



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CEC AU



SOFIA PEREIRA CAMPOS

PROTÓTIPO PARA CORROSÃO OTIMIZADA DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO SOLUÇÃO AQUOSA DE
PERCLORETO DE FERRO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2022

SOFIA PEREIRA CAMPOS

**PROTÓTIPO PARA CORROSÃO OTIMIZADA DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO SOLUÇÃO AQUOSA DE
PERCLORETO DE FERRO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Profa. Karla Boaventura Pimenta Palmieri, Dra.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C198p Campos, Sofia Pereira.

Protótipo para corrosão otimizada de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de Percloroeto de Ferro. [manuscrito] / Sofia Pereira Campos. - 2022.

60 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Compostos de ferro - Percloroeto de Ferro. 2. Circuitos impressos.
3. Automação. 4. Controle automático. I. Palmieri, Karla Boaventura
Pimenta. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Sofia Pereira Campos

Protótipo para Corrosão Otimizada de Placas de Circuito Impresso Utilizando Solução Aquosa de Percloro de Ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro

Aprovada em 17 de março de 2022

Membros da banca

Dra - Karla Boaventura Pimenta Palmieri - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Paulo Marcos de Barros Monteiro - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc - Diógenes Viegas Mendes Ferreira - Universidade Federal de Ouro Preto

Karla Boaventura Pimenta Palmieri, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/04/2022



Documento assinado eletronicamente por **Karla Boaventura Pimenta Palmieri, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/04/2022, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0309861** e o código CRC **D22E616E**.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Profa Karla Boaventura por todo apoio técnico durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família por todo apoio emocional e principalmente ao meu pai Edmar por todo suporte técnico para construção do protótipo.

Ao meu namorado, Diego por todo suporte emocional e sugestões para conclusão deste trabalho.

À toda equipe do Instituto Técnico da vale pelas sugestões e disponibilidade de alguns equipamentos para desenvolvimento do trabalho.

À todos os mestres que me auxiliaram ao longo de minha graduação e me agradeceram com seus sábios ensinamentos.

“Você fará melhor se fizer com que outras pessoas queiram aprender” (Katherine Johnson)

RESUMO

A produção manual de placas de circuito impresso é uma prática amplamente utilizada no meio acadêmico. Esta possui várias etapas, sendo que a etapa de corrosão do cobre da superfície das placas de circuito impresso geralmente é a etapa mais lenta por utilizar reagentes químicos e ser dependente de reações químicas. Um dos reagentes utilizados neste processo é o percloreto de ferro, um sal de coloração laranja a marrom-preto com grande capacidade corrosiva para metais. Por se tratar de um processo lento, a utilização de solução aquosa de percloreto de ferro para corrosão de cobre acaba se tornando um gargalo para os processos de produção manual de placas de circuito impresso. Desta forma, este trabalho tem por objetivo a implementação de um protótipo de corrosão otimizada de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de percloreto de ferro. Para tal, é projetado um módulo de dimerização para integrar um sistema de controle de temperatura, sendo que para emular este sistema é implementada uma simulação do processo. Implementa-se também a montagem esperada do protótipo utilizando materiais constituintes de aço inoxidável. Como principal resultado deste trabalho foi possível emular o comportamento do módulo projetado via simulação para diferentes valores de temperatura e avaliar o comportamento do controle para constantes iniciais propostas.

Palavras-chaves: Compostos de ferro - Percloreto de Ferro; Circuitos impressos; Automação; Controle automático.

ABSTRACT

The manual production of printed circuit boards is a practice widely used in the academic. This has several steps, and the step of copper corrosion of the surface of the printed circuit boards is usually the slowest step because it uses chemical reagents and be dependent on chemical reactions. One of the reagents used in this process is perchloride iron, an orange to brownish-black salt with a high corrosive capacity for metals. As it is a slow process, the use of an aqueous solution of iron perchloride for copper corrosion ends up becoming a bottleneck for the manual production processes of printed circuit boards. Thus, this work aims to implement a prototype of optimized corrosion of printed circuit boards using aqueous solution of iron perchloride. To this end, a dimming module is designed to integrate a temperature control, and to emulate this system a simulation is implemented of the process. The expected assembly of the prototype is also implemented using materials stainless steel constituents. As the main result of this work, it was possible to emulate the module behavior designed via simulation for different temperature values and evaluate the behavior of the control for proposed initial constants.

Key-words: Iron compounds - Iron Perchloride; printed circuits; Automation; Automatic Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Protótipo para reciclagem do percloroeto de ferro.	16
Figura 2 – Esquema de classificação das placas de circuito impresso.	18
Figura 3 – Comparação entre os tipos de papeis utilizados para confecção de placas de circuito impresso.	20
Figura 4 – Caneta Condutiva MagiDeal.	20
Figura 5 – <i>Dry Film</i> para confecção de PCI.	21
Figura 6 – Energia de ativação da reação de NO_2 e CO para gerar NO e CO_2	22
Figura 7 – Esquema do circuito de um termopar.	25
Figura 8 – Diagrama básico de um microcontrolador.	26
Figura 9 – Diagrama de pinagem do PIC16F886.	27
Figura 10 – Diagrama de blocos do controle PID convencional.	29
Figura 11 – Curva de resposta de uma planta ao degrau unitário.	30
Figura 12 – Esquemático proposto para o protótipo.	32
Figura 13 – Esquemático do sistema.	32
Figura 14 – Projeto esquemático da PCI.	34
Figura 15 – Detecção de zero da rede.	34
Figura 16 – Projeto da PCI.	36
Figura 17 – Modelo 3D da PCI	36
Figura 18 – Fluxograma do processo de fabricação da PCI.	37
Figura 19 – Etapa de preparação da PCI.	38
Figura 20 – Etapa de pintura da PCI.	38
Figura 21 – Etapa de centrifugação da PCI.	39
Figura 22 – Etapa de colocação do fotolito e exposição a luz ultravioleta.	39
Figura 23 – Etapa de revelação do circuito.	40
Figura 24 – Etapa de corrosão e teste de continuidade.	40
Figura 25 – Etapa de acabamento da PCI (Parte 1).	41
Figura 26 – Etapa de acabamento da PCI (Parte 2).	41
Figura 27 – <i>Loop</i> do código principal do programa.	43
Figura 28 – Simulação do sistema.	43
Figura 29 – Montagem do sistema do protótipo.	44
Figura 30 – Condições iniciais do sistema.	44
Figura 31 – Resposta do sistema para uma temperatura de 19°C.	45
Figura 32 – Comparativo dos sinais associados ao circuito para temperatura de 19°C.	46
Figura 33 – Comparação entre o sinal esperado e o sinal de controle para temperatura de 19°C.	46

Figura 34 – Ampliação - Comparação entre o sinal esperado e o sinal de controle para temperatura de 19°C.	47
Figura 35 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle e suas implicações. . .	48
Figura 36 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle e suas implicações e comparação com o valor de controle esperado.	48
Figura 37 – Resposta do sistema para uma temperatura de 70°C.	49
Figura 38 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle para temperatura de 70°C.	49
Figura 39 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle para temperatura de 70°C e comparação com o sinal de controle desejado.	50
Figura 40 – Resposta do sistema para uma temperatura de 120°C.	51
Figura 41 – Montagem do sistema do protótipo.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais módulos do PIC16F886	28
Tabela 2 – Estimativa das constantes de uma planta como proposto por (ZIEGLER; NICHOLS et al., 1942)	30
Tabela 3 – Códigos fonte e de cabeçalho e suas funções	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO	Monóxido de carbono
CO_2	Gás carbônico
Cu	Cobre
$CuCl$	Cloreto cuproso
$CuCl_2$	Cloreto cúprico
$FeCl_2$	Cloreto de ferro II
$FeCl_3$	Percloreto de ferro
$Fe(OH)_3$	Hidróxido de ferro
HCl	Ácido clorídrico
H_2O	Água
ICSP	<i>In Circuit Serial Programming</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
NO_2	Dióxido de nitrogênio
NO	Óxido nítrico
O_2	Oxigênio
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCB	<i>Printed Circuit Boards</i>
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Estado da arte	15
1.2	Objetivos gerais e específicos	16
1.3	Justificativa do trabalho	17
1.4	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Placas de circuito impresso	18
2.2	Métodos de transferência do circuito para placas de circuito impresso.	19
2.2.1	<i>Método térmico</i>	19
2.2.2	<i>Tinta condutiva</i>	19
2.2.3	<i>Método fotossensível</i>	19
2.2.3.1	Dry Film	21
2.3	Cinética química e velocidade de reação	21
2.4	Percloroeto de Ferro	22
2.5	Mecanismos de transferência de calor	23
2.6	Termopar do tipo K	25
2.7	Resistor ôhmico	25
2.8	Microcontrolador PIC	26
2.8.1	<i>Microcontrolador PIC16F886</i>	27
2.9	Controle PID	28
2.9.1	<i>Sintonia de controladores</i>	29
2.9.1.1	Método de Ziegler-Nichels	29
3	DESENVOLVIMENTO	31
3.1	Protótipo proposto	31
3.2	Dimensionamento da resistência de imersão	32
3.3	Projeto e fabricação da placa de circuito impresso	33
3.3.1	<i>Circuito Detector de Zero da rede</i>	33
3.3.2	<i>Circuito de alimentação</i>	33
3.3.3	<i>Microcontrolador</i>	33
3.3.4	<i>Circuito do LCD</i>	35
3.3.5	<i>Circuito ICSP</i>	35
3.3.6	<i>Circuito do termopar do tipo K</i>	35
3.3.7	<i>Circuito relé de estado sólido</i>	35
3.3.8	<i>Projeto da PCI</i>	35

3.3.9	<i>Confecção da PCI pelo método fotossensível</i>	35
3.3.9.1	Preparação da PCI	37
3.3.9.2	Pintura da PCI	37
3.3.9.3	Centrifugação	38
3.3.9.4	Colocação do fotolito e exposição a luz U.V.	38
3.3.9.5	Revelação	39
3.3.9.6	Corrosão e teste de continuidade	39
3.3.9.7	Acabamento final da placa	40
3.3.9.8	Soldagem	41
3.4	Desenvolvimento do código	41
3.5	Simulação do protótipo	42
4	RESULTADOS	44
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DA RESISTÊNCIA- ADAPTA- TADO DE (PARIZOTTO, 2017)	57
	APÊNDICE A – DIAGRAMA INTERNO DO PIC16F886	59
	APÊNDICE B – REGISTRADORES DE FUNÇÕES ESPECIAIS DO PIC16F886	60

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o *World PCB Production Report for the Year* divulgado pela [IPC \(2017\)](#) a indústria global de placas de circuito impresso (PCIs) alcançou um crescimento real estimado de 13,9% em 2017, o crescimento mais rápido desde o ano de 2010. Alinhado ao crescimento industrial da demanda por PCIs cresce também a produção manual destas causando uma demanda por produtos e materiais necessários para o processo de manufatura.

A produção manual de uma placa de circuito impresso possui várias etapas, sendo que a etapa de corrosão do cobre geralmente é a etapa mais lenta por utilizar reagentes químicos e ser dependente de reações químicas. Esta etapa geralmente demora entre 40min a 2h para se concretizar sendo que a solução utilizada é geralmente reutilizada até perder sua capacidade de corrosão ou ser reciclada.

Dentre os reagentes químicos utilizados nos processos de produção manual destaca-se a utilização de solução aquosa de percloreto de ferro(ou - cloreto férrico) para corrosão do cobre sendo este um método vantajoso para a produção manual de PCI's pois é simples e barato. Além disso, embora nos termos do [Regulamento \(CE\) n. °1272/2008 \(2008\)](#) o percloreto de ferro seja classificado como nocivo por ingestão, irritante para a pele e de risco de lesões oculares graves é uma substância estável para manipulação com os equipamentos de segurança adequados.

Apesar das vantagens da utilização do percloreto de ferro para a etapa de corrosão do cobre de PCI's esta pode-se mostrar bastante lenta uma vez que a solução perde sua capacidade corrosiva a cada vez que for reutilizada. Além disso, por questões de segurança existem materiais adequados para a manipulação correta da substância assim como concentrações adequadas da solução para uma corrosão eficiente e segura.

Segundo o [Regulamento \(CE\) n. °1272/2008 \(2008\)](#), relativo à classificação, rotulagem e embalagem de substâncias e misturas, o percloreto de ferro, ou cloreto de ferro III, é classificado como uma substância que possui toxicidade crônica para o ambiente aquático (Categoria 2). Segundo esta classificação, concentrações maiores que 10mg/l da substância possuem toxicidade para peixes com 96h de exposição, para crustáceos com 48h de exposição e para algas e outras plantas aquáticas entre 72h e 92h de exposição. Além disso, segundo a [Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011 \(2011\)](#), a concentração aceitável de ferro dissolvido em lançamentos de efluentes em água é de 15mg/l. Já para o cobre, a concentração aceitável é de 1mg/l.

Quando a solução de percloreto de ferro é utilizada para corrosão do cobre de placas de circuito impresso nos processos de produção manual geralmente a solução resultante é descartada no ambiente ou sistema de esgoto. Este descarte resulta em concentrações de ferro e cobre acima do limite permitido pela legislação vigente o que evidencia a necessidade de tratamento adequado deste resíduo.

1.1 Estado da arte

Na literatura encontra-se diversos trabalhos que abordam o uso da solução aquosa de perclorato de ferro para corrosão de placas de circuito impresso. Alguns destes trabalhos abordam a questão da otimização deste processo, como no caso de [Júnior et al. \(2018\)](#) que propõe um protótipo de um sistema mexedor para melhora do desempenho de solução corrosiva de perclorato de ferro aplicada a produção de placas de circuito impresso. O protótipo proposto pelo autor é composto por um sistema mexedor e por um sistema de aquecimento e controle de velocidade e temperatura microcontrolado por um PIC (*Programmable Intelligent Computer*). De acordo com o autor, o protótipo foi eficaz para os testes iniciais com água porém, para o procedimento utilizando solução de perclorato de ferro, houve um imprevisto de vazamento em um recipiente de acrílico o que impossibilitou a continuidade dos testes.

Ainda no campo da otimização o trabalho de [Bezerra \(2019\)](#) aborda a utilização de um reagente diferente: a solução reutilizável de cloreto de cobre II ($CuCl_2$), ácido clorídrico (HCL) e fluxo de ar (O_2) para lixiviação do cobre de placas de circuito impresso. Neste trabalho são desenvolvidos experimentos com diferentes concentrações de HCL e diferentes fluxos de ar visando-se obter as condições ideais do processo. A autora implementa também modelos matemáticos para predição dos experimentos visando obter as condições ótimas do processo. De acordo com a autora, a melhor resposta obtida foi a que apresentou as condições experimentais de 1 mol.L^{-1} de HCL , $0,3 \text{ mol.L}^{-1}$ de $CuCl_2$ e fluxo de ar de 0.5 L/min sendo que os modelos polinomiais foram os mais adequados para predição do sistema. Destaca-se também neste trabalho o caráter reutilizável da solução o que demonstrou-se ser muito viável do ponto de vista econômico e ambiental.

Do ponto de vista ambiental, é possível encontrar na literatura trabalhos que abordam a reutilização e reciclagem do cloreto férrico utilizado na confecção de placas de circuito impresso. Dentre estes trabalhos está o de [Silveira et al. \(2013\)](#) que propõe a reciclagem da solução de cloreto férrico adicionando-se ferro sólido (palha de aço), ácido clorídrico e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Ao final do processo, segundo os autores, obtém-se uma solução reciclada (500ml) de cloreto férrico cuja etapa de reação do ácido clorídrico e peróxido de hidrogênio com a solução dura apenas 2 minutos. Este trabalho também propõe a criação de um protótipo de tratamento da solução de acordo com cada etapa do processo (figura 1). Este protótipo conta com:

- Tanque de depósito para acúmulo da solução reciclada;
- Tanque de sedimentação para reação do perclorato de ferro usado com a palha de aço (De 24 a 48h);
- Tanque de oxidação para reação com ácido clorídrico e peróxido de hidrogênio(Etapa rápida: cerca de 2min).

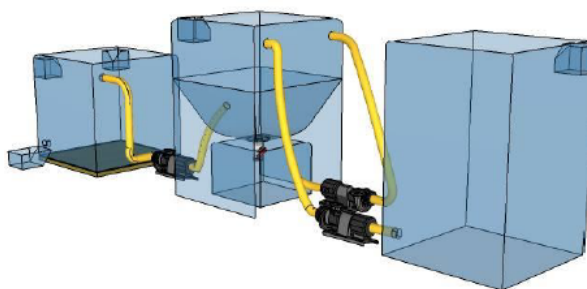


Figura 1 – Protótipo para reciclagem do perclorato de ferro.

Fonte: [Silveira et al. \(2013\)](#).

