaz de efetuar a soldar sem delaminação da placa de fibra de vidro, como esperado.

Ao fim do projeto obteve-se um produto final de acordo com as especificações iniciais, apesar de o tempo total do processo ser maior que o desejado inicialmente constatou-se que isto não atrapalhou a qualidade da solda. Desta forma o produto final inova na realização de soldas SMD, possibilitando a confecção de uma solda de qualidade em placas de até 15 cm de comprimento em qualquer lugar com acesso a energia elétrica, em um equipamento robusto e leve que pode ser transportado sem maiores problemas.

Como retribuição para Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o grupo decidiu por doar o produto final deste trabalho para instituição a fim de

fomentar a pesquisa na área de Engenharia Elétrica e contribuir para a formação de futuros(as) engenheiros(as).

Por fim a seguir é listado dicas de possíveis melhorias no projeto caso este seja estudado por outro aluno no futuro:

- i. Redimensionar a resistência para uma maior folga sobre o controle de temperatura;
- ii. Pesquisar formas alternativas ao controle de chaveamento que antecipem a inércia e atraso da resistência e suas implementações;
- iii. Substituir o motor, para um de maior potência, que resfrie o sistema mais rapidamente;
- iv. Implementar o controle de velocidade do motor exaustor AC;
- v. Estudar a necessidade de insuflar ar em substituição à exaustão.
- vi. Realizar a modelagem térmica para analisar a eficiência do produto.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, J. A. "Construção de um Forno Tubular Rotativo utilizando Lâmpadas Halógenas para a Síntese de Nanopartículas". 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza-CE, 2011.

CHHANWAL, N. et al. "Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process". 2010. Journal of Food Engineering, Central Food Technological Research Institute, Council of Scientific and Industrial Research, India. Abril, 2010.

CORDEIRO, D. A. S. "Uso do compensador PID no controle de temperatura de um forno elétrico à resistência para soldagem de componentes SMD". 2016. 89 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Departamento de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

DS TOOLS. "Processo de soldagem de componente SMD", 2011. Disponível em: <<<http://www.dstools.com.br/processo-de-soldagem-de-componente-smd>>> Acesso em: 09/04/2017.

_____. "Introdução à tecnologia SMD", 2011. Disponível em: <<<http://www.dstools.com.br/introducao-a-tecnologia-smd>>> Acesso em: 09/04/2017.

KESTER, "Technical Datasheet: NP505 Solder Paste", 2015. Disponível em: <<https://www.kester.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=862&language=en-US&PortalId=0&TabId=96>> Acesso em 02/12/2017.

LABORATÓRIO DE CONTROLE, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2015 (Apostila).

LEWIS, R. et al; "Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow". New York: Editora Wiley, 2004.

LIBERZON, D.; HESPANHA, J. P.; MORSE, A. S. "Stability of switched systems: a Lie-algebraic condition". **Systems and Control Letters**, Elsevier, v.37, n.3, p.117–122, 1999.

MECENEIRO, G. D; CONRADO, B. S.; XIMENES, R. L.; SANTOS, T. S. "Desenvolvimento de Forno para Solda de Componentes SMD" **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, v.4, n.1, 2016.

MISTRY, H. et al, "Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens", *GE Global Research Centre*; Fevereiro, 2006.

MORGENSZTERN, A. E. "*Desenvolvimento de um Forno de Solda por Refusão Controlado por Meio de um Microcontrolador*", 2011. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), UNESP; Julho, 2011.

MORAN, M. J. et al.. "*Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos*", São Paulo: LTC Editora. 2005.

OLIVEIRA, P.J, "*Transmissão de calor - convecção natural*", Departamento Engenharia Electromecânica, UBI, Agosto 2014 . Disponível em: <<<http://webx.ubi.pt/~pjp/TransCal2.pdf>>> Acesso em 05/2017.

PCB POWER. "*Taking care of warpage and thermal profile issues during assembly*", 2017. Disponível em: <<<http://www.pcbpower.com/taking-care-warpage-thermal-profile-issues-assembly>>> Acesso em 02/12/2017.

PINELLI, M. "*Thermal and fluid dynamic analysis of an air-forced convection rotary bread-baking oven by means of an experimental and numerical approach*"; (Thesis).Università degli Studi di Ferrara, Itália; Fevereiro, 2017.

SANT'ANNA JÚNIOR, J. P., "*SISCONTROL: sistema de controle digital de temperatura para forno de solda BGA e SMD*", 2013.Trabalho de Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Maio, 2013.

SILVA, D. H. "*Projeto de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio*". 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 15 dez. 2016.

SURFACE MOUNT PROCESS. "*Welcome to surface mount process*", 2015. Disponível em: << <http://www.surfacemountprocess.com> >> Acesso em 09/04/2017.

