



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

Igor Tasuke Corrêa de Araújo Morimoto

Implementação de uma Fonte de Tensão Regulada Ajustável com Controle por Comunicação Serial

Recife

2025

Igor Tasuke Corrêa de Araújo Morimoto

Implementação de uma Fonte de Tensão Regulada Ajustável com Controle por Comunicação Serial

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Hermano Andrade Cabral, Ph.D.

Coorientador(a): Prof. Diego Maia Hamilton, Bacharel em Engenharia Eletrônica

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Morimoto, Igor Tasuke Corrêa de Araújo.

Implementação de uma Fonte de Tensão Regulada Ajustável com Controle por Comunicação Serial / Igor Tasuke Corrêa de Araújo Morimoto. - Recife, 2025.

81 p. : il., tab.

Orientador(a): Hermano Andrade Cabral

Cooorientador(a): Diego Maia Hamilton

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. fontes ATX. 2. fontes programáveis. 3. fontes de tensão. 4. sustentabilidade. 5. lixo eletrônico. I. Cabral, Hermano Andrade. (Orientação). II. Hamilton, Diego Maia. (Cooorientação). IV. Título.

600 CDD (22.ed.)

Igor Tasuke Corrêa de Araújo Morimoto

Implementação de uma Fonte de Tensão Regulada Ajustável com Controle por Comunicação Serial

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 29/01/2025

Banca Examinadora

Prof. Hermano Andrade Cabral, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Guilherme Nunes Melo, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela sua presença constante em minha vida, pelas pessoas que colocou em meu caminho, e por tudo que me proporcionou ao longo da minha trajetória acadêmica, tendo me socorrido em vários momentos.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, constante motivação e pelos sábios conselhos a fim de estudar e ser um profissional competente, ético e diferenciado.

Aos meus avós e tios, por seu incentivo contínuo, palavras de encorajamento e exemplos de dedicação e perseverança que sempre me inspiraram.

À minha namorada, por estar ao meu lado em grande parte dessa jornada, oferecendo apoio, compreensão, incentivo e até mesmo ajudando a melhorar minha performance acadêmica. Sua presença foi essencial em muitos momentos desafiadores.

Aos meus amigos que conheci na universidade, com quem compartilhei muitos risos, suor e sangue.

Aos meus amigos de infância, que tornaram a caminhada muito mais leve e significativa.

À Dipolum Consultoria, onde passei boa parte do tempo da faculdade, contribuindo e aprendendo, fazendo amizades e agarrando oportunidades.

Aos meus professores do DES, pela dedicação e ensinamentos que moldaram minha formação técnica para além da sala de aula.

Aos demais professores que tive na UFPE; da Área II, CIn e do Departamento de Engenharia Biomédica.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que essa jornada fosse possível. Cada apoio, conselho e incentivo recebido ao longo dessa caminhada me ajudou a chegar até aqui, transformando desafios em aprendizados e sonhos em realidade.

Não podemos resolver nossos
problemas com o mesmo
pensamento que usamos quando os
criamos

Albert Einstein

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

Implementação de uma Fonte de Tensão Regulada Ajustável com Controle por Comunicação Serial

Igor Tasuke Corrêa de Araújo Morimoto

A crescente demanda por fontes de alimentação ajustáveis e programáveis, aliada ao elevado custo e disponibilidade dos equipamentos comerciais disponíveis no mercado, motiva o desenvolvimento de soluções alternativas que conciliem eficiência, acessibilidade e sustentabilidade. Este trabalho propõe a modificação de uma fonte ATX, amplamente utilizada em computadores, para transformá-la em uma fonte de bancada ajustável e programável, capaz de operar com controle manual e comunicação serial. Para fundamentar estas alterações, aborda conceitos fundamentais de eletrônica, como regulação de tensão, conversão CC-CC, topologias de circuitos e protocolos de comunicação serial, com foco na integração entre *hardware* e *software* para automação de testes. O projeto explora o reaproveitamento de fontes ATX devido à sua ampla disponibilidade e características intrínsecas, como regulação estável de tensão e proteções contra falhas, adicionando funcionalidades de ajuste e controle por computador. O equipamento desenvolvido mostrou-se bastante viável e fiel à proposta, atendendo a todos os requisitos definidos com maestria e possibilitando a implementação de funcionalidades além das que foram propostas.

Palavras-chave: fontes ATX; fontes programáveis; fontes de tensão; sustentabilidade; lixo eletrônico.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Departament of Eletronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

Implementation of an Adjustable Regulated Power Supply with Serial Communication Control

Igor Tasuke Corrêa de Araújo Morimoto

The growing demand for adjustable and programmable power supplies, combined with the high cost and limited availability of commercial equipment on the market, motivates the development of alternative solutions that balance efficiency, accessibility, and sustainability. This work proposes the modification of an ATX power supply, widely used in computers, to transform it into an adjustable and programmable bench power supply capable of operating with manual control and serial communication. To support these modifications, it addresses fundamental concepts in electronics, such as voltage regulation, DC-DC conversion, circuit topologies, and serial communication protocols, focusing on the integration between hardware and software for test automation. The project leverages the reuse of ATX power supplies due to their wide availability and intrinsic characteristics, such as stable voltage regulation and fault protection, while adding functionalities for adjustment and computer control. The developed equipment proved to be highly feasible and faithful to the proposed objectives, meeting all defined requirements with excellence and enabling the implementation of functionalities beyond those initially proposed.