Outro trabalho, nesta linha de pesquisa, é o de [Costa \(2016\)](#) que propõe a reutilização e recuperação da solução de cloreto férrico através da remoção do cobre por precipitação e a oxidação do ferro Fe^{2+} para Fe^{3+} . Para tal, é desenvolvido um método de ensaio para a solução incluindo processos de oxidação, centrifugação e ajuste de PH. Ao final do processo a recuperação do cloreto férrico apresentou uma eficiência de 95% para recuperação de ferro e de 70% para recuperação do sulfato de cobre.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Este trabalho tem por objetivo a implementação de um protótipo de corrosão otimizada de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de perclorato de ferro.

Como objetivos específicos são colocadas as seguintes premissas:

- Estudo do processo de corrosão utilizando solução aquosa de perclorato de ferro e suas implicações físico-químicas;
- Estudo do processo de otimização das reações químicas: catálise química e velocidade de reação;
- Detalhamento do sensoriamento, microcontrolador e componentes eletrônicos auxiliares para construção do protótipo;
- Desenvolvimento de código na linguagem C/C++ para o microcontrolador utilizado;
- Desenvolvimento de um sistema de controle adequado para coordenação do sensoriamento e atuação;
- Desenvolvimento de uma simulação para emulação do sistema.

1.3 Justificativa do trabalho

A corrosão de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de perclorato de ferro é um método muito utilizado para produção manual de PCI's. No contexto dos laboratórios do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) este método é utilizado em projetos acadêmicos e de equipes de competição. Embora seja um método simples e barato, pode ser considerado custoso em relação ao tempo necessário para corrosão das PCI's: cerca de 40min a 2h com solução em repouso variando de acordo com as dimensões da superfície a ser corroída e a reutilização da solução. Além do custo de tempo, as concentrações de cobre na solução reutilizada não atendem às normas para lançamentos de efluentes em água o que torna necessário planejar um descarte adequado e/ou reutilização da solução. Desta forma, espera-se com o desenvolvimento de um protótipo para corrosão otimizada, melhorar os processos de produção de PCI's no contexto acadêmico da UFOP e providenciar descarte e/ou reutilização adequada para a solução utilizada.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho será dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo faz uma contextualização sobre o tema abordado neste trabalho apresentando o estado da arte, objetivos e justificativa. O capítulo 2 trás uma revisão da literatura trazendo uma análise sobre as reações químicas envolvidas no processo, uma análise dos sensores e atuadores utilizados, assim como do microcontrolador e alguns conceitos de teoria de controle. O capítulo 3 apresenta a construção do protótipo com ênfase na confecção da PCI e no desenvolvimento da simulação. O capítulo 4 apresenta os resultados da simulação desenvolvida. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Nas seções 2.1 e 2.2 faz-se uma revisão dos principais conceitos sobre placas de circuito impresso e seus métodos de fabricação. Nas seções 2.3 e 2.4 faz-se uma revisão sobre os principais conceitos relacionados a otimização de reações químicas e uma caracterização geral da solução utilizada. Na seção 2.5 faz-se uma revisão sobre os mecanismos de transferência de calor. Nas seções 2.6, 2.7 e 2.8 faz-se uma revisão sobre os componentes básicos que compõem o protótipo. Por fim, na seção 2.9 faz-se uma revisão sobre controle de processos e sintonia de controladores.

2.1 Placas de circuito impresso

As placas de circuito impresso (PCI) ou em inglês *printed circuit boards* (PCB) são chapas laminadas geralmente de material fenolite ou fibra de vidro revestidas por uma fina camada de cobre. Conforme definido por Moraes (2011) as PCIs podem ser classificadas de 3 formas: simples face, dupla face e multicamada. As placas simples face são caracterizadas por apenas uma camada de material laminado e uma de cobre. Já as placas dupla face possuem duas camadas de cobre que revestem o material laminado o que permite projetar trilhas em ambas as faces cobreadas. Por fim, as placas multicamadas possuem de 4 a 16 camadas de cobre entre o material laminado, o que permite fabricar placas de alta qualidade com trilhas separadas de acordo com sua aplicação. A figura 2 exemplifica a composição de uma PCI.

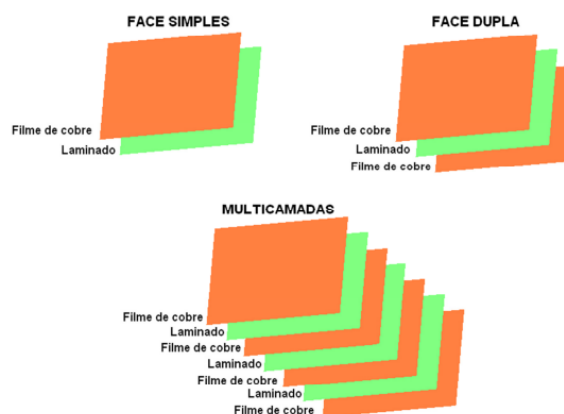


Figura 2 – Esquema de classificação das placas de circuito impresso.

Fonte: Moraes (2011).

Em relação ao material constituinte do laminado das PCI's geralmente utiliza-se dois

materiais: fenolite ou fibra de vidro. Segundo [Miranda \(2015\)](#) o fenolite é um material constituinte por uma mistura de uma resina fenólica com uma determinada quantidade de papel picado ou serradura de madeira. Devido a sua constituição de celulose, este material absorve água o que prejudica sua propriedade isolante e compromete a qualidade da PCI. Já as placas de fibra de vidro são constituídas internamente por uma manta de tecido de fibra de vidro e por resina epóxi o que lhe permite deixar de absorver água sendo portanto mais adequada para a produção de PCI's de alto padrão.

2.2 Métodos de transferência do circuito para placas de circuito impresso.

Durante o processo de produção de placas de circuito impresso é necessário providenciar a transmissão do layout do circuito desejado para a superfície cobreada do fenolite. Existem vários métodos desenvolvidos para esta transmissão sendo os principais métodos descritos a seguir:

2.2.1 Método térmico

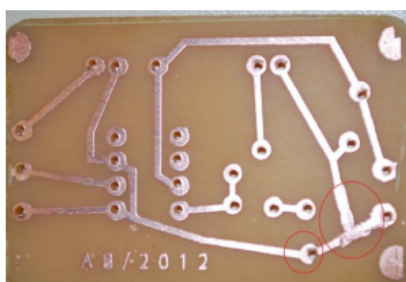
De acordo com [ROSSO, TAVARES e POHLMANN \(2013\)](#) o método térmico consiste em realizar a transferência de um desenho de circuito desejado para a placa de circuito impresso aplicando-se calor e pressão. Basicamente, o desenho desejado do circuito é impresso em papel couchê de maneira a estar invertido e deve ser posicionado com a tinta para baixo na face cobreada da placa de circuito impresso. Desta forma, é aplicado calor e pressão de forma homogênea sobre o conjunto o que garante que a tinta preta impressa no papel couchê seja transferida termicamente para a superfície da PCI. Ainda, segundo os autores, uma alternativa mais viável seria utilizar um papel mais acetinado, a exemplo do papel utilizado como base para adesivos, em substituição ao papel couchê, o que gera um resultado melhor durante o processo de transferência térmica como evidenciado pela figura 3.

2.2.2 Tinta condutiva

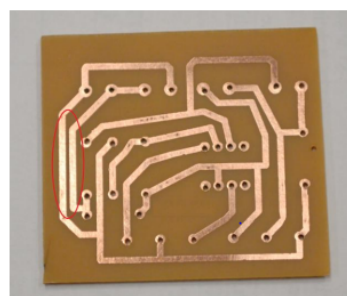
De acordo com [Santos et al. \(2018\)](#) as tintas condutivas trazem a possibilidade de desenhar ou imprimir circuitos eletrônicos sobre diversas superfícies, como papel, madeira, fibras sintéticas, plásticos, paredes, ou qualquer outra superfície que possua boa aderência à tinta utilizada. Um exemplo de aplicação das tintas condutivas é a caneta condutiva (figura 4) que possibilita o desenho manual de circuitos eletrônicos. Trata-se de uma alternativa simples e didática para obter-se circuitos de baixa complexabilidade.

2.2.3 Método fotossensível

Segundo [Oliveira et al. \(2012\)](#) o método fotossensível consiste em utilizar uma tinta, ou resina, que ao ser exposta por luz ultravioleta tem suas características físico-químicas alteradas,



(a) Placa de circuito produzida pelo método térmico utilizando papel couchê.



(b) Placa de circuito produzida pelo método térmico utilizando base de papel adesivo.

Figura 3 – Comparação entre os tipos de papéis utilizados para confecção de placas de circuito impresso.

Fonte: [ROSSO, TAVARES e POHLMANN \(2013\)](#).



Figura 4 – Caneta Condutiva MagiDeal.

Fonte: [MagiDeal \(2020\)](#).

este processo é chamado de fotopolimerização. Conforme descrito por [Oliveira et al. \(2012\)](#) o método fotossensível é dividido em 5 etapas que são descritas abaixo:

1. Etapa de espalhamento da tinta: Nesta etapa deve-se espalhar a tinta fotossensível na superfície cobreada da placa de circuito impresso. A tinta deve ser espalhada uniformemente o que torna necessário a centrifugação da PCI;
2. Etapa de secagem da tinta: Nesta etapa deve-se secar a tinta fotossensível, podendo secar naturalmente ao abrigo de pouca luz (A luz do sol pode emitir radiação ultravioleta o que

pode atrapalhar o processo de confecção da PCI) ou através da utilização de fornos;

3. Etapa de posicionamento do fotolito e exposição á luz UV: Nesta etapa deve-se posicionar o fotolito (Desenho do circuito eletrônico desejado invertido e negativo com trilhas transparentes) sob a PCI e irradiar luz ultravioleta de tal forma que a área exposta à luz tornar-se-á resistente a exposição de soluções ácidas;
4. Etapa de remoção da tinta não exposta a luz ultravioleta: Nesta etapa a PCI é banhada em uma solução básica, geralmente barrilha leve (Solução de carbonato de cálcio) a qual irá remover a tinta fotossensível que não foi exposta á luz ultravioleta. Desta forma, as trilhas ficam marcadas de tinta na PCI;
5. Etapa de corrosão da área de cobre indesejada: Nesta etapa utiliza-se um solução ácida, podendo ser utilizado percloroeto de ferro, para corroer as áreas da PCI não protegidas pela tinta. Desta forma, ao final da corrosão, obtém-se a placa de circuito impresso semi-pronta com as trilhas e contatos elétricos cobreados.

2.2.3.1 Dry Film

Uma alternativa ao uso de tinta para o método fotossensível é o *Dry Film* (figura 5), uma película fotossensível que adere a superfície cobreada da PCI. Desta forma, pode-se posicionar o fotolito por cima da película e expor a luz ultravioleta normalmente conforme o método fotográfico.



Figura 5 – *Dry Film* para confecção de PCI.

Fonte: [PLC \(2018\)](#).

2.3 Cinética química e velocidade de reação

De acordo com [Kotz, Treichel Paul M. and Townsend e Treichel \(2016\)](#) em uma reação química as moléculas necessitam de uma energia mínima que os químicos veem como uma

barreira de energia que deve ser superada pelos reagentes para que a reação ocorra. A energia requerida para atravessar a barreira é chamada de energia de ativação e pode ser descrita por um diagrama(figura 6).

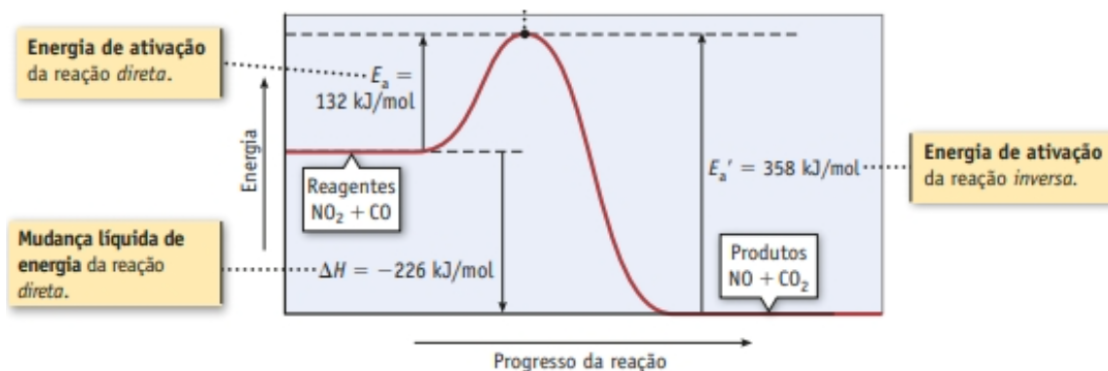


Figura 6 – Energia de ativação da reação de NO_2 e CO para gerar NO e CO_2 .

Fonte: [Kotz, Treichel Paul M. and Townsend e Treichel \(2016\)](#).

De acordo com [Avery \(2020\)](#) existem 4 fatores que aceleram a velocidade de uma reação química, ou seja, que propiciam que as moléculas de uma reação química ultrapassem as barreiras da energia de ativação. São eles:

- Superfície de contato entre os reagentes;
- Temperatura;
- Concentração dos reagentes;
- Presença de um catalisador.

2.4 Percloroeto de Ferro

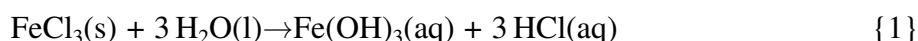
De acordo com [PubChem \(2022\)](#) o percloroeto de ferro(FeCl_3) é uma substância química de coloração laranja a marrom-preto classificada quimicamente como sal e corrosiva para maioria dos metais. É frequentemente utilizada dissolvida em solução aquosa para fabricação manual de placas de circuito impresso atuando na corrosão do metal cobre.

De acordo com [PubChem \(2022\)](#) algumas propriedade físico químicas do FeCl_3 são listadas a seguir:

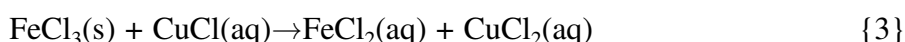
- Massa Molar: 162,2 g/mol;
- Ponto de ebulição: Cerca de 316 °C;
- Ponto de fusão: 304 °C;

- Solubilidade em água: 430 g/Kg a 0 °C; 480 g/Kg a 0 °C; 743 g/Kg a 40 °C;
- Densidade: 2,9 g/cm³ a 25 °C;
- Decomposição: Quando aquecido até a decomposição emite vapores altamente tóxicos de cloreto de hidrogênio;
- Corrosividade: As soluções aquosas são ácidas e corrosivas para maioria dos metais;
- Entalpia molar padrão(calor) de formação a 298,15 °K: -399,5 Kj/mol;
- Capacidade de calor molar a pressão constante de 298,15 °K: 96,7 J/mol/K.

Segundo [Bezerra \(2019\)](#) quando o ($FeCl_3$) é dissolvido em água ocorre uma reação exotérmica de hidrólise liberando calor e dissociando o percloroeto em íons. Esta reação forma pequenas quantidades de hidróxido de ferro($Fe(OH)_3$) e ácido clorídrico(HCl) e é dada pela seguinte equação:



De acordo com ([YU et al., 2016](#)) quando a solução de percloroeto de ferro reage com o cobre presente em placas de circuito impresso ocorrem as seguintes reações químicas:



Estas reações resultam na corrosão do cobre, material constituinte da superfície dos fenolites, sendo este removido e os sais formados (Cloreto cúprico e cloreto cuproso) dissolvidos na solução.

Segundo o [Instituto Newton C. Braga \(2022\)](#) quando oxigênio esta presente na reação, este comporta-se como um catalisador e esta se torna mais rápida e eficiente, sendo composta pelas seguintes etapas:



2.5 Mecanismos de transferência de calor

A transferência de energia na forma de calor ocorre espontaneamente de um objeto com temperatura maior a outro com temperatura menor. O objeto cuja temperatura aumenta,

ganha energia térmica e aquele cuja temperatura diminui, perde energia térmica. A transferência de energia na forma de calor continua até que ambos os objetos se encontrem sob a mesma temperatura e o equilíbrio térmico seja alcançado. (KOTZ et al., 2016).

Ainda de acordo com Kotz et al. (2016) quando um objeto é aquecido ou resfriado, a quantidade de energia transferida depende de três fatores:

- A quantidade de material;
- A magnitude da variação de temperatura;
- A identidade, incluindo a fase (gás, líquido, aquoso ou sólido) do material que ganha ou perde energia.

Desta forma, segundo Kotz et al. (2016) a energia recebida ou perdida na forma de calor quando uma determinada massa de uma substância é aquecida ou resfriada sem mudança de estado físico pode ser calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (2.1)$$

onde:

- m = massa da substância;
- c = calor específico da substância;
- ΔT = gradiente de temperatura.

Kotz et al. (2016) destaca ainda que quando ocorre mudança de estado físico deve-se analisar as propriedades calor de fusão e calor de vaporização da substância, propriedades também chamadas de calor latente cuja fórmula é dada pela equação 2.2 :

$$Q = m \times L \quad (2.2)$$

onde:

- m = massa da substância;
- L = calor de fusão ou calor de vaporização da substância.