USINAINFO. "*Solda em pasta: Definição e composição*", 2015. Disponível em: <<<http://blog.usinainfo.com.br/solda-em-pasta-definicao-e-composicao>>> Acesso em 10/04/2017.

ANEXOS

Anexo A: Propriedades termofísicas do ar a pressão atmosférica

TABLE A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Fonte: Incropera (2011, p. 911).

Anexo B: Código do microcontrolador

```

#include "max6675.h"
#include <PID_v1.h>

int estado=2;           // estado de funcionamento do forno: 1) ligado; 2) desligado; 3) resfriamento
int fase=4;            // fase do processo de aquecimento: 0) preheating; 1) soaking; 2)reflow; 3)
resfriamento; 4)desligado; 5) resfriamento forçado
String stemp="";       // armazena valor de temp em string
String stempo="";     // armazena valor de tempo em string
float temp;           // temperatura medida
int tempo;           // tempo do processo de solda
int tempoSoaking=0;  // marca o instante em que começou o soaking, 0 se ainda nao foi setado
float erro;          // diferenca entre temperatura desejada e medida no instante
float resist;        // porcentagem de ativacao da resistencia
float motor;         // porcentagem de ativacao do motor
String palavra;      // string enviada para o processing, dados para serem mostrados na interface
(Nao usado neste programa)
int timer1_counter;  // timer da interrupcao de 1Hz
int i;               // contador generico
int tempAlvo[90];   // vetor de temperaturas desejada para o soaking do processo de solda
int tempAmb = 23;

const int zeroCrossPin = 2; //Entrada no arduino, detecta os picos da rede
const int ssr0Pin = 4;     // Saída que vai para o ssr, manter sempre em zero
const int ssr1Pin = 3;     // Saída que vai para o ssr, um para ligar e zero para desligar
const int motorPin = 5;    // Saída que vai para o motor, um para ligar e zero para desligar
int ktcSO = 18;           // pino para funcionamento do termopar
int ktcCS = 17;          // pino para funcionamento do termopar
int ktcCLK = 16;         // pino para funcionamento do termopar

int intPronto = 0;       // flag para avisar que a interrupcao foi feita
double Setpoint, Input, Output; // Variaveis relacionadas ao PID
double Kp = 50;          // Constante proporcional do PID
double Ki = 0.12;        // Constante integrativa do PID
double Kd = 0;           // Constante derivativa do PID

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO); //setup do termopar

PID PIDresist(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT); //setup do PID

void setup() {

  //Preparacao da interrupcao de 1Hz

  noInterrupts();       // disable all interrupts
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;

  timer1_counter = 3036; // preload timer 65536-16MHz/256/1Hz

  TCNT1 = timer1_counter; // preload timer

```

```

TCCR1B |= (1 << CS12); // 256 prescaler
TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // enable timer overflow interrupt
interrupts();

//Estabelecendo a curva alvo de temperatura no array tempAlvo, sendo cada ponto separado em 1s,
para o período de soaking

for(i=0; i<90;i++)
  tempAlvo[i]=150+0.66*i;

//iniciando processo com tempo = 0
tempo=0;

//Preparacao da porta serial
Serial.begin(9600);
delay(500);

//inicializando as variaveis usadas para controle PID
Input = ktc.readCelsius();;
Setpoint = tempAlvo[0];

//Ligando o PID e definindo os limites do output
PIDresist.SetMode(AUTOMATIC);
PIDresist.SetOutputLimits(0, 1000);
PIDresist.SetSampleTime(500);

// definindo os pinos de saida no arduino
pinMode(ssr0Pin, OUTPUT);
pinMode(ssr1Pin, OUTPUT);
pinMode(motorPin, OUTPUT);
digitalWrite(ssr0Pin, LOW);
digitalWrite(ssr1Pin, LOW);
digitalWrite(motorPin, LOW);
}

ISR(TIMER1_OVF_vect) // interrupcao a cada 1s: calcula o PID e envia as informacoes pela
porta serial
{
tempo++;
temp=ktc.readCelsius();
intPronto=1; // ativa o flag para avisar que ocorreu interrupcao

//Pre-heating

if(fase==4){
  digitalWrite(ssr1Pin, LOW);
  digitalWrite(motorPin, LOW);
  Output=0;
}
}