Keywords: ATX power supplies; programmable power supplies; voltage sources; sustainability; electronic waste

Lista de Figuras

2.1	Conversor <i>Half Bridge</i> e Suas Formas de Onda na Entrada.	23
2.2	Padrão de Conectores das Fontes ATX.	25
2.3	Temporização da Fonte Após Perda de Alimentação.	29
3.1	Especificações da Fonte ATX.	35
3.2	Osciloscópio Digital.	39
3.3	Prensa Térmica.	40
3.4	Reostato de 500W.	40
4.1	AZ7500B.	42
4.2	Esquema Elétrico Disponível na Internet.	44
4.3	Esquema Elétrico Conferido.	44
4.4	Amplificador de Erro.	45
4.5	Tensão de Saída (V) vs Resistor de Feedback ($k\Omega$).	45
4.6	Resistor Divisor da Tensão de Referência.	47
4.7	Circuito com Divisor de Vref.	47
4.8	Pinos do X9C104P.	48
4.9	Circuito Resultante.	49
4.10	Tensão de Saída (V) em Função da Resistência do Potenciômetro (Ω).	50
4.11	Esquema Elétrico da PCB.	52
4.12	Layout da PCB. Camadas Superior e Inferior.	53
4.13	Placa devidamente montada e fixada.	55
4.14	Distribuição dos Componentes na PCB	56

5.1	Relação Tensão vs Corrente Drenada.	63
5.2	Oscilação de Tensão com $V_{out} = 12,22\text{V}$ e $I_{out}=0,214\text{ A}$	65
5.3	Oscilação de Tensão com $V_{out} = 12,22\text{V}$ e $I_{out}=2,45\text{A}$	66
5.4	Operação da Fonte em Modo Serial.	67

Lista de Tabelas

2.1	Distribuição dos Pinos da Fonte ATX no Conector Principal	25
2.2	Requisitos da Entrada CA	26
2.3	Requisitos de Tensão na Saída CC	27
2.4	Tensão de Oscilação e Ruído na Saída CC	27
2.5	Amplitude da Resposta ao Degrau na Carga	28
2.6	Carga Capacitiva na Saída	28
2.7	Temporização da Fonte Após Perda de Alimentação	29
4.1	Resposta à Variação da Resistência de Feedback	46
4.2	Lista de componentes e valores.	55

Lista de Abreviações

ADC	 Conversor Analógico para Digital
ATX	 <i>Advanced Technology eXtended</i>
bps	 bits por segundo
CA	 Corrente Alternada
CAD	 <i>Computer Aided-Design</i>
CC	 Corrente Contínua
CI	 Circuito Integrado
GPIO	 <i>General Purpose Input/Output</i>
I ² C	 <i>Inter-Integrated Circuit</i>
LED	 <i>Light Emitting Diode</i>
MCU	 <i>Microcontroller Unit</i>
PCB	 <i>Printed Circuit Board</i>
PSU	 <i>Power Supply Unit</i>
PWM	 <i>Pulse Width Modulation</i>
RTOS	 <i>Real Time Operating System</i>
SPI	 <i>Serial Peripheral Interface</i>
TTL	 <i>Transistor-Transistor Logic</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	 <i>Universal Serial Bus</i>

Lista de Símbolos

A .. Ampère

°C Grau Celsius

dB .. Decibel

F ... Farad

Hz ... Hertz

k ... Quilo

n ... Nano

VA Volt-Ampère

V Volt

W ... Watt

μ ... Micro

Ω ... Ohm

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivo Geral	18
1.2.1	Objetivos específicos	18
1.3	Organização do TCC	18
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Fontes de Tensão Reguladas	21
2.2	Fontes de Corrente Reguladas	21
2.3	Retificação e Conversores CC-CC	21
2.4	Conversores <i>Half-Bridge</i>	22
2.5	Padrão ATX/ATX12V para Fontes de Tensão Reguladas	24
2.5.1	Requisitos da Entrada	26
2.5.2	Requisitos da Saída	26
2.5.3	Resposta ao Transiente	27
2.6	Comunicação Serial Assíncrona	29
2.7	Fontes de Bancada	30
2.8	Potenciômetros Digitais	31
3	Materiais e Métodos	33
3.1	Análise do Funcionamento da Fonte ATX	34
3.2	Coleta de Requisitos	34
3.3	Modificação do Circuito	35

3.4	Produção da Placa de Circuito Impresso	36
3.5	Programação do Microcontrolador	37
3.6	Testes de Desempenho	37
3.7	Análise de Viabilidade	38
3.8	Equipamentos e Materiais Utilizados	38
4	Desenvolvimento	41
4.1	Sistema Proposto	41
4.2	Implementação	42
4.2.1	Modificações no Circuito	43
4.2.2	Placa de Circuito Impresso	51
4.2.3	Manufatura	54
4.2.4	Componentes Utilizados	54
4.2.5	Código de Controle	56
5	Resultados	62
5.1	Regulação de Tensão	62
5.2	Tensões Alcançáveis	64
5.3	Qualidade da Saída	64
5.4	Proteção Contra Curto Circuito	66
5.5	Teste da Comunicação Serial	66
6	Conclusão e Considerações Finais	68
6.1	Viabilidade	69
6.2	Dificuldades Encontradas	69
6.3	Trabalhos Futuros	70
	Referências	71
	Apêndice A Código de Controle	73
A.1	Arquivo main.c	73
A.2	Arquivo circular_buffer.c	79

A.3	Arquivo circular_buffer.h	80
-----	-------------------------------------	----

Capítulo 1

Introdução

A crescente necessidade de fontes de alimentação ajustáveis e eficientes para o desenvolvimento e testes de dispositivos eletrônicos motiva a busca por soluções acessíveis e personalizáveis. No contexto acadêmico e industrial, fontes de bancada programáveis são ferramentas altamente úteis e facilitadoras para atender a demandas que envolvem ajuste preciso e automatizado de tensões e correntes, garantindo segurança e desempenho nos processos. Entretanto, os altos custos associados a esses equipamentos, juntamente com a dificuldade de encontrá-los no mercado brasileiro, frequentemente limitam sua acessibilidade, especialmente para estudantes, entusiastas e pequenos laboratórios.