De acordo com Coelho (2016) existem 3 mecanismos de transferência de calor:

- **Condução:** É aquela que ocorre em uma substância estática devido única e exclusivamente a um gradiente de temperatura nela existente, ou seja, ocorre sem que haja movimento macroscópico relativo entre as partículas que constituem a substância;

- Convecção: É aquela que ocorre entre uma superfície e um fluido;
- Radiação: É aquela onde a energia de uma substância é transmitida por ondas eletromagnéticas ou emissão de fótons.

2.6 Termopar do tipo K

Segundo [Duff e Towey \(2010\)](#) termopares (figura 7) são dispositivos formados por dois fios de metais distintos conectados por uma extremidade. Esta extremidade é chamada de junta de medição (junta quente) enquanto que as demais extremidades dos fios (conectados ao circuito) são ditas juntas de referência (junta fria). O funcionamento de um termopar é descrito pelo efeito de Seebeck onde ao submeter os dois fios metálicos a uma diferença de temperatura surge uma diferença de potencial entre estes dois fios proporcional ao gradiente da temperatura.

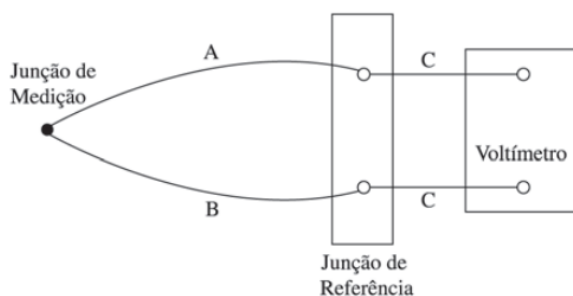


Figura 7 – Esquema do circuito de um termopar.

Fonte: [Moreira \(2002\)](#).

Segundo [Carvalho \(2018\)](#), embora os termopares possuam uma alta faixa de medição de temperatura, a diferença de potencial na junta de medição é de baixa amplitude, o que por consequência diminui a resolução de medição do sensor chegando no máximo a $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Termopares ditos do tipo K são compostos por duas junções metálicas: uma de Cromel (90% Níquel e 10% Cromo) e outra de Alumel (95% Níquel e 5% Alumínio). Estes sensores cobrem temperaturas entre -200 e os 1370°C . Quando utilizados em condições ambientes que prejudiquem a integridade do sensor geralmente utiliza-se poços termométricos, revestimentos de proteção da junta de medição geralmente fabricados em aço inoxidável.

2.7 Resistor ôhmico

Segundo [Nussenzveig \(2015\)](#) um resistor ôhmico (R) é um elemento de circuito que obedece a lei de ohm, tal que, quando atravessado por uma corrente elétrica (I), tem uma queda

de potencial (V) através de seus extremos dado pela equação 2.3:

$$V = R \times I \quad (2.3)$$

Ainda segundo [Nussenzveig \(2015\)](#) em um resistor há conversão de energia elétrica em energia térmica dada pelo efeito Joule. Em razão desta propriedade, resistores elétricos ditos de imersão são utilizados para aquecimento de líquidos, como no caso dos chuveiros elétricos. Em relação aos líquidos corrosivos pode-se utilizar resistores revestidos de aço inoxidável.

2.8 Microcontrolador PIC

Um microcontrolador é um microcomputador completo construído em um único circuito integrado. Os sistemas de E/S e de memória contidos em um microcontrolador especializam estes dispositivos para que eles possam se comunicar/interfacear com outros hardwares e também com funções de controle de aplicações. Uma vez que os microcontroladores são equipados com poderosos processadores digitais, o grau de controle e programabilidade que eles provem aumenta significativamente a efetividade da aplicação([WATTER, 2002](#)).

Segundo [Souza \(2005\)](#) como pode ser visto na figura 8 um microcontrolador é composto por memória de programa, memória de dados, portas de entrada e/ou saída paralela, *timers*, contadores, comunicação serial, PWMs e conversores analógico-digitais sendo que todas as operações lógicas e matemáticas são geridas pela Unidade Lógica Aritmética (ULA).

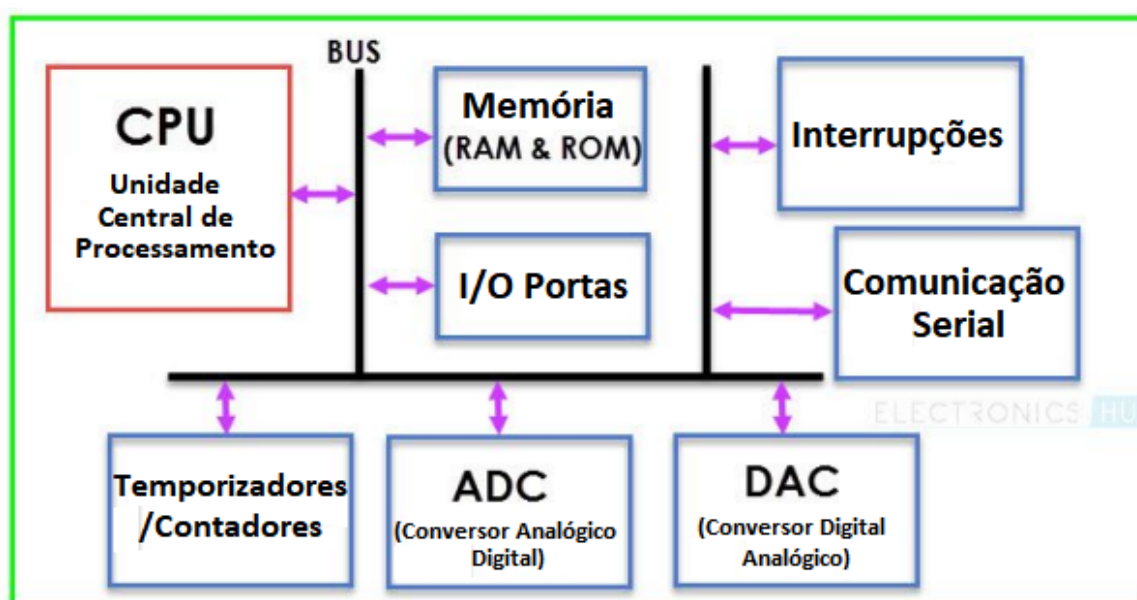


Figura 8 – Diagrama básico de um microcontrolador.

Fonte: Adaptado de [Hub \(2017\)](#).

Dentre os principais microcontroladores disponíveis no mercado destacam-se os microcontroladores PIC (*Programmable Intelligent Computer*) fabricados pela empresa Microchip. Os microcontroladores PIC são designados PICnnCxxx (CMOS) ou PICnnFxxx (FLASH) onde nn indica a quantidade de bits usados para representar uma instrução(OLIVEIRA; SHIN-TING, 2019).

De acordo com Pereira (2007) os microcontroladores PIC podem ser programados utilizando-se as linguagens C e *Assembly* sendo a linguagem C mais eficiente. A Microchip desenvolveu programas e depuradores proprietários para programação dos microcontroladores PIC com destaque para o MPLAB®X IDE e o PICkit™3.

2.8.1 Microcontrolador PIC16F886

O microcontrolador PIC16F886 é um microcontrolador de 8bits baseado em tecnologia Flash e possui 28 pinos. O diagrama esquemático dos pinos do PIC16F886 é apresentado na figura 9 e os principais módulos disponíveis são apresentados na tabela 1. Nos anexos A e B pode-se conferir a estrutura interna do microcontrolador e seus registradores de função especial.

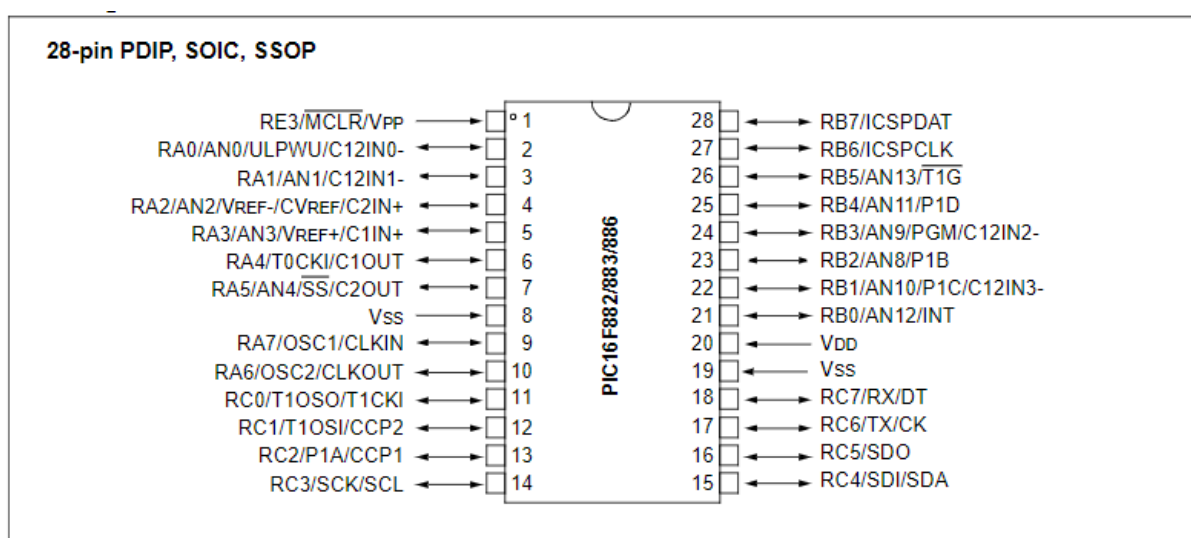


Figura 9 – Diagrama de pinagem do PIC16F886.

Fonte:Microship (2009).

Segundo Microship (2009) o microcontrolador PIC16F886 dispõe de ampla faixa de tensão de operação (2,0 V-5,5 V) dispondo também do recurso da programação serial em circuito (ICSP™). Em relação a frequência do oscilador do microcontrolador pode-se utilizar um cristal oscilador externo de até 20kHz ou configurar o oscilador interno com 8 opções que variam entre 31kHz a 8 Mhz.

Tabela 1 – Principais módulos do PIC16F886

Memória de programa	Memória de dados		E/S	10-bit A/D(ch)	ECCP /CCP	EUSART	MSSP	Comparadores	Timers 8/16-bit
	Flash (words)	SRAM (bytes)							
		EEPROM (bytes)							
8192	368	256	24 ⁽¹⁾	11	1/1 ⁽²⁾	1 ⁽³⁾	1 ⁽⁴⁾	2	2/1 ⁽⁵⁾

(1) 24 pinos de E/S podendo-se configurar 14 pinos como analógicos e 24 pinos como digitais;

(2) 1 módulo ECCP(*Enhanced CCP*) e 1 módulo CCP(*Capture/Compare/PWM*) com suporte para PWM de 10 bits com 1, 2 ou 4 canais de saída com máx. frequência 20 kHz;

(3) Módulo USAR para comunicação serial assíncrona;

(4) Módulo MSSP para comunicação serial síncrona com suporte para SPI e I2C;

(5) *Timers* de 8bit(TMR0 0 e TMR2) e de 16bits(TMR1).

Fonte: Adaptado de [Microship \(2009\)](#).

2.9 Controle PID

De acordo [Aguiar e Vendramini \(2018\)](#) o controle PID (Controle Proporcional, Integral e Derivativo) é aquele que através de três ações combinadas, compensa e altera a dinâmica da resposta temporal de um sistema.

De acordo com [OGATA \(2011\)](#) o controle PID é adequado para a maioria dos sistemas de controle e pode ser descrito pela equação 2.4 que representa a combinação das ações proporcional-integral-derivativo aplicadas a uma saída $u(t)$ em função do erro $e(t)$:

$$u(t) = K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)dt + K_p \times T_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

onde:

- K_p = Ganho proporcional;
- T_i = Tempo integrativo;
- T_d = Tempo derivativo.

De acordo com [OGATA \(2011\)](#) a equação 2.4 pode ser expressa no domínio da frequência pelo diagrama de blocos da figura 10 cuja função de transferência é dada pela equação 2.5.

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right] \quad (2.5)$$

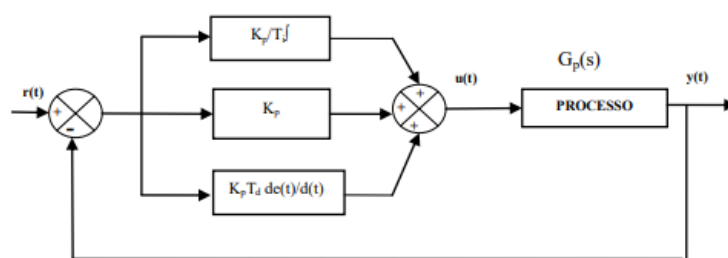


Figura 10 – Diagrama de blocos do controle PID convencional.

Fonte: Barçante (2011).

2.9.1 Sintonia de controladores

De acordo com OGATA (2011) nos casos em que o modelo matemático de um sistema que se deseja controlar não é conhecido pode-se recorrer a abordagens experimentais de sintonia de controladores PID. Dentre os principais métodos de sintonia existentes na literatura destaca-se o descrito pelo trabalho de Ziegler, Nichols et al. (1942) que será abordado em 2.9.1.1.

2.9.1.1 Método de Ziegler-Nichols

No método descrito por Ziegler, Nichols et al. (1942) para encontrar as constantes PID de um dado sistema primeiramente deve-se submetê-lo a uma entrada do tipo degrau e analisar sua curva de reação da saída em relação ao tempo. Nesta análise deve-se verificar se esta curva possui um formato de "S" e se sim, traçar uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva do processo e com base em onde a reta tangente corta o eixo do tempo efetuar as medições de duas constantes: L e T que representam respectivamente o atraso do processo e a constante de tempo. A representação gráfica deste processo pode ser observada na figura 11.

Após a obtenção das constantes é possível calcular os parâmetros PID do processo de acordo com a tabela 2.

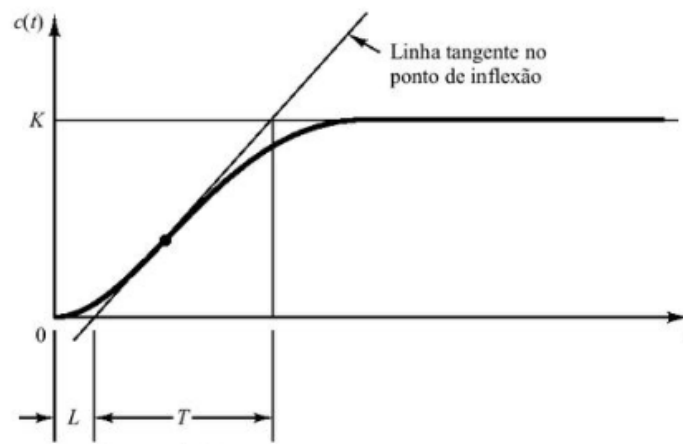


Figura 11 – Curva de resposta de uma planta ao degrau unitário.

Fonte: [OGATA \(2011\)](#).

Tabela 2 – Estimativa das constantes de uma planta como proposto por ([ZIEGLER; NICHOLS et al., 1942](#))

Tipo de Controlador	k_p	t_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{T}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: [OGATA \(2011\)](#).

3 DESENVOLVIMENTO

Nesta sessão serão abordadas as etapas de construção do protótipo. Na sessão 3.1 é apresentada a proposta do protótipo assim como algumas especificações sobre seus componentes elétricos. Na sessão 3.2 são feitos os cálculos necessários para especificação da resistência de imersão requerida. Na sessão 3.3 é apresentado o projeto e confecção da placa de circuito impresso para o protótipo. Na sessão 3.4 são apresentados alguns detalhes sobre o código desenvolvido para programação do microcontrolador e por fim na sessão 3.5 é apresentada a simulação do sistema.

3.1 Protótipo proposto

Como proposto por Avery (2020) dentre os fatores que aceleram a velocidade de uma reação química está o aumento da temperatura. Desta forma, objetiva-se para a construção do protótipo um sistema de aquecimento da solução de perclorato de ferro de maneira controlada respeitando-se os limites de decomposição da substância que geram vapores tóxicos. Além disso, deve-se levar em consideração também os limites térmicos associados ao aquecimento dos materiais constituintes das placas de circuito impresso. Tomando como base o material fenolite, de acordo com Damari (2022) a placa de fenolite pode ser utilizada intermitentemente a temperatura de 120°C com picos de 170°C por curto período de tempo. Desta forma, definiu-se que a temperatura máxima de aquecimento da solução seria de 120°C.

Desta forma, propõe-se um sistema de aquecimento microcontrolado para o protótipo como é mostrado na figura 12. O protótipo é composto por um recipiente de aço inoxidável sendo que para medição de temperatura utiliza-se um termopar do tipo K e uma resistência elétrica de imersão para aquecimento ambos acoplados a estrutura do recipiente. Para controle do sistema externamente é conectada ao sistema uma placa de controle (PCI) devidamente protegida por um invólucro.

Em relação à especificação dos componentes, vale ressaltar, que devido a característica corrosiva para metais do perclorato de ferro opta-se por utilizar todos os materiais do protótipo constituídos por aço inoxidável sendo o termopar constituído por um poço termométrico e a resistência elétrica de imersão fabricada em aço inox 304.