```

```

if(fase==5){
  digitalWrite(ssr1Pin, LOW);
  digitalWrite(motorPin, HIGH);
  Output=0;
}

if(fase<4){
  if(temp<150&&fase==0){
    digitalWrite(ssr1Pin, HIGH); // ativa a resistencia na potencia maxima até atingir 150 graus
    digitalWrite(motorPin, LOW);
    Output=1000;
  }

  else{

    //soaking

    if(fase==0){
      tempoSoaking=tempo; // define o ponto em que começou o soaking
      fase=1;
    }

    if(fase==1&&tempo-tempoSoaking<90){
      Input = temp- tempAmb; //prepara as entradas do PID
      Setpoint = tempAlvo[tempo-tempoSoaking]- tempAmb;
      PIDresist.Compute(); //Calcula o tempo de ativacao da resistencia

      if(Output>0)
        digitalWrite(ssr1Pin, HIGH); //Liga a resistencia para ser desligada no main após o tempo
necessario
      else
        digitalWrite(ssr1Pin, LOW); //Desativa a resistencia caso nao ela nao seja necessaria

      if(tempAlvo[tempo-tempoSoaking]-temp<0)
        digitalWrite(motorPin, HIGH);
      else
        digitalWrite(motorPin, LOW);
    }
  }
  else
  {
    if(fase==1)
      fase=2; //entra na fase de reflow

    // reflow
    if(fase==2&&temp<233){
      digitalWrite(ssr1Pin, HIGH); // ativa a resistencia na potencia maxima até atingir 233
      digitalWrite(motorPin, LOW);
      Output=1000;
    }
  }
}

```

```

else
{
fase=3;      // entra na fase de resfriamento

// resfriamento

digitalWrite(ssr1Pin, LOW);    // desativa a resistencia e ativa o exaustor
digitalWrite(motorPin, HIGH);
Output=0;
}
}
}
}

void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:

if(estado==1)
if(fase>3){
fase=0;
tempoSoaking=0;
}
if(estado==2){
fase=4;
tempo=0;
}

if(estado==3){
fase=5;
tempo=0;
}

if(intPronto==1){

if(Output>0&&Output<900){
delay(Output);
digitalWrite(ssr1Pin, LOW);
}

// Envia por porta serial os dados do processo no formato tempo,tempReal,fase

Serial.print(ktc.readCelsius());
Serial.print(",");
Serial.print(tempo);
Serial.print(",");
Serial.print(fase);
Serial.println(",");
//Serial.println(estado);

```

```
intPronto=0;

}
}

void serialEvent() {
  if (Serial.available()) {
    estado=Serial.read();
  }
  if(estado>48&&estado<52)
    estado=estado-48;
}
```

Anexo C: Código da interface

```

import processing.serial.*;

Serial myPort;
int state=2;
//float[] tempAlvo = new float[400];
float[] tempReal = new float[500];
int i;
int top =25;
int side=75;
float fx1;
float fy1;
float fx2;
float fy2;
String stemp ="5";
String stime="5";
String sfase="0";
float temp =5;
int time=5;
int flag =0;
float fase =0;
int lf=10;
String mystring;
int contVirg=0;;

void setup()
{
  // set the window size:
  size(950, 525);

  //Carrega a fonte de texto a ser utilizada
  textFont(createFont("Arial Bold", 18));
  textAlign(CENTER);

  //comentario porta serial

  // List all the available serial ports
  printArray(Serial.list());
  // Check the listed serial ports in your machine
  // and use the correct index number in Serial.list()[].

  myPort = new Serial(this, Serial.list()[0], 9600); //
  myPort.clear();
  // Throw out the first reading, in case we started reading
  // in the middle of a string from the sender.
  stemp = myPort.readStringUntil(lf);
  stemp = null;

  // A serialEvent() is generated when a newline character is received : myPort.bufferUntil('\n');