Este trabalho se propõe a modificar uma fonte ATX convencional, amplamente disponível e frequentemente descartada como resíduo eletrônico, para torná-la uma fonte programável e ajustável, com controle manual e via comunicação serial. Essa abordagem não apenas fornece uma solução de baixo custo, mas também contribui para a sustentabilidade ao reaproveitar equipamentos descartados (Green Eletron, 2023).

O projeto explora conceitos fundamentais de eletrônica, como regulação de tensão, comunicação serial e projeto de circuitos, ao mesmo tempo que promove inovação ao integrar controle digital e ajustes precisos por meio de um microcontrolador. Além disso, visa demonstrar a viabilidade técnica e econômica da modificação, apresentando uma alternativa acessível para fontes de bancada no mercado.

1.1 Justificativa

Fontes de alimentação são componentes essenciais em dispositivos elétricos e eletrônicos, sendo indispensáveis em aplicações acadêmicas, industriais e laboratoriais. Muitas vezes, são necessárias fontes de tensão não convencionais, difíceis de se adquirir no comércio ou com a necessidade de fazer ajustes finos na tensão fornecida. Existem fontes conhecidas como fontes de bancada, que possuem ajuste de tensão e, em alguns casos, de corrente na saída. Essas fontes são um tipo de equipamento amplamente utilizado por profissionais da área, mas seu custo de aquisição pode ser um empecilho, principalmente para estudantes e entusiastas.

Além das anteriores, a automação de processos é uma funcionalidade cada vez mais exigida em aplicações modernas, como testes automatizados de dispositivos, de forma a criar uma rotina de tensões e correntes intervaladas. Contudo, a capacidade de configurar fontes de alimentação via protocolos de comunicação, como comunicação serial, é geralmente restrita a equipamentos de alto custo e vendidos apenas por empresas especializadas, para outras empresas, limitando o acesso a tais tecnologias (Gontean et al., 2009).

As fontes ATX, comumente usadas em computadores, são um bom exemplo de fonte regulada: entregam tensões estáveis e empregam uma série de proteções ao circuito, como contra super-aquecimento, sobrecorrente e curto circuito (Intel Corporation, 2000). São fáceis de se adquirir, principalmente ao se retirar de computadores sem uso. Em razão disso, o presente trabalho optou por modificá-las para obter uma fonte com boa regulação, que seja ajustável e programável via comunicação serial, nos casos em que adquirir um equipamento comercial com estes atributos seja dispendioso. Essa abordagem não apenas apresenta uma solução técnica viável e acessível, como também promove a reutilização de equipamentos considerados obsoletos, contribuindo para a redução do lixo eletrônico e o reaproveitamento de recursos. Dados recentes apontam que o lixo eletrônico gerado por dispositivos como computadores é uma das principais preocupações ambientais, destacando a urgência de iniciativas que unam sustentabilidade e inovação tecnológica (Green Eletron, 2023).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi implementar uma fonte de tensão regulada a partir de uma fonte ATX, permitindo o ajuste na tensão de saída de forma manual ou por meio de programação via comunicação serial.

1.2.1 Objetivos específicos

- Tornar a saída da fonte ATX ajustável;
- Permitir o ajuste da tensão via comunicação serial;
- Analisar o desempenho do equipamento após as modificações;
- Estudar a viabilidade da modificação em termos de complexidade e desempenho;
- Fornecer uma alternativa de equipamento de bancada de baixo custo;
- Oferecer uma alternativa sustentável para equipamentos obsoletos, considerados lixo eletrônico.

1.3 Organização do TCC

O conteúdo deste TCC está dividido em seis capítulos e um apêndice. As referências encontram-se nas páginas finais. A seguir, um resumo dos capítulos seguintes do TCC.

Capítulo 2. Fundamentação teórica. Aborda os conceitos básicos de fontes de tensão e corrente, conversores, topologia *Half Bridge*, fontes ATX, potenciômetros digitais e comunicação serial assíncrona.

Capítulo 3. Materiais e Métodos. Descreve os materiais necessários à realização do presente trabalho e os métodos utilizados na sua execução.

Capítulo 4. Desenvolvimento. Todo o processo de execução, com maior detalhamento, incluindo as dificuldades encontradas e solução para elas.

Capítulo 5. Resultados. Uma análise do produto final do desenvolvimento.

Capítulo 6. Conclusão. Discussão sobre todo o trabalho em questão, sua importância, validade dos resultados obtidos e viabilidade.

Apêndice A. Códigos de Controle Implementados.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

DISPOSITIVOS elétricos e eletrônicos dependem de uma fonte de energia elétrica para operar, sendo esta transportada por portadores de carga, como elétrons (negativos) e lacunas (positivas). A separação entre essas cargas opostas gera uma diferença de potencial elétrico, conhecida como tensão elétrica ou voltagem. Quando essas cargas entram em movimento através de um meio condutor, surge a corrente elétrica, que transporta energia para alimentar circuitos ou dispositivos (Boylestad, 2012).