A resistência de imersão utilizada é alimentada com uma tensão senoidal 220V portanto, para controle da temperatura é proposto um sistema de dimerização da tensão aplicada sobre a carga(resistor) o que gera uma variação de corrente elétrica que se traduz em variação de temperatura de acordo com o efeito Joule.

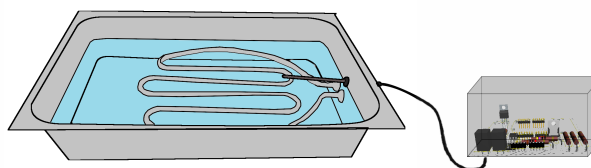


Figura 12 – Esquemático proposto para o protótipo.

Fonte: Autoria própria.

3.2 Dimensionamento da resistência de imersão

O sistema de aquecimento proposto para o protótipo conforme figura 13 é composto por uma cuba de aço inoxidável conectada com uma resistência de imersão também em aço inoxidável.

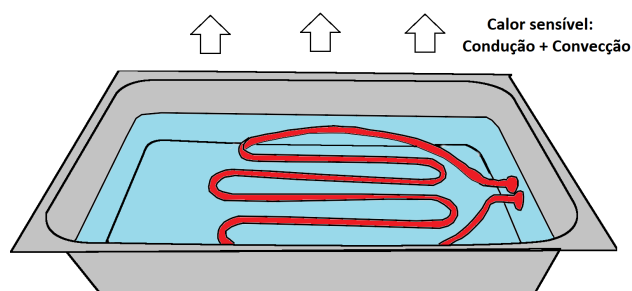


Figura 13 – Esquemático do sistema.

Fonte: Autoria própria.

Para dimensionamento da resistência de imersão é necessário analisar a transferência de calor do sistema. Considerou-se a fim de estimar a especificação da resistência que ocorrem 2 mecanismos de transferência de calor:

- **Condução:** Ocorre na região de contato entre a resistência de imersão e a solução de perclorato de ferro e entre a solução de perclorato de ferro e a cuba de aço inoxidável;
- **Convecção:** Ocorre das trocas de calor por movimento das moléculas da solução de perclorato de ferro.

O calor resultante das componentes condução e convecção é definido como calor sensível e pode ser calculado pela fórmula 2.1.

Para o dimensionamento da resistência considerou-se a quantidade de calor requerida pelas componentes de forma individual de acordo com os subitens abaixo. Objetiva-se que o sistema final encontre-se na mesma temperatura.

- Quantidade de calor requerida para aquecimento da solução de perclorato de ferro e água;
- Quantidade de calor requerida para aquecimento da cuba de aço inoxidável.

De acordo com essas premissas calcula-se a especificação da resistência requerida conforme apêndice A.

3.3 Projeto e fabricação da placa de circuito impresso

O projeto esquemático da placa de circuito impresso para o protótipo foi adaptado de Rambo (2017) e projetado utilizando-se o programa Proteus. Como pode ser visto na figura 14 o projeto consiste em 7 circuitos interconectados que serão descritos pelas seções 3.3.1 a 3.3.7. Após o projeto esquemático da PCI efetua-se o projeto elétrico da PCI como descrito pela seção 3.3.8. Por fim, realiza-se a fabricação da PCI pelo método fotossensível como descrito pela seção 3.3.9.

3.3.1 Circuito Detector de Zero da rede

O circuito detector de zero da rede é composto basicamente por uma ponte retificadora de onda completa, um optoaclopador e um circuito de *schmitt trigger* e tem por função gerar um pulso de onda quadrada toda vez que a senoide da alimentação da rede (220V-60Hz) passa pelo eixo x como descrito pela figura 15. Este pulso é utilizado pelo microcontrolador para sincronizar o sinal de controle com o sinal da alimentação.

3.3.2 Circuito de alimentação

O circuito de alimentação é composto basicamente por um conversor DC-DC de 220V(60Hz) para 12V e de um regulador de tensão para 5V. O objetivo deste circuito é propiciar a alimentação necessária para o microcontrolador utilizando-se a própria tensão da rede. No caso do regulador de tensão o circuito é projetado de acordo com a folha de dados do componente disponibilizada pela empresa STMicroelectronics (2004).

3.3.3 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado é o PIC16F886 que tem por função realizar as ações de controle do protótipo.

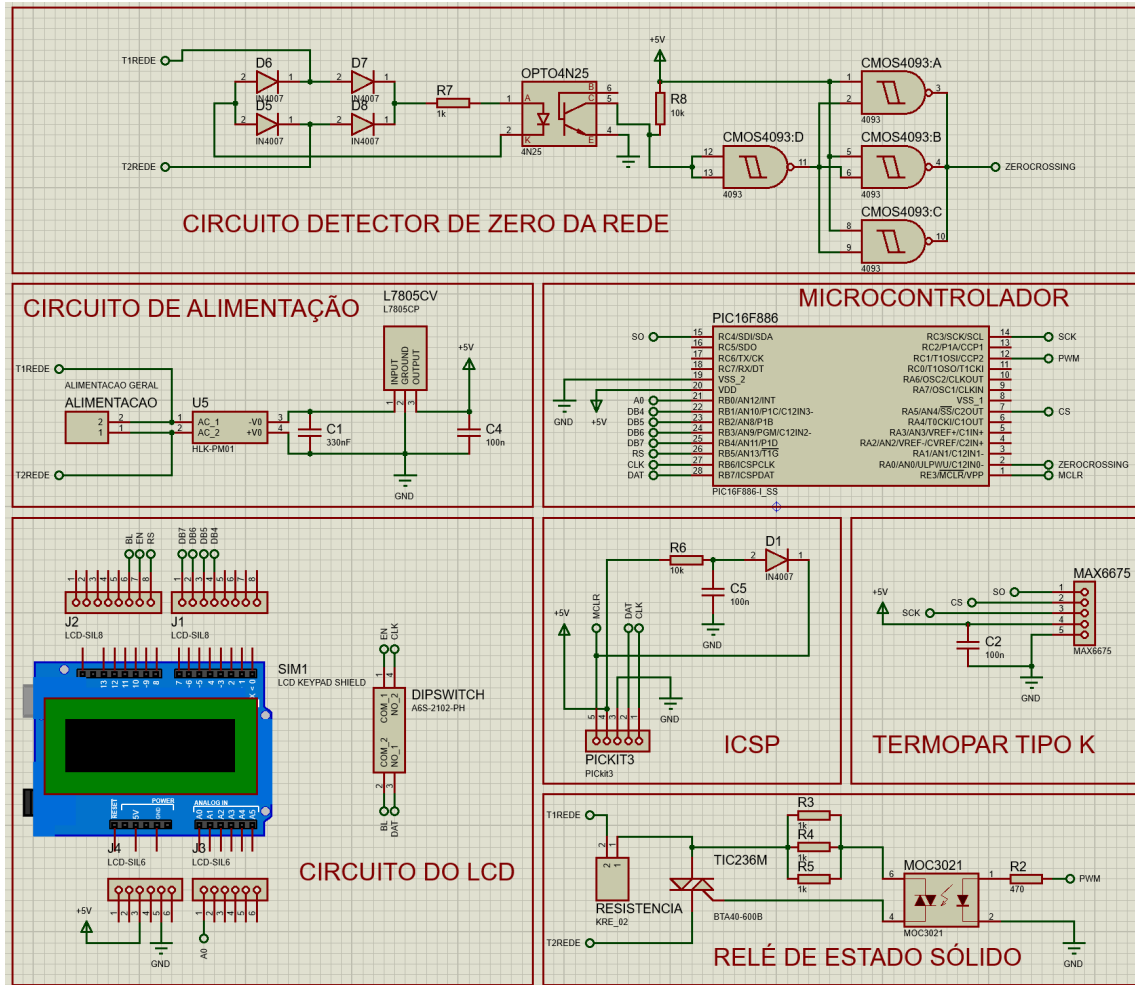


Figura 14 – Projeto esquemático da PCI.

Fonte: Autoria própria.

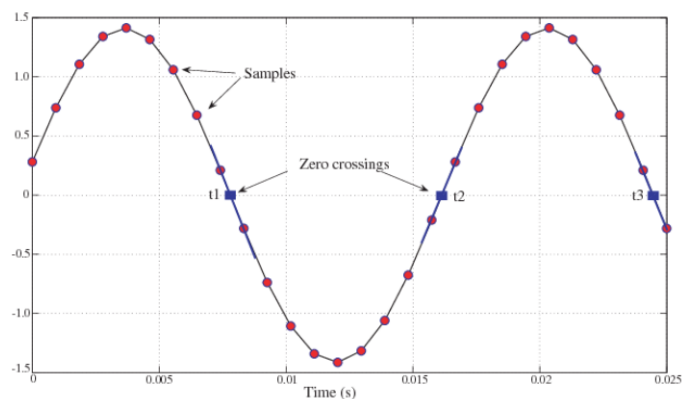


Figura 15 – Detecção de zero da rede.

Fonte: (XUE et al., 2007).

3.3.4 Circuito do LCD

O circuito do LCD é basicamente constituído de uma chave seletora (*Dip switch*) e um *LCD Ethernet Shield*. A chave seletora é necessária para isolar os pinos de *clock* e dados do microcontrolador PIC que serão utilizados tanto para programação do microcontrolador quanto para controle do LCD.

3.3.5 Circuito ICSP

O circuito ICSP é construído para propiciar a programação do microcontrolador quando este já se encontra soldado ao circuito. Para tal é necessário realizar alguns isolamentos como no caso do pino de alimentação e do *ground* e do pino de alimentação e do pino *Master Clear*. Todo o circuito foi projetado com base no Guia da Programação Serial In-Circuit™ da empresa [Microship \(2017\)](#).

3.3.6 Circuito do termopar do tipo K

O circuito do termopar do tipo K é composto por um conector compatível com o módulo MAX6675 sendo que tal módulo será ligado ao termopar do tipo K.

3.3.7 Circuito relé de estado sólido

O circuito do relé de estado sólido é composto basicamente por um optoaclopador, cuja função é isolar o circuito de controle (microcontrolador) do circuito de potência (carga resistiva), um triac e uma resistência de imersão. Ressalta-se que o circuito segue as diretrizes do recomendado pela empresa [STMicroelectronics \(2020\)](#) no documento "Nota de aplicação: Controlando um triac com um fototriac".

3.3.8 Projeto da PCI

Após o projeto esquemático da PCI efetuou-se o projeto da placa de circuito utilizando também o programa Proteus. O projeto da PCI é mostrado na figura 16. Na figura 17 são mostradas as projeções em três dimensões da PCI.

3.3.9 Confecção da PCI pelo método fotossensível

Para confecção da placa de circuito impresso optou-se por utilizar o método fotossensível devido a possibilidade de fabricar trilhas com maior precisão dimensional. O fluxograma do processo é apresentado na figura 18. Cada etapa do processo é abordada de forma individual nas seções 3.3.9.1 a 3.3.9.8.

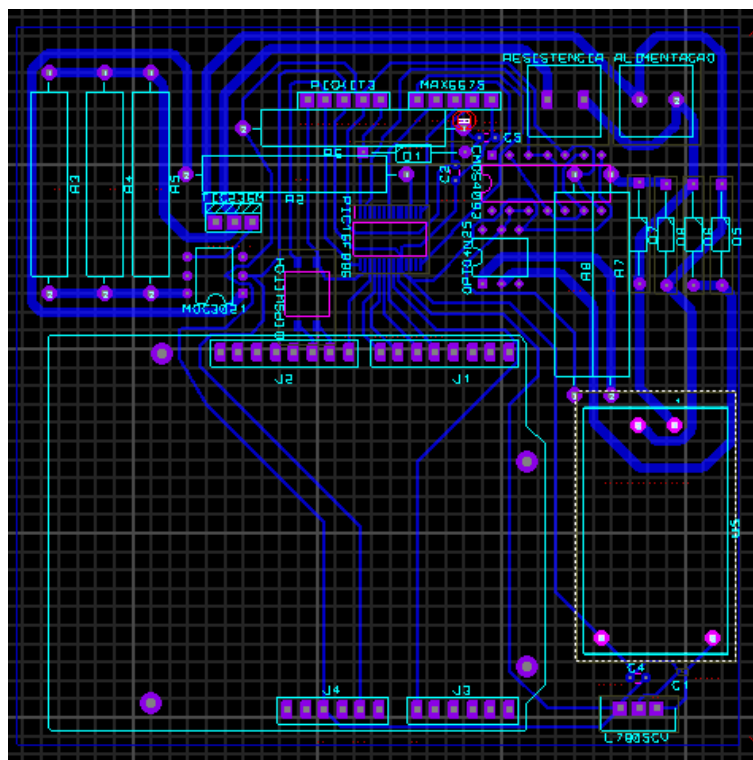
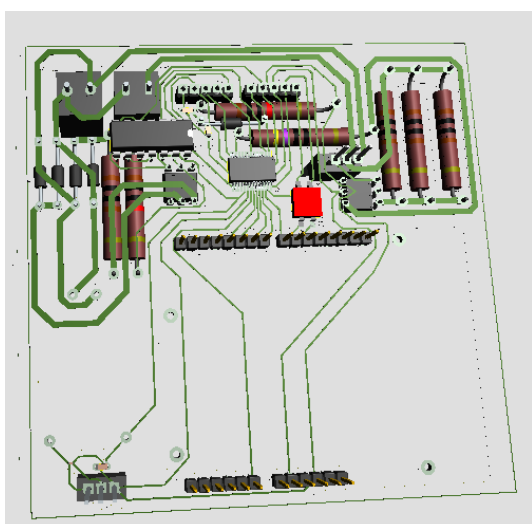
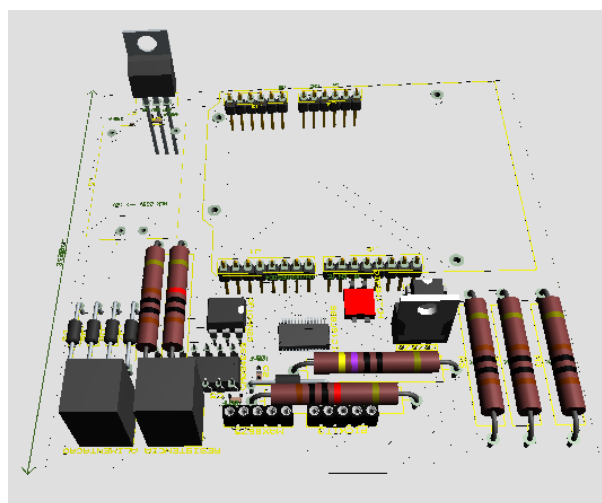


Figura 16 – Projeto da PCI.

Fonte: Autoria própria.



(a) Vista inferior.



(b) Vista superior

Figura 17 – Modelo 3D da PCI

Fonte: Autoria própria.

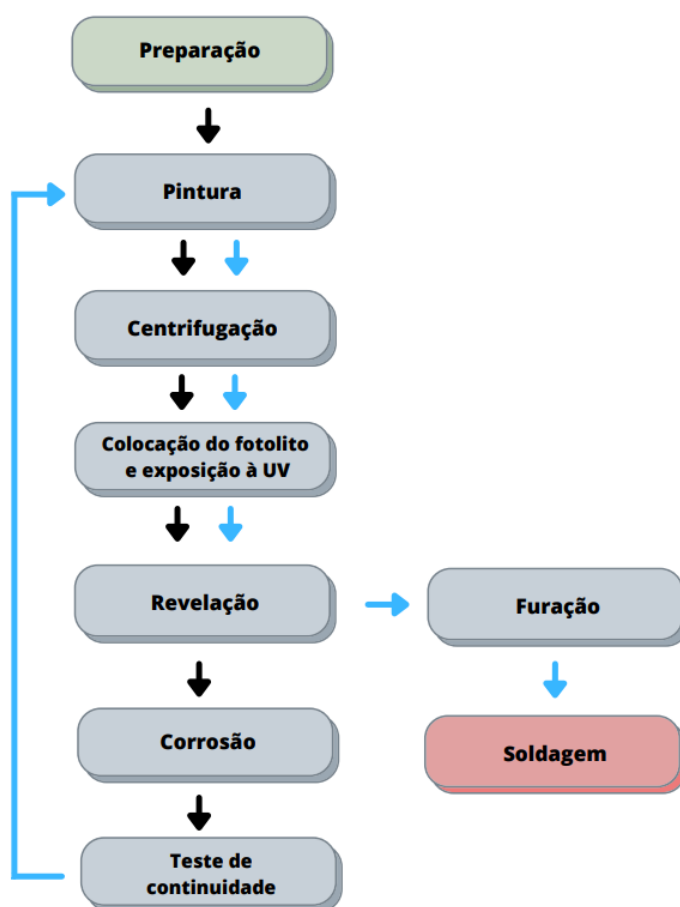


Figura 18 – Fluxograma do processo de fabricação da PCI.