```

```
background(130); // set initial background:

//Cria o retangulo preto do grafico
fill(0);
rect(side, top, 500, 300);

// Cria o retangulo da temperatura
fill(254);
rect(side+700,top+50,125,75);
textSize(15);
fill(0);
text("Temperatura:", side+550, top+75, 125, 75);

// Cria o retangulo do tempo
fill(254);
rect(side+700,top+200,125,75);
textSize(15);
fill(0);
text("Tempo:", side+550, top+225, 125, 75);

// Cria o retangulo da fase
fill(254);
rect(side+700,top+350,125,75);
textSize(15);
fill(0);
text("Fase:", side+550, top+375, 125, 75);

textAlign(CENTER);

// Cria botão "Liga"
fill(0,255,0);
ellipse(side+65, top+375, 80, 80);
fill(0);
text("Liga", side+65, top+450);

// Cria botão "Desliga"
fill(255,0,0);
ellipse(side+215, top+375, 80, 80);
fill(0);
text("Desliga", side+215, top+450);

// Cria botão "Resfria"
fill(255,255,0);
ellipse(side+365, top+375, 80, 80);
fill(0);
text("Resfria", side+365, top+450);

}
```

```

void draw()
{

    //reescreve o retangulo preto do grafico
    if(time==0)
    {
        fill(0);
        rect(side, top, 500, 300);
    }

    textAlign(CENTER);

    //Cria retangulo branco da temperatura e escreve o valor
    fill(254);
    rect(side+700,top+50,125,75);
    if (stemp != null && stemp!=""){
        fill(0);
        text(stemp + " °C", side+750,top+75);
        temp=float(stemp);
        //println(temp);
    }

    fill(254);
    rect(side+700,top+200,125,75);
    if (stime != null && stime!=""){
        fill(0);
        text(stime + "s", side+750,top+242);
        time=int(stime);
        //println(time);
    }

    if(time>0&&time<500){
        tempReal[time-1]=temp;

        //desenhando a curva no grafico
        stroke(127,34,255); //stroke color
        strokeWeight(2); //stroke wider

        stroke(0);
        strokeWeight(1);

        //escrita do grafico

        // println(tempReal[time-1]);
        if(time>2)
        {
            stroke(255,147,0);
            strokeWeight(1);

            //println(side+1*(time-2));
            //println(side+1*(time-1));

```

```

    fx1=side+1*(time-2);
    fx2=side+1*(time-1);
    fy1=300+top-tempReal[time-2];
    fy2=300+top-tempReal[time-1];

    line(fx1,fy1,fx2,fy2);
    stroke(0);
    strokeWeight(1);
  }
}
}

fill(254);
rect(side+700,top+350,125,75);
if (sfase != null && sfase!=""){
  fill(0);
  fase=int(sfase);
  if(fase==0)
    text("Pre-Aquec", side+760,top+392);
  if(fase==1)
    text("Soaking", side+760,top+392);
  if(fase==2)
    text("Reflow", side+760,top+392);
  if(fase==3)
    text("Resfriamento", side+760,top+392);
  if(fase==4)
    text("Desligado", side+760,top+392);
  if(fase==5)
    text("Resfriamento", side+760,top+392);
}

if(state==1){

  //deixa botao liga apertado
  fill(0,150,0);
  ellipse(side+65, top+375, 80, 80);

  // deixa botao desliga desapertado
  fill(255,0,0);
  ellipse(side+215, top+375, 80, 80);

  //deixa botao resfria desapertado
  fill(255,255,0);
  ellipse(side+365, top+375, 80, 80);
}

if(state==2){

  //deixa botao liga desapertado

```

```

    fill(0,255,0);
    ellipse(side+65, top+375, 80, 80);

    // deixa botao desliga desapertado
    fill(150,0,0);
    ellipse(side+215, top+375, 80, 80);

    //deixa botao resfria desapertado
    fill(255,255,0);
    ellipse(side+365, top+375, 80, 80);
}

if(state==3){

    //deixa botao liga desapertado
    fill(0,255,0);
    ellipse(side+65, top+375, 80, 80);

    // deixa botao desliga desapertado
    fill(255,0,0);
    ellipse(side+215, top+375, 80, 80);

    //deixa botao resfria desapertado
    fill(200,170,0);
    ellipse(side+365, top+375, 80, 80);
}

}

void mouseClicked()
{

//Se o mouse for clicado em cima do botao de ligar
if (mouseX>= side+25 && mouseX<= side+105 && mouseY>=top+335 && mouseY<=top+415 )
{
    if(state!=1){
        state=1;
        myPort.write(1); //Envia o valor 1 para o arduino
    }
}

//Se o mouse for clicado em cima do botao de ligar
if (mouseX>= side+175 && mouseX<= side+255 && mouseY>=top+335 && mouseY<=top+415 )
{
    if(state!=2){
        state=2;
        myPort.write(2); //Envia o valor 2 para o arduino
    }
}
}

```

```
//Se o mouse for clicado em cima do botao de ligar
if (mouseX>= side+325 && mouseX<= side+405 && mouseY>=top+335 && mouseY<=top+415 )
{
  if(state!=3){
    state=3;
    myPort.write(3); //Envia o valor 3 para o arduino
  }
}
}
```

```
void serialEvent (Serial myPort) {
  // get the ASCII string:
  while (myPort.available() > 0) {

    char inByte = myPort.readChar();

    if(inByte==';'){
      sfase=mystring;
      contVirg = 0;
      mystring="";
    }
    else{

      if(inByte==' '){
        //println(mystring);
        if(contVirg==0)
          stemp=mystring;

        if(contVirg==1)
          stime=mystring;

        contVirg++;
        mystring="";
      }
      else
      {
        mystring=mystring+inByte;
      }
    }
  }
}
```