No contexto deste trabalho, tensão e corrente elétrica desempenham papéis fundamentais, pois o objetivo é manipulá-las de forma controlada para atender a diferentes necessidades, como testes automatizados de dispositivos e componentes. Esses conceitos são essenciais para compreender a base teórica que sustenta o projeto e sua aplicação prática.

A seguir, serão apresentados os princípios de operação de fontes de alimentação chaveadas, com ênfase na topologia *half-bridge*, comum em fontes ATX. Em seguida, são exploradas as técnicas de controle de tensão e corrente, detalhando métodos manuais e digitais, como o uso de potenciômetros e protocolos de comunicação serial.

2.1 Fontes de Tensão Reguladas

As fontes de tensão podem ter várias origens, como reações químicas, indução eletromagnética, geração eletromecânica ou mesmo a conversão a partir de outra fonte de energia elétrica. Quando a fonte entrega uma tensão constante, independentemente de variações na carga aplicada e de variações em sua entrada, ela é dita regulada (Boylestad, 2012).

No caso presente neste trabalho, trata-se de um conversor, em que a entrada é a rede de energia com corrente alternada (CA), retificada e convertida em corrente contínua (CC), de forma regulada. Esta saída tem seu valor ajustável dentro dos limites da fonte.

2.2 Fontes de Corrente Reguladas

Do mesmo modo que as fontes de tensão, as fontes de corrente reguladas são aquelas que entregam uma corrente estável, independentemente da carga aplicada e de variações em sua entrada. Aplicações incluem iluminação a LEDs, carregamento de baterias e circuitos de teste e medição, em que o controle da corrente é crucial para evitar superaquecimento, degradação dos dispositivos e mantê-los em funcionamento dentro dos parâmetros adequados (Boylestad, 2012).

2.3 Retificação e Conversores CC-CC

A tensão da rede elétrica é gerada em grandes usinas e distribuída pelo país na forma de corrente alternada para aumentar a eficiência de transmissão, geralmente chegando ao usuário final na tensão de $220V_{AC}$ ou $127V_{AC}$. Esta, portanto, se torna a principal fonte de energia para equipamentos eletro-eletrônicos. Esses equipamentos, entretanto, funcionam com tensões contínuas de amplitude muito menor, fazendo com que a tensão da rede precise ser retificada e rebaixada. Um exemplo de equipamento é o computador pessoal, que faz uso de uma fonte com especificações

próprias para funcionar (TS Shara, 2024).

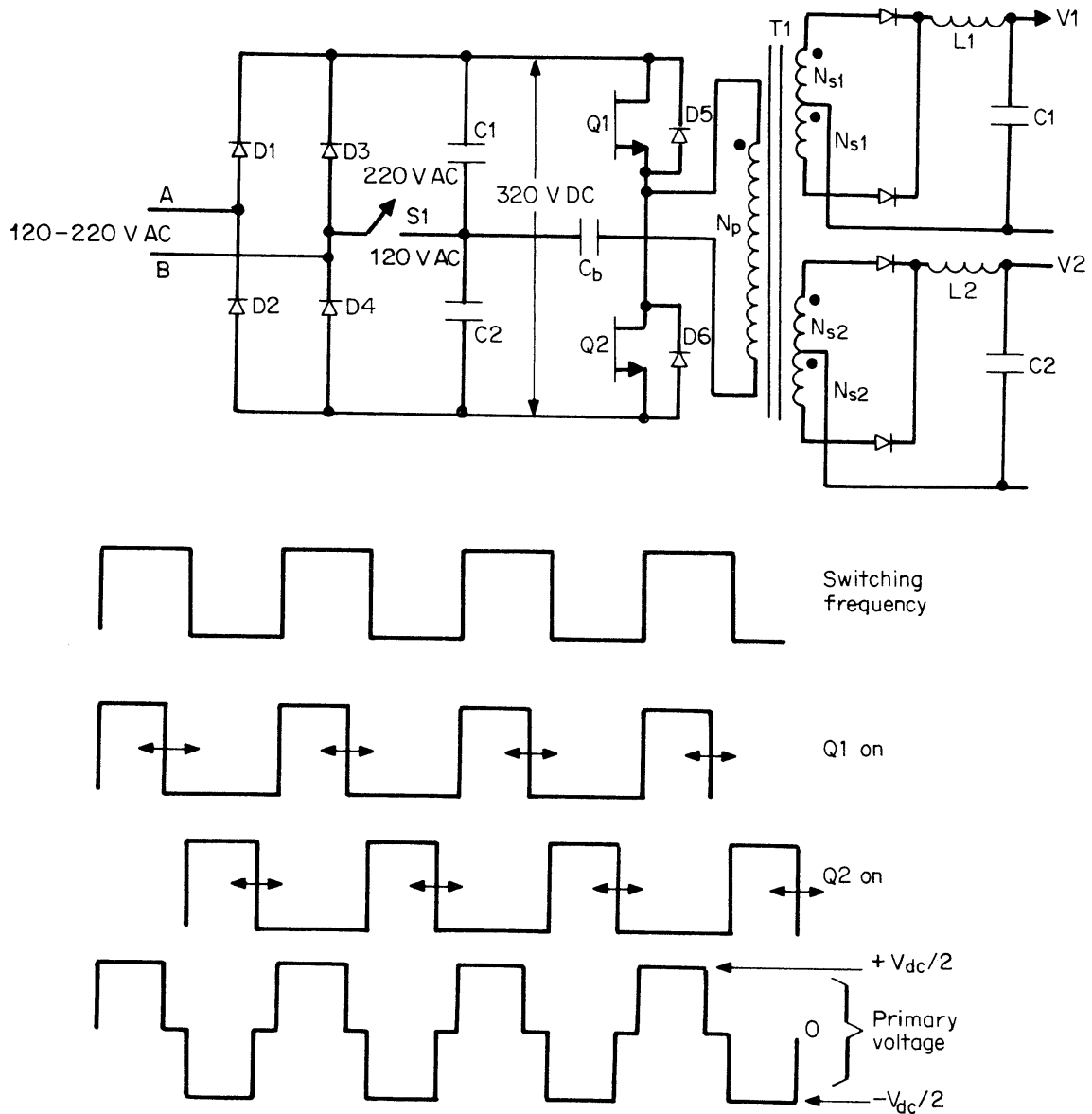
Atualmente, as fontes de alimentação dos equipamentos têm ficado cada vez menores e mais eficientes com o uso da tecnologia de chaveamento em conversores CC-CC, que são aqueles em que a entrada e saída são contínuas, alterando apenas o nível de tensão. Caso a fonte de energia desses conversores seja uma tensão elétrica alternada, como a da rede elétrica pública, é necessário que eles sejam precedidos pela conversão da corrente CA em CC, através do uso de uma ponte retificadora. Esse dispositivo permite a passagem da corrente em um único sentido, eliminando a mudança de polaridade no tempo. Usam-se também elementos acumuladores de energia, como capacitores e indutores, para minimizar as oscilações devido à frequência da rede. Somente então ocorre o processo de ajuste e regulação da tensão para o nível necessário (Pressman et al., 2009).