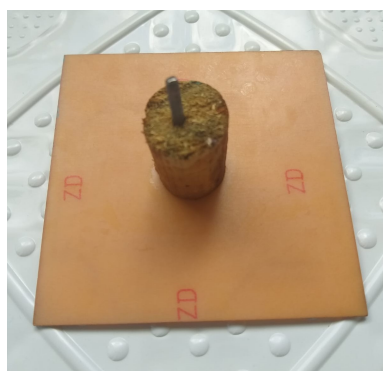
Fonte: Autoria própria.

3.3.9.1 Preparação da PCI

A primeira etapa do processo consistiu na preparação da PCI conforme figura 19. Primeiramente, fixou-se na PCI um eixo de madeira com cola Superbonder. Esta etapa é necessária para o processo de centrifugação da PCI. Após a fixação do eixo efetuou-se a limpeza da PCI com detergente e uma esponja. Ao final do processo tem-se a PCI limpa e pronta para a próxima etapa.

3.3.9.2 Pintura da PCI

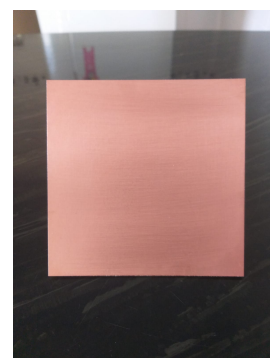
Após o processo de preparação, efetuou-se a pintura da PCI onde utilizou-se um pincel grosso e tinta fotossensível azul da marca Redael conforme figura 20. A tinta deve ser espalhada de forma uniforme de forma a concentrar uma quantidade maior de tinta no centro da PCI.



(a) Colocação do eixo na PCI.



(b) Limpeza da PCI.



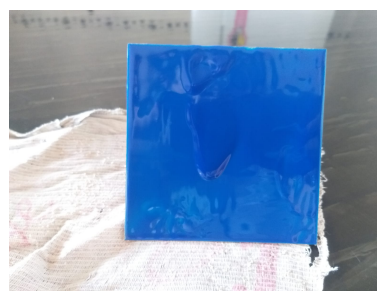
(c) PCI após processo de limpeza

Figura 19 – Etapa de preparação da PCI.

Fonte: Autoria própria.



(a) Materiais utilizados para pintura



(b) PCI pintada com concentração de tinta no centro.

Figura 20 – Etapa de pintura da PCI.

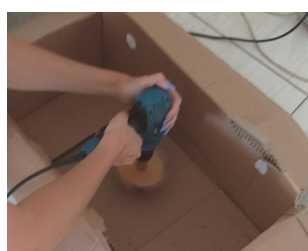
Fonte: Autoria própria.

3.3.9.3 Centrifugação

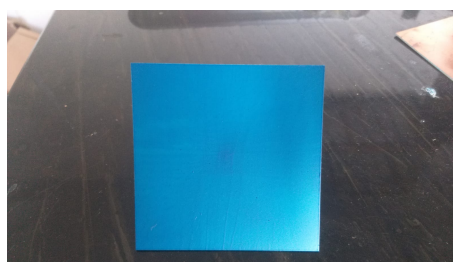
Após o processo de pintura deve-se realizar a centrifugação, onde com auxílio de uma furadeira da marca Black+Decker com capacidade de até 2800rpm fixa-se o eixo da PCI e espalha-se a tinta de maneira uniforme sobre a superfície da PCI como pode ser observado na figura 21. A PCI é então reservada para secar naturalmente em um recipiente escuro para que não haja contato direto com a radiação U.V. emitida pelo sol da iluminação ambiente.

3.3.9.4 Colocação do fotolito e exposição a luz U.V.

Após a secagem posicionou-se o fotolito na PCI e submeteu-se a placa a exposição ultravioleta de uma lâmpada de 40W por cerca de 3 minutos conforme figura 22.



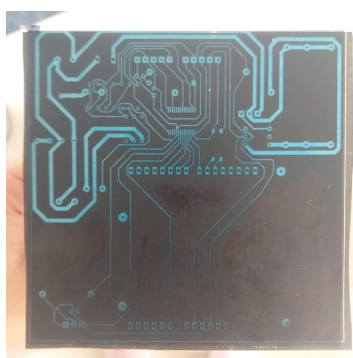
(a) Centrifugação



(b) Resultado da centrifugação

Figura 21 – Etapa de centrifugação da PCI.

Fonte: Autoria própria.



(a) Colocação do fotolito



(b) Exposição à luz U.V.

Figura 22 – Etapa de colocação do fotolito e exposição a luz ultravioleta.

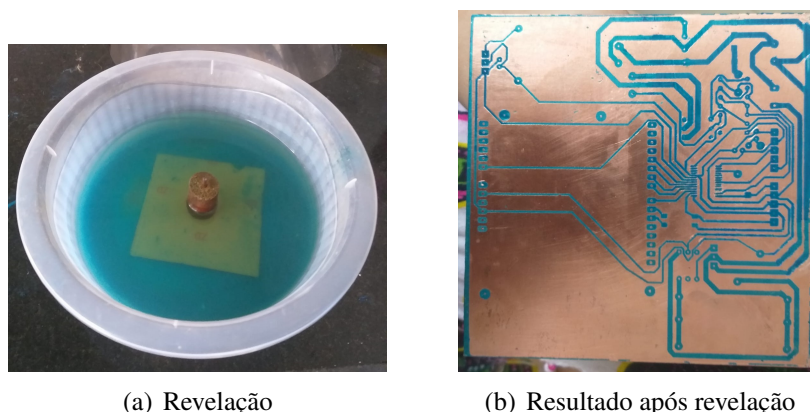
Fonte: Autoria própria.

3.3.9.5 Revelação

Nesta etapa deve-se fazer a revelação do circuito inserindo-se a PCI em uma solução de barrilha leve conforme figura 23. A PCI é então colocada de repouso na solução por cerca de 20min e esfrega-se de maneira bem leve com auxílio de uma esponja. Ao final deste processo apenas as trilhas e contatos elétricos ficam marcados de tinta na PCI. Neste etapa também foi necessária uma inspeção visual das trilhas e foram constatadas algumas imperfeições na marcação que foram sanadas com o auxílio de uma agulha para raspagem.

3.3.9.6 Corrosão e teste de continuidade

Nesta etapa é realizada a corrosão do cobre das partes não marcadas da PCI. Para isso conforme figura 24 a PCI é mergulhada em uma solução de perclorato de ferro na proporção de 1:3 em relação à água. A corrosão completa do cobre dura cerca de 3h e o resultado deste processo pode ser conferido na figura 24. Para fins de inspeção com o auxílio de um bombril raspa-se a região dos contatos elétricos da PCI para poder realizar um teste de continuidade.

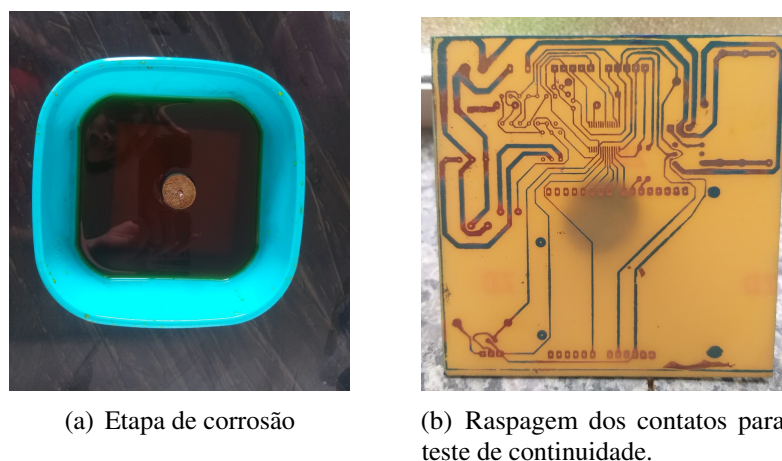


(a) Revelação

(b) Resultado após revelação

Figura 23 – Etapa de revelação do circuito.

Fonte: Autoria própria.



(a) Etapa de corrosão

(b) Raspagem dos contatos para teste de continuidade.

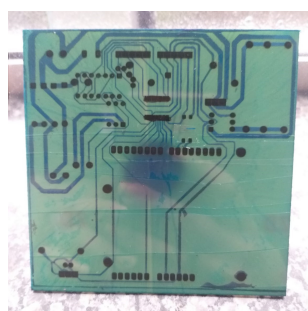
Figura 24 – Etapa de corrosão e teste de continuidade.

Fonte: Autoria própria.

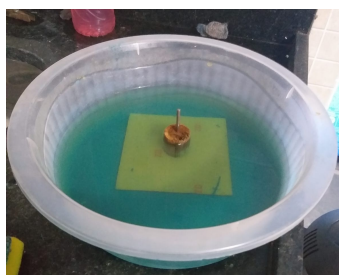
3.3.9.7 Acabamento final da placa

Para acabamento final da PCI efetua-se a pintura e centrifugação da placa novamente. Após este processo posiciona-se o fotolito dos pontos de solda na PCI e expõe-se a luz U.V. novamente por cerca de 3 minutos conforme figura 25. Após este processo novamente a PCI é mergulhada na solução de barrilha para ser revelada. Ao final do processo temos a PCI com apenas os contatos de soldagem expostos e as demais trilhas protegidas pela tinta que não é condutiva.

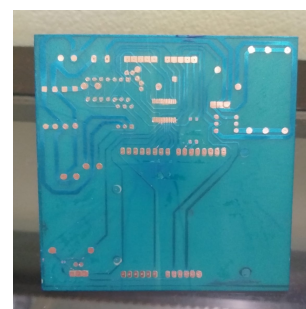
Para completar o acabamento também é necessária a remoção do eixo. Para remoção completa utiliza-se uma pequena quantidade de acetona conforme figura 26. Por fim, deve-se realizar a furação da placa utilizando-se uma micro retífica disponível no Laboratório de Controle e Automação Multiusuário da UFOP. O resultado da furação também pode ser conferido na figura 26.



(a) Colocação do fotolito dos contatos elétricos



(b) Revelação



(c) Resultado do acabamento

Figura 25 – Etapa de acabamento da PCI (Parte 1).

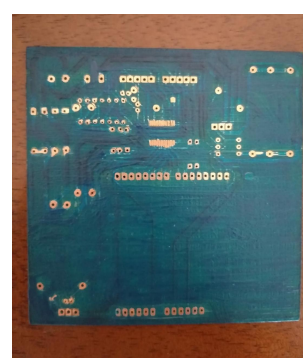
Fonte: Autoria própria.



(a) Remoção do eixo.



(b) Etapa de furação



(c) Resultado após furação

Figura 26 – Etapa de acabamento da PCI (Parte 2).

Fonte: Autoria própria.

3.3.9.8 Soldagem

Esta etapa tem por objetivo realizar as soldagens dos componentes eletrônicos na placa de circuito impresso. Devido as limitações de acesso a laboratórios ocasionadas pela pandemia de covid19 não foi possível o acesso à equipamentos de soldagem o que impossibilitou a conclusão da PCI já que esta possui componentes SMD que necessitam de processo de soldagem controlada.

3.4 Desenvolvimento do código

Como parte integrante do protótipo foi desenvolvido um código na linguagem C para o microcontrolador PIC utilizando-se o ambiente de programação MPLABX.

O código é constituído por 5 arquivos de cabeçalho e 3 arquivos fonte sendo o arquivo intitulado "newmain" o código principal.

Na tabela 3 são apresentados os arquivos fonte e de cabeçalho e suas funções.

Tabela 3 – Códigos fonte e de cabeçalho e suas funções

Config_Inicial.h	Contém os bits de configuração que determinam o funcionamento fundamental do microcontrolador
flexlcd.h	Biblioteca LCD
controle.h	Arquivo de cabeçalho para o arquivo fonte controle.c
max6675.h	Biblioteca para o módulo max6675 para comunicação SPI com o termopar do tipo K.
atraso.h	Arquivo de cabeçalho para o arquivo fonte atraso.c
controle.c	Código de controle constando as constantes de controle, cálculo do erro e ajuste PID.
atraso.c	Código com valores de atraso para dimerização com base na percentagem de tensão requerida.
newmain.c	Código fonte principal

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a figura 27 no *loop* principal do programa primeiramente efetua-se a detecção do zero da rede a fim de sincroniza-lo com a dimerização. Após esta detecção, executa-se a função de atraso que espera um tempo de acordo com o valor do PID calculado. Após este atraso o programa envia um pequeno degrau unitário que tem por objetivo regular o tempo de disparo do triac. Em seguida, faz-se a leitura da temperatura e amostragem desse valor no LCD. Por fim, regula-se um tempo de amostragem para o sinal de controle calculando o valor do erro e calculando o ajuste do PID necessário. Por se tratar de um *loop* infinito todo o processo é repetido de maneira a controlar o valor da temperatura em torno do *setpoint* desejado.

Devido ao alto número de bibliotecas e códigos fontes o código completo desenvolvido é disponibilizado em Campos (2022).

3.5 Simulação do protótipo

Para simulação do protótipo foi desenvolvida uma aplicação no programa Proteus conforme figura 28. Esta é capaz de emular uma temperatura ajustável pela interface que é mostrada no LCD. É possível também observar graficamente o sinal de tensão da carga através da ferramenta de osciloscópio do simulador.

```

for(;;){
    if(PORTAbits.RA0){
        atraso(PIDa);
        PORTCbits.RC1=1;
        __delay_us(164);
        PORTCbits.RC1=0;
        valor=le_max6675();
        temperatura = mostra_no_LCD(valor);
    }
    if(Aux == 15000){
        calc_erro(temperatura,setpoint);
        PIDa = controlador();
        Aux = 0;
    }
    Aux = Aux +1;
}

```

Figura 27 – Loop do código principal do programa.

Fonte: Autoria própria.

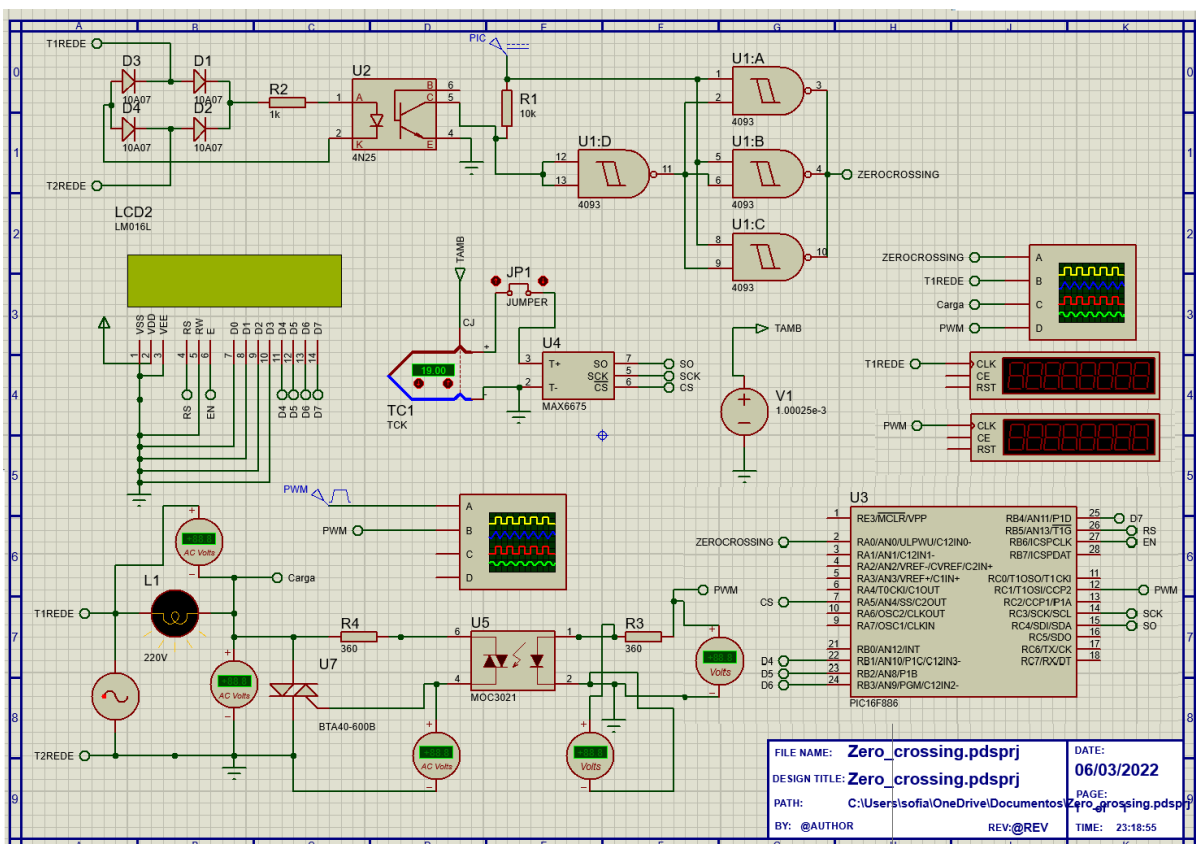


Figura 28 – Simulação do sistema.

Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS

Após o dimensionamento do sistema, a confecção da placa de circuito impresso e desenvolvimento da simulação efetuou-se a montagem do sistema conforme figura 29.



Figura 29 – Montagem do sistema do protótipo.

Fonte: Autoria própria.

Como não foi possível realizar a soldagem dos componentes da PCI desenvolvida optou-se por demonstrar o sistema de acordo com a simulação. Desta forma, inicialmente o sistema encontra-se a temperatura ambiente e deseja-se aquecê-lo até uma temperatura de aproximadamente 120°C. Conforme simulação na figura 30 inicialmente a temperatura do sistema não é conhecida, por isso inicia-se com um valor de 0V para a carga que é representada na simulação por uma lâmpada 220V com resistência de 5ohms.

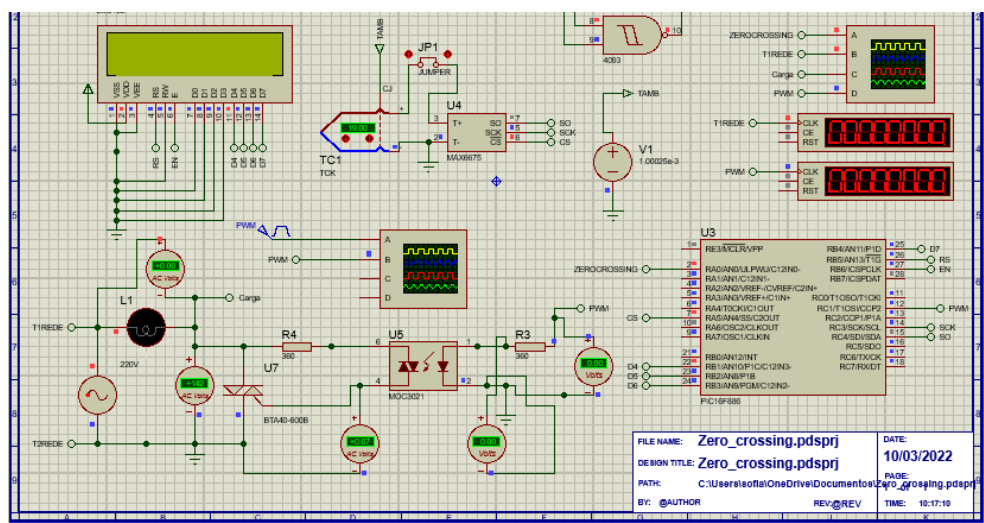


Figura 30 – Condições iniciais do sistema.

Fonte: Autoria própria.

Logo em seguida, conforme figura 31 é feita a medição da temperatura que está configurada para 19°C. Como o valor medido encontra-se bem abaixo do *setpoint* desejado de 120°C o controle manda potência total(153V) para carga. Este valor não chega a 220V devido as perdas associadas aos componentes elétricos do circuito eletrônico.

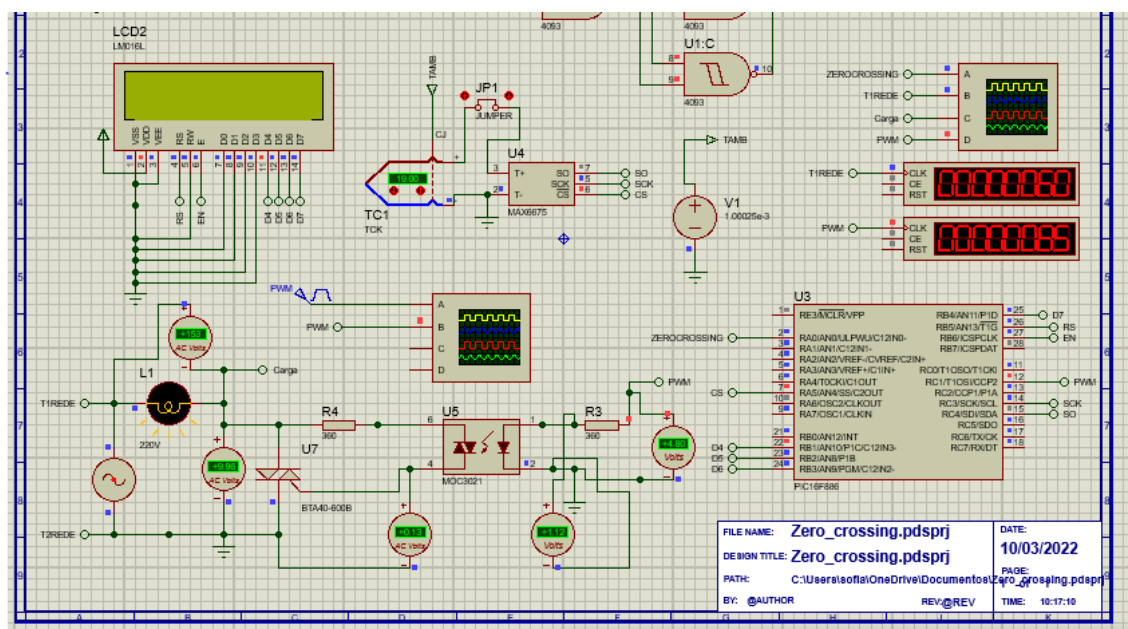


Figura 31 – Resposta do sistema para uma temperatura de 19°C.

Fonte: Autoria própria.

Conforme figura 32 pode-se visualizar um comparativo dos sinais associados ao circuito sendo que o sinal da carga é o resultado da subtração do sinal da rede pelo sinal aplicado sobre o triac. A apresentação das cores do gráfico segue a seguinte premissa para todas as figuras demonstradas ao longo deste texto:

- Azul: Sinal da rede de alimentação(220V);
- Amarelo: Sinal do circuito de detecção do zero da rede;
- Verde: Sinal de controle oriundo do microcontrolador;
- Rosa: Sinal aplicado sobre o triac.

A fim de se demonstrar o comportamento da dimerização no projeto demonstra-se na figura33 a comparação do sinal de controle em azul com o sinal de controle esperado em amarelo. O sinal amarelo é emulado pelo simulador por uma entrada PWM com *duty cycle* constante.

Ao ampliar-se a figura 33 ,conforme figura 34, pode-se perceber que existe um pequeno atraso entre o sinal de controle e o sinal desejado. Este atraso está associado à execução de instruções do microcontrolador cujo ciclo de máquina é de $0,5\mu s$.

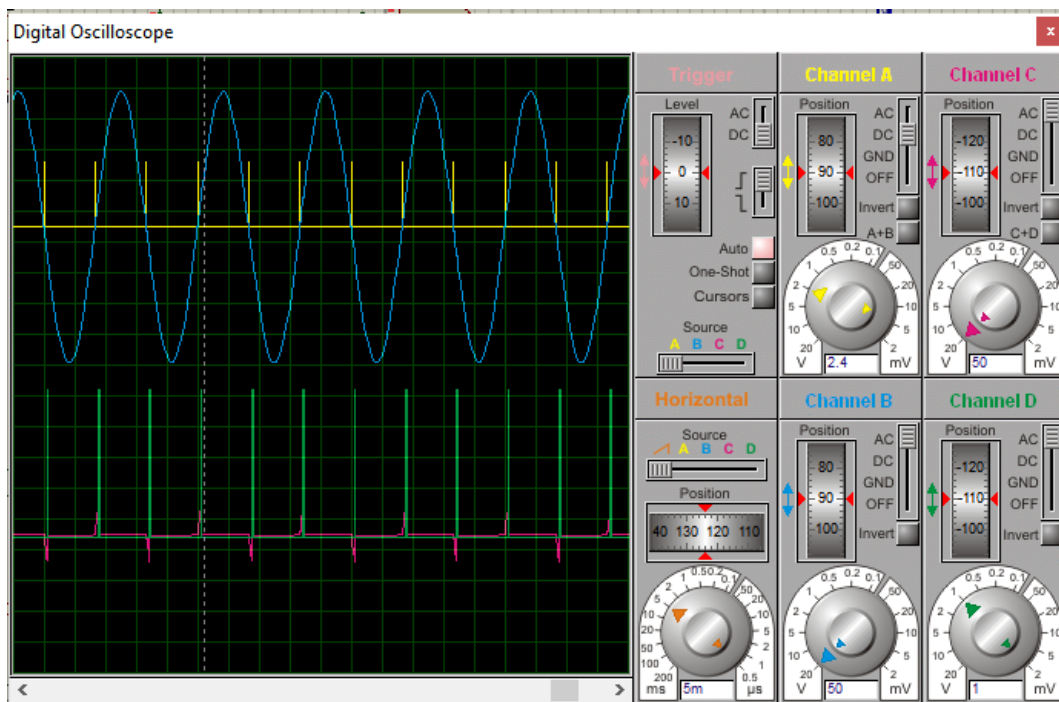


Figura 32 – Comparativo dos sinais associados ao circuito para temperatura de 19°C.

Fonte: Autoria própria.

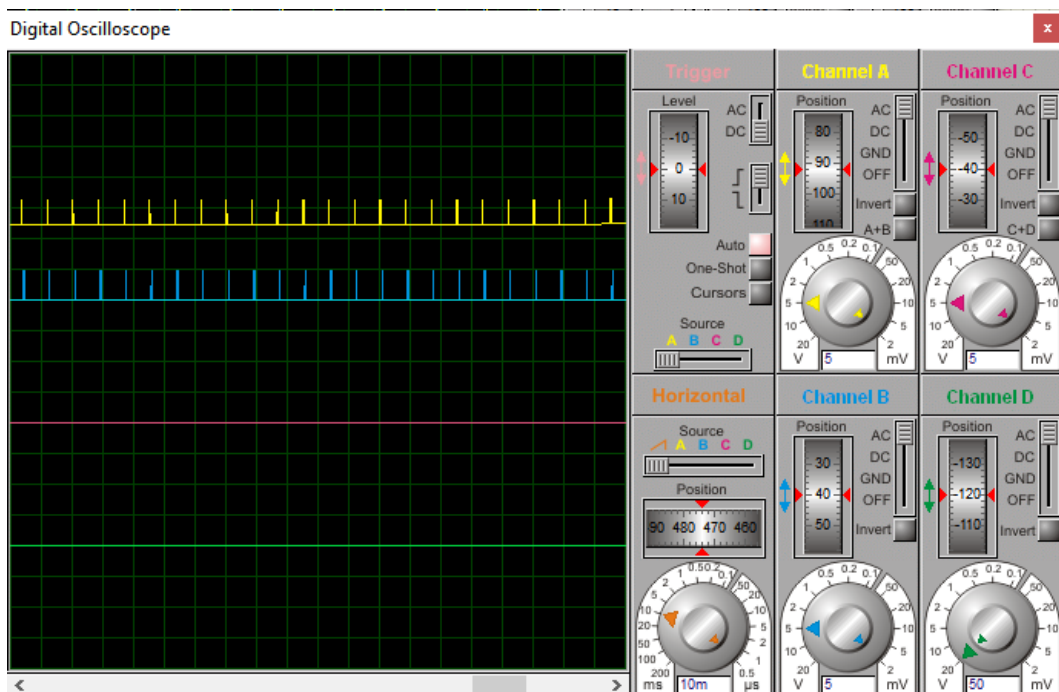


Figura 33 – Comparação entre o sinal esperado e o sinal de controle para temperatura de 19°C.

Fonte: Autoria própria.

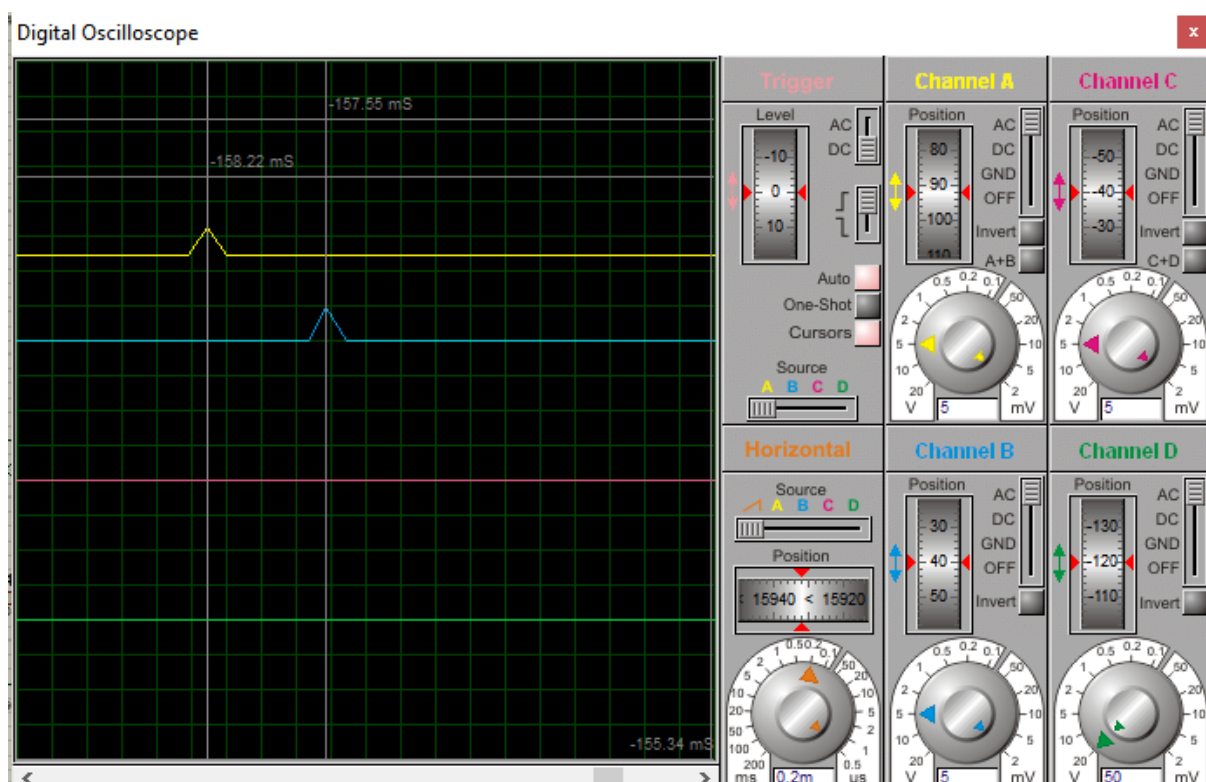


Figura 34 – Ampliação - Comparação entre o sinal esperado e o sinal de controle para temperatura de 19°C.

Fonte: Autoria própria.

As funções de leitura da temperatura, escrita da temperatura no LCD e de controle são muito custosas do ponto de vista de processamento e por isso elas são executadas periodicamente com uma frequência menor que o sinal de controle. Este fenômeno pode ser conferido nas figuras 35 e 36 onde percebe-se que quando existe execução de alguma destas funções acontece-se uma pequena perda no sinal de controle, perda esta que pode ser considerada desprezível para valor de tensão final aplicado na carga. Conforme figuras 35 e 36 o maior ciclo de interrupção do sinal de controle está associado a leitura e escrita da temperatura enquanto que o menor ciclo de interrupção do sinal de controle está associado à execução da rotina de controle PID. Na figura 35 o sinal de tensão em cima do termopar é descrito em rosa, o sinal de detecção do zero da rede em amarelo e o sinal de controle em verde. Já na figura 36 compara-se o sinal esperado em amarelo com o sinal de controle em azul.

Para demonstrar o comportamento do sistema aumenta-se a temperatura para 70°C conforme figura 37. Percebe-se que existe um pequeno erro (0,5V) de medição da temperatura mostrando o valor de 69,5°C que está associado a um erro de conversão da biblioteca de leitura da temperatura. Percebe-se na figura 37 que o sinal de controle é então atualizado para 94.3V pois encontra-se mais próximo do *setpoint* desejado.

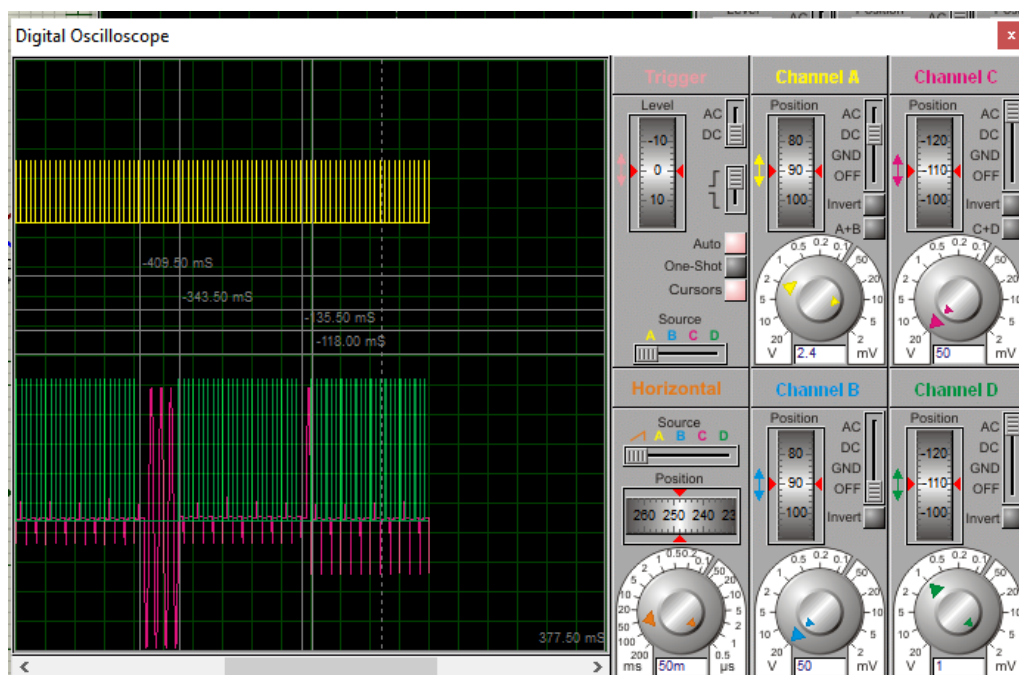


Figura 35 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle e suas implicações.