2.4 Conversores *Half-Bridge*

Existem várias topologias de conversores CC-CC, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Um desses tipos é o conversor *Half-Bridge*, exposto na Figura 2.1. Sua maior vantagem em relação aos demais conversores é que ele submete o transistor de chaveamento apenas à tensão CC aplicada ao primário do transformador, e não ao dobro deste valor. São muito usados quando a tensão de entrada da fonte de alimentação é de $110V_{AC}$, $220V_{AC}$ ou mais. Após a retificação, a tensão se estabelece em um nível um pouco abaixo da tensão de pico da rede, a depender do circuito, sendo esta tratada como V_{DC} (Hart, 2016).

O conjunto de transistores Q1 e Q2 funciona como chaves digitais, nos quais cada um permanece ligado por, no máximo, metade do período de chaveamento, representado por *switching frequency* na Figura 2.1. Q2 é defasado em 180° em relação a Q1, de forma que sempre que um estiver conduzindo, o outro esteja em corte. Isto permite, junto com a configuração em forma de divisor de tensão dos capacitores C1 e C2, que a polaridade aplicada ao transformador seja invertida, criando-se uma forma de onda alternada no primário e conseqüentemente, induzindo

Figura 2.1: Conversor *Half Bridge* e Suas Formas de Onda na Entrada.



Fonte: (Pressman et al., 2009).

uma tensão no secundário. Tomando como referência positiva o terminal ponto no primário do transformador, quando Q1 estiver em condução, $V_{N_p} = V_{C1}$ e quando Q2 estiver conduzindo, $V_{N_p} = -V_{C2}$, resultando em uma onda alternada de amplitude $V_{DC}/2$. Lembrando que $V_{C1} = V_{C2}$ e que $V_{C1} + V_{C2} = V_{DC}$. O ciclo de trabalho, que é o tempo em que os transistores permanecem em condução em relação ao período de chaveamento, determina a tensão na saída da fonte, sendo controlado por outro circuito (Hart, 2016).

O controlador do ciclo de trabalho atua por meio de um modulador de largura

de pulso (PWM), ajustando-o a partir de um valor pré-determinado ou a partir de uma realimentação, que compara a tensão de saída da fonte com uma referência para mantê-la regulada.

Os transformadores possuem pequenos desbalanceamentos no acoplamento magnético entre as bobinas, fazendo com que a cada ciclo, uma parte da energia fique presa nele até que sature com uma corrente de *bias* CC. Esta situação, além de impedir o funcionamento do circuito, danificaria os transistores com correntes e tensões excessivas. Para evitar esta componente CC, o capacitor C_b é posicionado em série com a bobina do primário (Pressman et al., 2009).

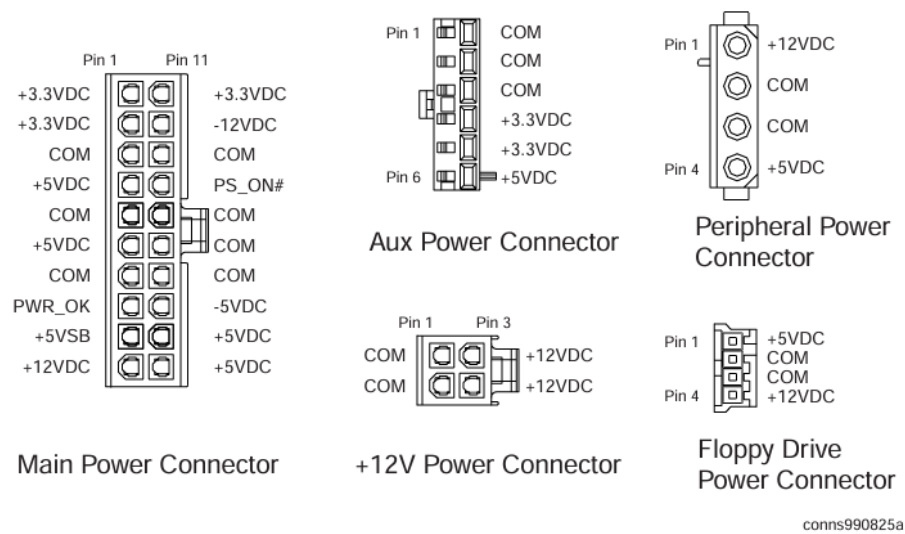
Os diodos D5 e D6 servem para fornecer um caminho de descarga da corrente gerada pela indutância do transformador, onde a energia é encaminhada de volta aos capacitores C1 e C2 da entrada. Esses capacitores, além de constituírem parte fundamental da topologia *half bridge*, ainda podem servir como dobrador de tensão, permitindo que a alimentação seja conectada à rede de $110V_{AC}$ com o acionamento da chave S1 (Pressman et al., 2009).