Fonte: Autoria própria.

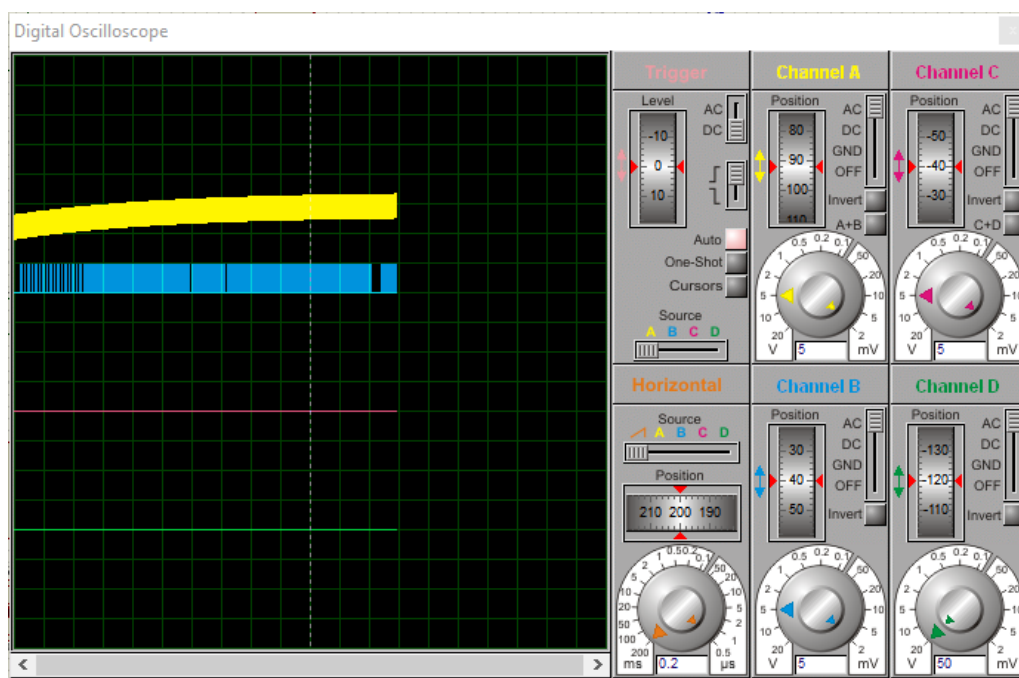


Figura 36 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle e suas implicações e comparação com o valor de controle esperado.

Fonte: Autoria própria.

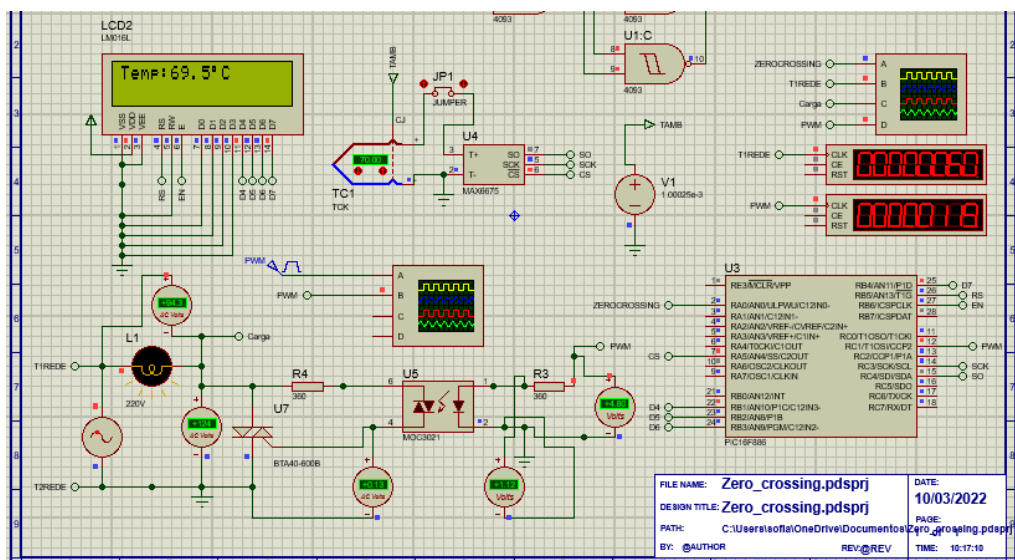


Figura 37 – Resposta do sistema para uma temperatura de 70°C.

Fonte: Autoria própria.

Nas figuras 38 e 39 tem-se o demonstrativo das interrupções de sinal de controle associadas a uma nova leitura de temperatura e logo após a execução da rotina de controle de maneira à atualizar o valor de controle.

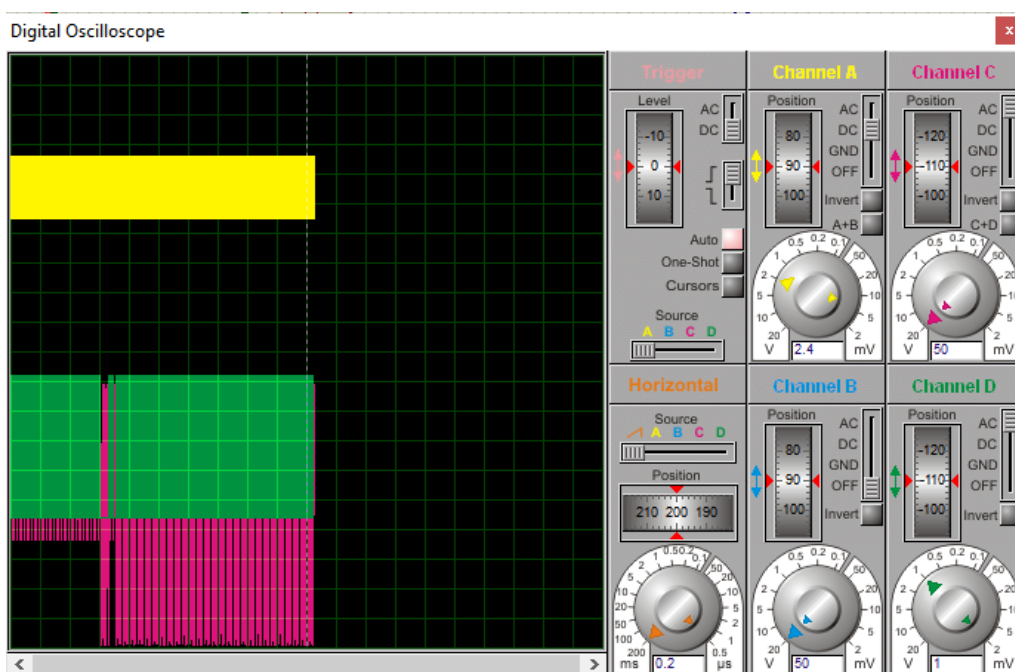


Figura 38 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle para temperatura de 70°C.

Fonte: Autoria própria.

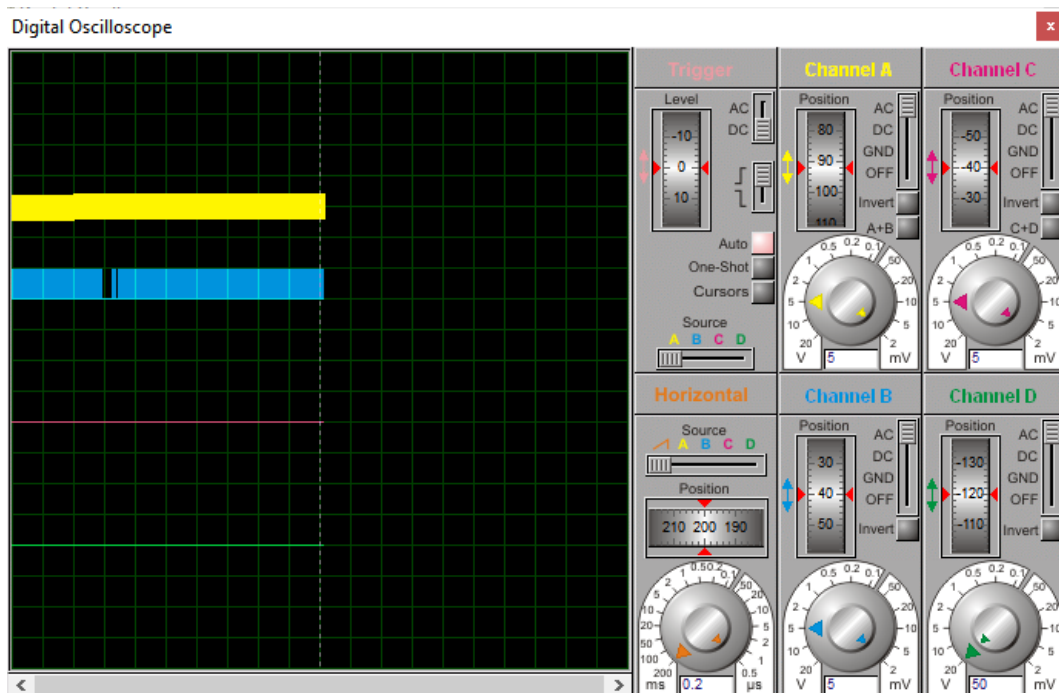


Figura 39 – Demonstrativo das interrupções do sinal de controle para temperatura de 70°C e comparação com o sinal de controle desejado.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, emula-se o próprio valor do *setpoint* de 120°C conforme figura 40. Percebe-se que a resposta de controle neste caso é um valor bem pequeno de 0,01V. O gráfico comparativo dos sinais do sistema neste caso pode ser conferido na figura 41.

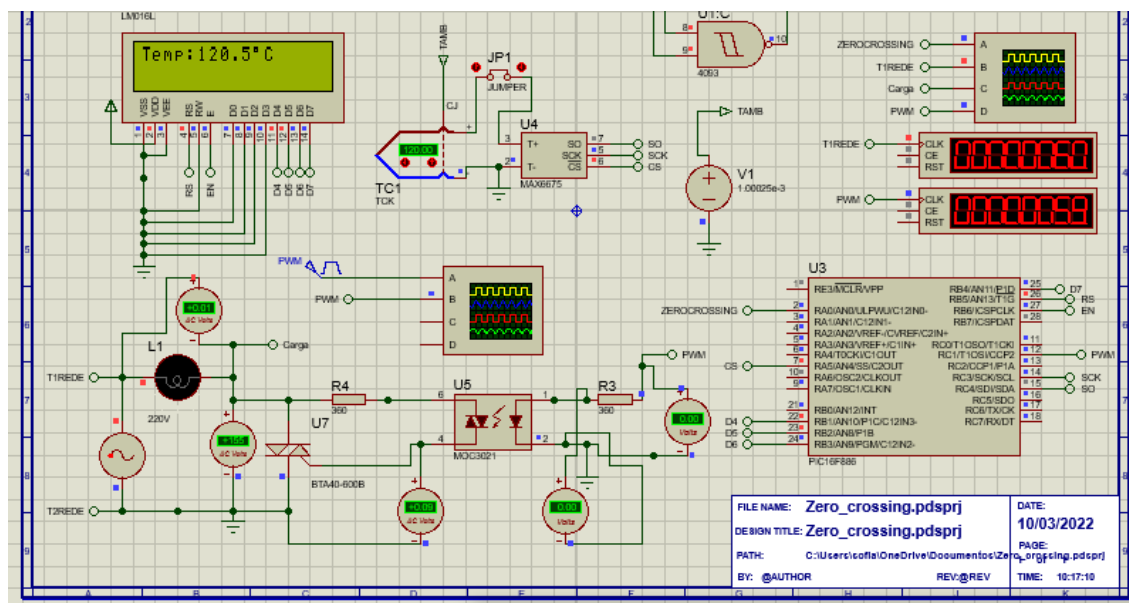


Figura 40 – Resposta do sistema para uma temperatura de 120°C.

Fonte: Autoria própria.

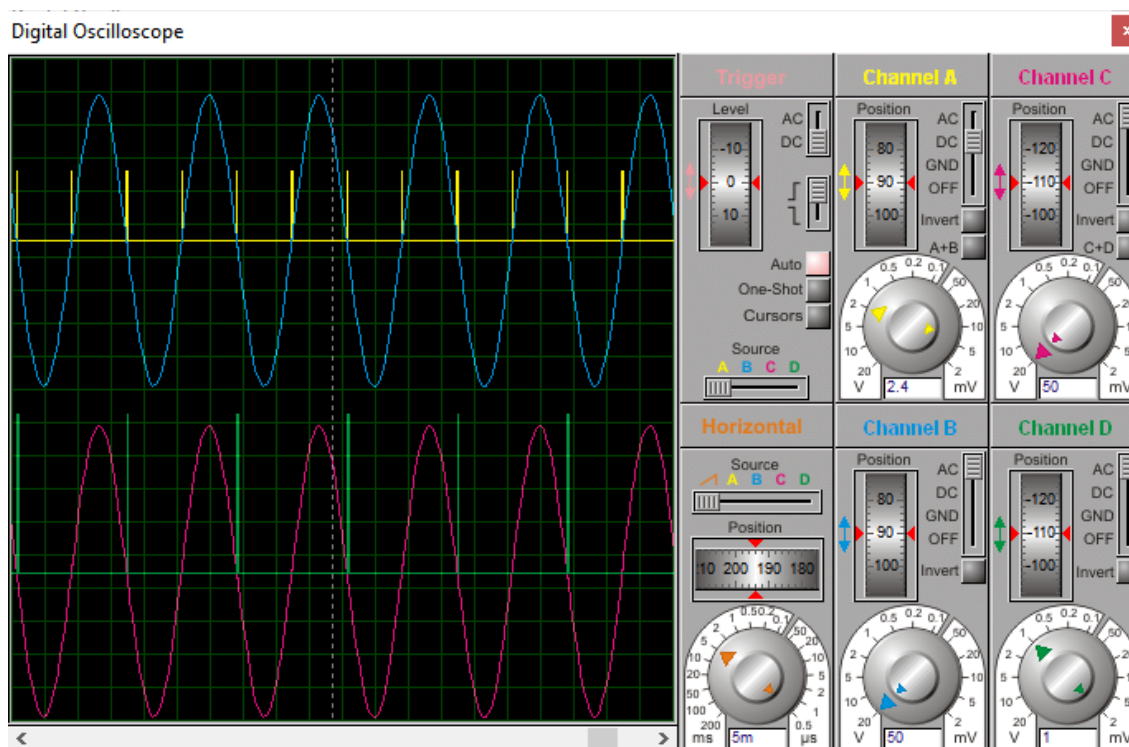


Figura 41 – Montagem do sistema do protótipo.

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho tinha por objetivo a implementação de um protótipo de corrosão otimizada de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de perclorato de ferro. Devido as limitações da pandemia de covid 19 e questões de acesso a equipamentos adequados de soldagem não foi possível a conclusão da placa de circuito impresso, um elemento essencial para construção física do protótipo.

Embora o protótipo físico não tenha sido concluído foi possível emular o sistema de controle de temperatura por meio de uma simulação utilizando-se o software Proteus. Desta forma, como principal resultado do trabalho foi possível emular o comportamento do circuito para diferentes valores de temperatura e avaliar o comportamento do controle para constantes iniciais propostas.

Como sugestão para trabalhos futuros visa-se a conclusão da placa de circuito impresso e avaliação da possibilidade de se adicionar um mecanismo de injeção de oxigênio para o protótipo desenvolvido. Desta forma, será possível efetuar os testes físicos e validações necessárias. Objetiva-se também efetuar o estudo de tratamento adequado dos resíduos gerados pelo processo visando a reutilização e descarte adequado. Por fim, espera-se avaliar a possibilidade de utilização de outros reagentes químicos corrosivos e verificar sua eficiência para o protótipo desenvolvido.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, G. L.; VENDRAMINI, G. Estudo e análise das ações de controle pid em um determinado sistema em malha fechada. *Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII*, 2018. n. 000137, 2018. Citado na página 28.

AVERY, H. E. *Cinética química básica y mecanismos de reacción Vol. III*. [S.l.]: Reverté, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 31.

BARÇANTE, G. M. Controle pid multivariável descentralizado: sintonia e aplicação prática. 2011. 2011. Citado na página 29.

BEZERRA, T. P. *Desenvolvimento de modelos matemáticos para avaliação de processos corrosivos em placas de circuito impresso*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 23.

CAMPOS, S. P. *Controle-PID-com-Dimmer-Micrcontrolado-com-PIC*. 2022. Disponível em: <<https://github.com/SofiaPeCa/Controle-PID-com-Dimmer-Micrcontrolado-com-PIC>>. Acesso em: 2022-03-08. Citado na página 42.

CARVALHO, L. R. S. Bancada didática para estudo de sensores de temperatura do tipo termopar. 2018. 2018. Citado na página 25.

COELHO, J. C. M. *Energia e Fluidos - Vol. 3 - Transferência de Calor*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/163660/pdf-/0?code=lbdjgRyjbFM/av6xPsHAdogA/kPYwbFRDklQxisHEzPb2Jra6l+wG3ys7d5zmADsrA-/wpBCJ6trrIDfUY3Ov2A==>>. Acesso em: 2022-02-08. Citado na página 24.

COSTA, B. D. M. da. *Reutilização do cloreto férrico empregado na fabricação de placas de circuitos impressos*. 54 p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Citado na página 16.

DAMARI. *PLACA DE FENOLITE*. 2022. Disponível em: <<https://www.damari.com.br/placa-fenolite~:text=Termicamente\%20falando\%20a\%0placa\%20de,por\%20curto\%20per\%C3\%ADodo\%20.>>>. Acesso em: 2022-02-24. Citado na página 31.

DUFF, M.; TOWEY, J. Two ways to measure temperature using thermocouples feature simplicity, accuracy, and flexibility. *Analog dialogue*, 2010. v. 44, n. 10, p. 1–6, 2010. Citado na página 25.

HUB, E. *Basics of Microcontrollers – History, Structure and Applications*. 2017. Disponível em: <<https://www.electronicshub.org/microcontrollers-basics-structure-applications/>>. Acesso em: 2022-01-12. Citado na página 26.

Instituto Newton C. Braga. *A Química da Placa de Circuito Impresso (ART2410)*. 2022. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/38-newton-c-braga/conversando-/10519-a-quimica-da-placa-de-circuito-impresso-art2410>>. Acesso em: 2022-02-09. Citado na página 23.

IPC. *IPC Releases World PCB Production Report for 2017*. 2017. Disponível em: <<https://news.thomasnet.com/companystory/ipc-releases-world-pcb-production-report-for-2017-40017127>>. Acesso em: 2022-02-24. Citado na página 14.

JÚNIOR, J. A. d. O. et al. Protótipo de um sistema mexedor aplicado no melhoramento do desempenho de corrosão de placas de circuito impresso. 2018. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018. Citado na página 15.

KOTZ, J. C. et al. *Química Geral e Reações Químicas - Volume 1 - Tradução da 9ª edição norte-americana*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/-/books/9788522118281/>>. Acesso em: 2022-02-08. Citado na página 24.

KOTZ, J. C.; TREICHEL PAUL M.AND TOWSEND, J. R.; TREICHEL, D. A. *Química Geral e Reações Químicas - Volume 2 - Tradução da 9ª edição norte-americana*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522118304/pageid/26>>. Acesso em: 2022-02-09. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

MAGIDEAL. *Caneta Tinta Condutiva De Circuito Eletrônico*. 2020. Disponível em: <<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1579145741-caneta-tinta-condutiva-de-circuito-eletrnico-JM>>. Acesso em: 2022-02-07. Citado na página 20.

MICROSHIP. *PIC16F882/883/884/886/887Data Sheet*. 2009. Disponível em: <<https://pdf1-.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/349217/MICROCHIP/PIC16F886-I/SS.html>>. Acesso em: 2022-01-09. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 59 e 60.

MICROSHIP. *In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) Guide*. 2017. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30277d.pdf>>. Acesso em: 2022-02-23. Citado na página 35.

MIRANDA, A. C. P. d. *Caracterização da contaminação de PCB's*. Tese (Doutorado), 2015. Citado na página 19.

MORAES, V. T. d. *Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011. Citado na página 18.

MOREIRA, L. Medição de temperatura usando-se termopar. *Cerâmica Industrial*, 2002. v. 7, n. 5, p. 51–53, 2002. Citado na página 25.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Eletromagnetismo (vol. 3)*. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno. 5ª edição*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

OLIVEIRA, H. O. P. et al. Controle de temperatura de um forno para cura e secagem de tinta fotossensível. 2012. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

OLIVEIRA, J. R. de; SHIN-TING, W. Tópico 10. 2019. 2019. Citado na página 27.

PARIZOTTO, G. *Automação de equipamento para fabricação de cerveja artesanal*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 57.

PEREIRA, F. *Microcontroladores PIC: programação em C*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2007. Citado na página 27.

PLC. *Dry Film P/ Circuito Impresso A4 Pcb*. 2018. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-919928129-dry-film-p-circuito-impresso-a4-pcb-_JM>. Acesso em: 2022-02-07. Citado na página 21.

PUBCHEM. *Ferric chloride*. 2022. Disponível em: <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24380>>. Acesso em: 2022-02-09. Citado na página 22.

RAMBO, W. *DIMMER COM PIC (HARDWARE)*. 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=478rF_-LqOA>. Acesso em: 2021-12-20. Citado na página 33.

Regulamento (CE) n. °1272/2008. do parlamento europeu e do conselho, de 16 de dezembro de 2008, relativo à classificação, rotulagem e embalagem de substâncias e misturas, que altera e revoga as directivas 67/548/cee e 1999/45/ce, e altera o regulamento (ce) n. ° 1907/2006. *JO L 353 de*, 2008. v. 31, n. 2008, p. 1–1355, 2008. Citado na página 14.

Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011. *Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução*, 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente, n. 357, 2011. Citado na página 14.

ROSSO, V. C.; TAVARES, R. D. N.; POHLMANN, A. R. Alternativa para facilitar a transferência do desenho em placas de circuito impresso. 2013. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

SANTOS, G. J. B. d. et al. Nova proposta de tinta condutiva de baixo custo, para aplicação em placas de circuito impresso. 2018. Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Citado na página 19.

SILVEIRA, R. L. et al. Reciclagem do percloroeto de ferro. In: *Anais do XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, COBENGE*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

SOUZA, D. J. de. *Desbravando o PIC: ampliado e atualizado para PIC 16F628A*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2005. Citado na página 26.

STMICROELECTRONICS. *POSITIVE VOLTAGE REGULATORS*. 2004. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22634/STMICROELECTRONICS-/L7805CV.html>>. Acesso em: 2022-02-23. Citado na página 33.

STMICROELECTRONICS. *Controlling a Triac with a phototriac*. 2020. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00451014-controlling-a-triac-with-a-phototriac-stmicroelectronics.pdf>. Acesso em: 2022-02-23. Citado na página 35.

WATTER, L. H. L@ v@ um simulador para o microcontrolador avr8515. *Trabalho de Graduação, UFPR*, 2002. 2002. Citado na página 26.

XUE, S. et al. Power system frequency measurement for frequency relaying. In: *Proc. of the Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, USA*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 34.

YU, M. et al. Examining regeneration technologies for etching solutions: a critical analysis of the characteristics and potentials. *Journal of Cleaner Production*, 2016. Elsevier, v. 113, p. 973–980, 2016. Citado na página 23.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. et al. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 1942. v. 64, n. 11, 1942. Citado 3 vezes nas páginas 10, 29 e 30.

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DA RESISTÊNCIA- ADAPATADO DE (PARIZOTTO, 2017)

De acordo com a equação 1 a reação entre percloroeto de ferro e água produz hidróxido de ferro($\text{Fe}(\text{OH})_3$) e ácido clorídrico(HCl). Para calcular a quantidade de calor necessária para aquecimento destas componentes e da cuba de aço inoxidável deve-se levar em consideração os seguintes dados:

Constantes utilizadas

Densidade

- Água: $0,998 \text{ g/cm}^3(20^\circ\text{C})$;
- Percloroeto: $2,8 \text{ g/cm}^3 (20^\circ\text{C})$.

Quantidade de solução em massa

- 1kg de FeCl_3 diluídos em 3L(2994g) de água.

Volume de solução

- 0,357L FeCl_3 diluídos em 3L de água totalizando 3,357L de solução.

Massa Molar

- Hidróxido de ferro: $106,866 \text{ g/mol}$;
- Ácido clorídrico: $36,458 \text{ g/mol}$.

Massa Cuba inox

- 1600g.

Calor específico

- Água: $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$;
- Ácido clorídrico: $1.001 \text{ cal/g }^\circ\text{C}$.

Capacidade Calorífica molar

- Hidróxido de Ferro: 298,15 K, J / (mol · K) 0,11 cal/g.°C.

Temperatura

- Temperatura ambiente(inicial): 20°C;
- Temperarura esperada(Final): 120°C (Resistência térmica do fenolite).

Cálculo das quantidades de mol e de massa:

Massa total da solução = 1000g + 2994g = 3994g De acordo com a equação 1 têm-se 1 mol de hidróxido de ferro para 3 mol de ácido clorídrico totalizando para 3994g:

- 18,470mol de hidróxido de ferro;
- 55,410mol de ácido clorídrico = 2020,138g.

Cálculo da quantidade de calor necessária:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

- Hidróxido de ferro: $18,470\text{mol} \times \frac{298,15\text{KJ}}{\text{mol} \times \text{K}} \times (393\text{K} - 293\text{K}) = 550.683,05\text{kJ} = 131,616\text{kcal};$
- Ácido clorídrico $2020,138\text{g} \times \frac{1,001}{\text{g} \times ^\circ\text{C}} \times (120 ^\circ\text{C} - 20 ^\circ\text{C}) = 202,216\text{kcal};$
- Cuba inox: $1600\text{g} \times \frac{0,119423}{\text{g} \times \text{K}} \times (393 \text{ K} - 293 \text{ K}) = 19,11\text{kcal}.$

Quantidade de calor total necessária: 352,94kcal para 3,344L de solução.

Estimativa de aquecimento para 10L de solução:

352,940kcal ————— 3,357L

x ————— 10L

x= 1051,355kcal

Cálculo da potência requerida em WATTS

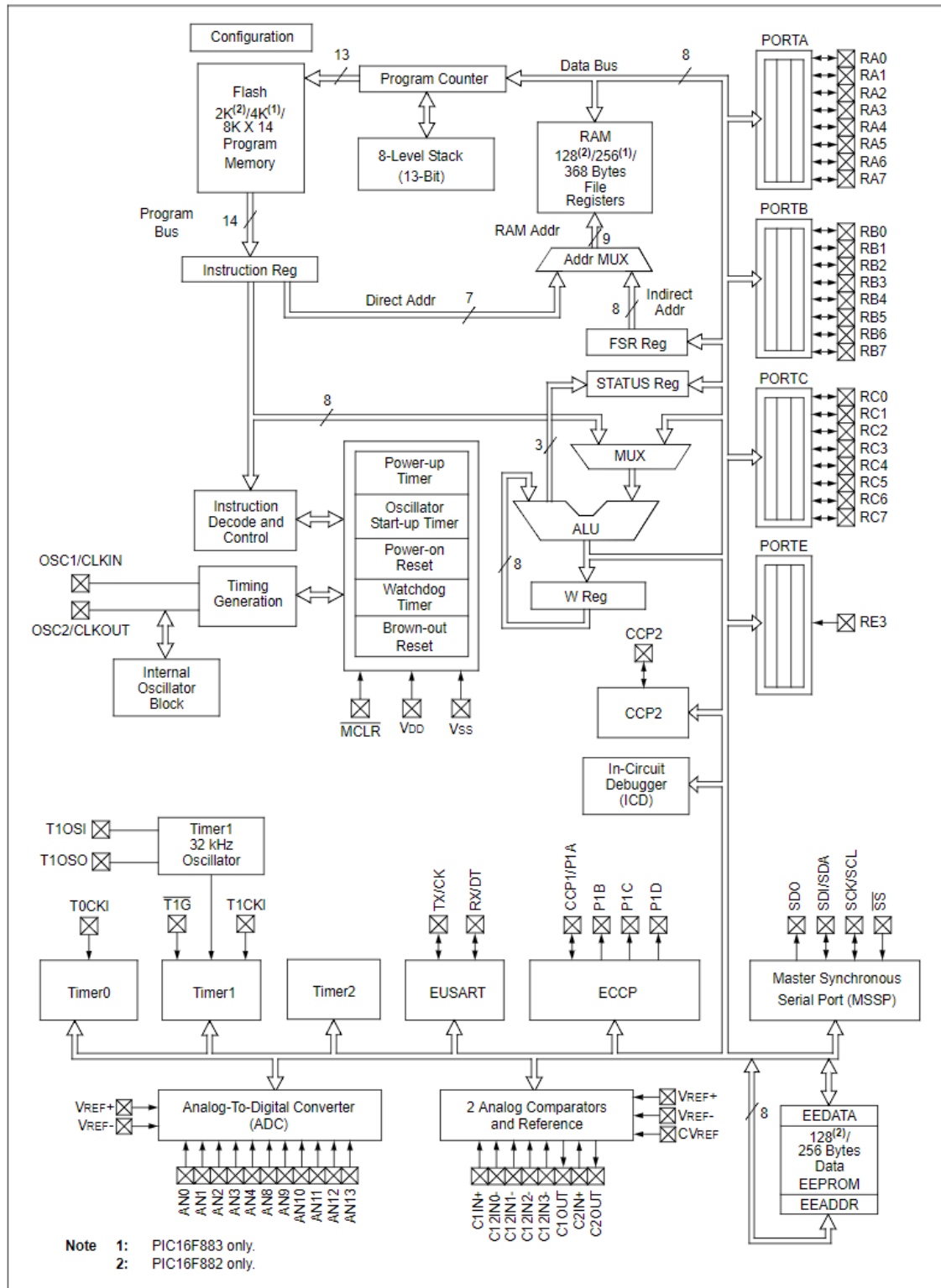
1051,355kcal durante 7min = 2,503 kcal/s 1cal/s ————— 4.1855 W

2,503 kcal/s ————— x

X = 10,476KW -> usar 10KW(Valor comercial)

A potência elétrica da resistência utilizada será de 10kW.

ANEXO A – DIAGRAMA INTERNO DO PIC16F886



Fonte:Microship (2009)

ANEXO B – REGISTRADORES DE FUNÇÕES ESPECIAIS DO PIC16F886

File		File		File		File			
Address		Address		Address		Address			
Indirect addr. ⁽¹⁾	00h	Indirect addr. ⁽¹⁾	80h	Indirect addr. ⁽¹⁾	100h	Indirect addr. ⁽¹⁾	180h		
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h		
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h		
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h		
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h		
PORTA	05h	TRISA	85h	WDTCON	105h	SRCON	185h		
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h		
PORTC	07h	TRISC	87h	CM1CON0	107h	BAUDCTL	187h		
PORTD ⁽²⁾	08h	TRISD ⁽²⁾	88h	CM2CON0	108h	ANSEL	188h		
PORTE	09h	TRISE	89h	CM2CON1	109h	ANSELH	189h		
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah		
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh		
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	EEDAT	10Ch	EECON1	18Ch		
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2 ⁽¹⁾	18Dh		
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved	18Eh		
TMR1H	0Fh	OSCCON	8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved	18Fh		
T1CON	10h	OSCTUNE	90h	General Purpose Registers 16 Bytes	110h	General Purpose Registers 16 Bytes	190h		
TMR2	11h	SSPCON2	91h		111h		191h		
T2CON	12h	PR2	92h		112h		192h		
SSPBUF	13h	SSPAD	93h		113h		193h		
SSPCON	14h	SSPSTAT	94h		114h		194h		
CCPR1L	15h	WPUB	95h		115h		195h		
CCPR1H	16h	IOCB	96h		116h		196h		
CCP1CON	17h	VRCON	97h		117h		197h		
RCSTA	18h	TXSTA	98h		118h		198h		
TXREG	19h	SPBRG	99h		119h		199h		
RCREG	1Ah	SPBRGH	9Ah		11Ah		19Ah		
CCPR2L	1Bh	PWM1CON	9Bh		11Bh		19Bh		
CCPR2H	1Ch	ECCPAS	9Ch		11Ch		19Ch		
CCP2CON	1Dh	PSTRCON	9Dh		11Dh		19Dh		
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh		11Eh		19Eh		
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh		11Fh		19Fh		
General Purpose Registers 96 Bytes	20h	General Purpose Registers 80 Bytes	A0h	General Purpose Registers 80 Bytes	120h	General Purpose Registers 80 Bytes	1A0h		
	3Fh		EFh		16Fh		1EFh		
	40h								
	6Fh								
	70h		accesses 70h-7Fh		F0h		accesses 70h-7Fh	170h	accesses 70h-7Fh
7Fh		FFh		17Fh		1FFh			
Bank 0		Bank 1		Bank 2		Bank 3			

Unimplemented data memory locations, read as '0'.

Note 1: Not a physical register.

2: PIC16F887 only.

Fonte:Microship (2009)