O secundário do transformador deve ser dimensionado observando-se a tensão de saída desejada, sabendo que a tensão sofrerá uma queda nos diodos retificadores da saída. A partir disto, escolhe-se o ciclo de trabalho da onda quadrada que controla os transistores Q1 e Q2, dentro da limitação do controlador, para atingir os parâmetros desejados na saída da fonte (Pressman et al., 2009).

2.5 Padrão ATX/ATX12V para Fontes de Tensão Reguladas

Advanced Technology eXtended, ATX, é uma especificação de configuração de placa mãe e fonte de alimentação para computadores. Foi desenvolvida em 1995 pela Intel Corporation e desde então, tem sido o padrão mais comumente utilizado, com algumas variações (Wikipédia, 2023).

Para as fontes de alimentação, do inglês, *power supply units* (PSUs), o padrão

Figura 2.2: Padrão de Conectores das Fontes ATX.

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

Tabela 2.1: Distribuição dos Pinos da Fonte ATX no Conector Principal

Pino	Sinal	Cor	Pino	Sinal	Cor
1	+3.3VDC	Laranja	11	+3.3VDC, Referência	Laranja, Marrom
2	+3.3VDC	Laranja	12	-12VDC	Azul
3	COM	Preto	13	COM	Preto
4	+5VDC	Vermelho	14	PS_ON#	Verde
5	COM	Preto	15	COM	Preto
6	+5VDC	Vermelho	16	COM	Preto
7	COM	Preto	17	COM	Preto
8	PWR_OK	Cinza	18	-5VDC	Branco
9	+5VSB	Roxo	19	+5VDC	Vermelho
10	+12VDC	Amarelo	20	+5VDC	Vermelho

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

requer várias tensões de saída: +3,3V, +5V, +12V e de menor potência, -12V e +5V_{SB}. Em versões mais antigas, também estão presentes saídas de -5V. Além destas, também são especificados os sinais de controle e comando. Alguns deles são o PS_ON, de entrada ativo em nível baixo, que habilita a fonte de tensão e o PWR_OK, saída que informa à placa mãe que a fonte está funcionando dentro dos padrões exigidos. A Figura 2.2 mostra o padrão a ser utilizado para os conectores, enquanto a Tabela 2.1 descreve a função de cada pino no conector principal. O pino 11 possui dois fios, sendo uma saída de +3.3V e um retorno de referência para que a fonte compense a queda de tensão nos cabos e conectores (Intel Corporation, 2000).

Tabela 2.2: Requisitos da Entrada CA

Parâmetro	Min.	Nom.	Máx.	Unidade
V_{in} (115 VAC)	90	115	135	VAC _{rms}
V_{in} (230 VAC)	180	230	265	VAC _{rms}
V_{in} Frequência	47	—	63	Hz

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

2.5.1 Requisitos da Entrada

A Tabela 2.2 lista os limites mínimo e máximo do intervalo de tensão de entrada CA da rede elétrica, no qual a fonte deve ser capaz de operar corretamente. A seleção de tensão pode ser feita de forma automática ou manual, por meio de chave. Também é necessário que haja proteção contra sobrecorrente (normalmente feita por meio de fusíveis) (Intel Corporation, 2000).

Outro requisito é a limitação de corrente de partida por, pelo menos, 3 ciclos de linha, respeitando os limites do cabo de energia e demais componentes. Liga-mentos e desligamentos repetitivos não devem danificar o equipamento. Além disso, a subtensão também não deve causar danos à fonte ou acionar o fusível. No caso de falhas em quaisquer componentes, não devem ocorrer chamas, fumaça excessiva, ruído alarmante, fundição de condutores, carbonização da PCB ou derretimento de material (Intel Corporation, 2000).

2.5.2 Requisitos da Saída

A Tabela 2.3 apresenta os requisitos para as tensões de saída da fonte, com a variação máxima aceitável em relação ao valor nominal. Essas variações devem ser mantidas durante toda a operação e em todas as condições ambientais previstas pelo padrão ATX. Nenhuma das saídas deve exceder 240 VA sob nenhuma condição, incluindo falha em único componente. Na carga máxima, a eficiência mínima deve ser de 68% (Intel Corporation, 2000).

Tensão de Ondulação e Ruído são definidos como sinais periódicos ou aleatórios em uma faixa de frequências de 10Hz a 20MHz. A Tabela 2.4 cita os níveis de pico a pico aceitáveis para cada saída (Intel Corporation, 2000).

Tabela 2.3: Requisitos de Tensão na Saída CC

Saída	Variação	Min.	Nom.	Máx.	Unidade
+12VDC	5%	+11,40	+12,00	+12,60	Volts
+5VDC	5%	+4,75	+5,00	+5,25	Volts
+3,3VDC	5%	+3,14	+3,30	+3,47	Volts
-5VDC	10%	-4,50	-5,00	-5,50	Volts
-12VDC	10%	-10,80	-12,00	-13,20	Volts
+5VSB	5%	+4,75	+5,00	+5,25	Volts

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

Tabela 2.4: Tensão de Oscilação e Ruído na Saída CC

Saída	Oscilação e Ruído Máximo (mV_{pp})
+12VDC	120
+5VDC	50
+3,3VDC	50
-5VDC	100
-12VDC	120
+5VSB	50

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

O *overshoot* de tensão no momento de ligamento ou desligamento por meio do sinal PS_ON, conexão ou desconexão da tomada CA deve ser de menos de 10% da tensão de saída nominal. Não deve surgir nenhuma tensão de polaridade oposta em nenhuma das saídas nesses momentos (Intel Corporation, 2000).

2.5.3 Resposta ao Transiente

A saída da fonte deve obedecer aos padrões de regulação e manter-se estável quando submetida a transientes na carga aplicada. Os limites relativos à resposta ao degrau na carga aplicada constam na Tabela 2.5, estabelecendo o tamanho máximo admitido do degrau de corrente por segundo. Esses limites devem ser respeitados mesmo durante a transição simultânea de cargas com degraus no mesmo sentido nas saídas de +12V_{DC}, +5V_{DC} e +3,3V_{DC}, com taxa de transição entre 50Hz e 10kHz e requisitos de entrada como expostos previamente. A fonte também deve

Tabela 2.5: Amplitude da Resposta ao Degrau na Carga

Saída	Degrau Máximo (% da corrente especificada por segundo)	Degrau Máximo (A)
+12 VDC	50%	—
+5 VDC	30%	—
+3,3 VDC	30%	—
-5 VDC	—	0,1 A
-12 VDC	—	0,1 A
+5 VSB	—	0,1 A

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

Tabela 2.6: Carga Capacitiva na Saída

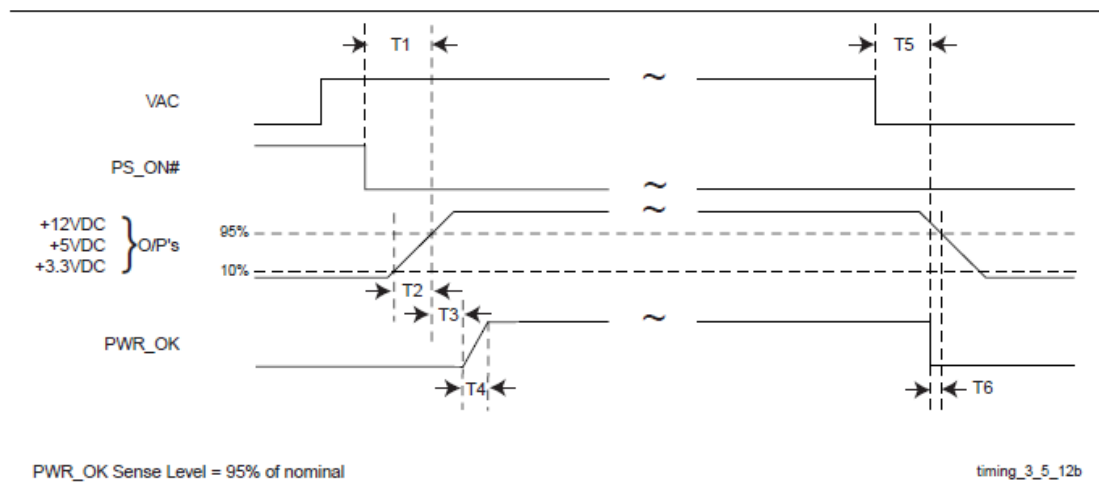
Saída	ATX Carga Capacitiva (μF)	ATX12V Carga Capacitiva (μF)
+12 VDC	1.000	20.000
+5 VDC	10.000	10.000
+3,3 VDC	6.000	6.000
-5 VDC	350	350
-12 VDC	350	350
+5 VSB	350	350

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

ser capaz de operar normalmente com as cargas capacitivas indicadas na Tabela 2.6 simultaneamente presentes em cada uma das saídas (Intel Corporation, 2000).

É recomendada uma margem de segurança mínima de 45 graus para fase e 10 dB para ganho tanto nas cargas máximas quanto nas mínimas (Intel Corporation, 2000).

A fonte de alimentação deve manter a regulação de saída mesmo com a perda de energia de entrada na faixa nominal mínima, 115 V_{AC}/57 Hz ou 230 V_{AC}/47 Hz, na carga máxima contínua de saída, por um mínimo de 17 ms. A Figura 2.3 mostra os níveis de energia após perda repentina da alimentação. O sinal PWR_OK indica com um nível alto que a fonte está operando acima dos níveis de subtensão e com energia armazenada suficiente para se manter ativa pelo tempo recomendado, após desconexão da rede elétrica. O sinal PS_ON habilita as saídas da fonte, com exceção da +5V_{SB} que deve estar sempre ativa. Ambos os sinais são compatíveis com níveis lógicos TTL (Intel Corporation, 2000).

Figura 2.3: Temporização da Fonte Após Perda de Alimentação.

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

Tabela 2.7: Temporização da Fonte Após Perda de Alimentação

Descrição	Condição
Atraso no PWR_OK	$100 \text{ ms} < T_3 < 500 \text{ ms}$
Tempo de Subida do PWR_OK	$T_4 \leq 10 \text{ ms}$
Desativação do PWR_OK após desligamento AC	$T_5 \geq 16 \text{ ms}$
Desligamento da Saída	$T_6 \geq 1 \text{ ms}$

Fonte: (Intel Corporation, 2000).

2.6 Comunicação Serial Assíncrona

A comunicação entre dispositivos é chamada de serial quando o envio dos códigos é realizado por uma via única, com um único fio de dados. Desta forma, os *bits* de informação precisam ser enviados um a um, em série. Esse tipo de comunicação é amplamente utilizado por sua simplicidade e compatibilidade com microcontroladores. Existem vários exemplos de comunicação serial, como RS232, UART e USB. O padrão USB ainda define uma série de outros protocolos lógicos e padrões, conferindo várias aplicações para ele (EPUSP - PCS 2011 - Laboratório Digital, 2011).

Quando esta comunicação não exige um sinal de sincronismo entre os relógios do transmissor e receptor, ela é dita ser assíncrona. Neste caso, o sinal de relógio no receptor é sincronizado a cada *bit* de *start* (EPUSP - PCS 2011 - Laboratório Digital, 2011).

Dispositivos diferentes de fabricantes distintos precisam se comunicar para permi-

tir o funcionamento dos mais diversos sistemas presentes em indústrias e residências. Para que isto seja possível, existem normas de padronização, como as normas EIA (*Electronic Industries Alliance*), que visam eliminar possíveis discrepâncias na interligação dos equipamentos e auxiliar o usuário na escolha e instalação destes (EPUSP - PCS 2011 - Laboratório Digital, 2011).

Um exemplo são os UART - *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, que são dispositivos responsáveis pela comunicação de dados em um meio serial. Eles convertem da forma paralela para serial e vice-versa, controlando o sequenciamento das informações a trafegar pelo meio. São muito usados com o padrão físico RS232 (EPUSP - PCS 2011 - Laboratório Digital, 2011).

O USB - *Universal Serial Bus* é um padrão da indústria que define cabos, portas e protocolos de comunicação para conexão entre um dispositivo e seus periféricos. É gerido pelo *USB Implementers Forum*, composto por várias organizações que contribuem para seu desenvolvimento e implementação. Entre as características do padrão, estão a capacidade de fornecer energia para alimentar dispositivos, carregar suas baterias e a funcionalidade *plug and play*. Os dados trafegam por dois barramentos: D+ e D-, que são entrelaçados (BasuMallick, 2023).

2.7 Fontes de Bancada

Na indústria, laboratórios de manutenção, pesquisa, e outros, costumeiramente existe a necessidade de se empregar uma fonte de tensão ou corrente regulada com valores não comerciais. Neste contexto, fontes de bancada reguladas e ajustáveis são muito empregadas, onde os parâmetros da saída são definidos em uma interface com potenciômetros e botões. Em alguns casos, como testes automatizados, os valores da saída precisam estar constantemente sendo alterados linearmente ou em degraus espaçados no tempo e realizar esta tarefa manualmente pode ser contraproducente ou mesmo impossível. Por isso, existem fontes programáveis, com controle externo, via RS232 ou USB para conexão a um computador onde será implementada uma rotina de configurações a serem executadas de acordo com a necessidade do usuário. Estes

equipamentos, no entanto, costumam ser caros e difíceis de se encontrar no mercado nacional. Exemplos de aplicações são testes de circuitos integrados, desenvolvimento de protótipos e validação de componentes (Gontean et al., 2009).

2.8 Potenciômetros Digitais

Potenciômetros analógicos são componentes eletrônicos utilizados para ajustar a resistência elétrica em um circuito, permitindo controlar a tensão ou corrente em uma determinada aplicação. Eles consistem em um resistor com uma pista condutora e um cursor móvel, que se desloca ao girar o eixo do potenciômetro, variando a resistência de forma contínua (Instituto Newton C. Braga, 2023).

Os potenciômetros digitais são dispositivos eletrônicos que substituem os potenciômetros mecânicos tradicionais, permitindo o ajuste de resistência de forma eletronicamente controlada. Eles são amplamente utilizados em aplicações que demandam ajustes precisos e repetitivos, além de serem ideais para sistemas automatizados, onde o controle manual é inviável ou inconveniente (Instituto Newton C. Braga, 2023).

São circuitos integrados que incorporam uma rede de resistores internos conectados a uma série de chaves controladas eletronicamente, permitindo selecionar diferentes pontos da rede resistiva e, conseqüentemente, alterando o valor da resistência entre o cursor e os terminais fixos. O controle é realizado através de sinais digitais, normalmente por meio de interfaces como i²c, SPI ou sinais de incremento/decremento (*Up/Down*) (Instituto Newton C. Braga, 2023).

A escolha do dispositivo envolve algumas características de operação, como:

- Resistência Total: valor total da resistência entre os terminais extremos do dispositivo;
- Resolução: determinada pelo número de passos ou incrementos de resistência que o potenciômetro pode realizar, geralmente especificado em *bits*. Por exemplo, um potenciômetro de 8 *bits* possui 256 passos;

- Tensão e Corrente Máximas: limites que podem ser aplicados ao dispositivo sem causar danos;
- Estabilidade Térmica: desempenho do dispositivo em diferentes temperaturas.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

MODIFICAÇÕES em circuitos preexistentes demandam uma análise cuidadosa para garantir que, acima de tudo, nada seja danificado ou principalmente, ofereça risco ao operador do equipamento. Desta forma, o primeiro passo é entender o circuito da fonte ATX que se pretende alterar.

A metodologia foi dividida nas seguintes etapas:

- Análise do funcionamento da fonte ATX;
- Coleta de requisitos;
- Modificação do circuito de controle de tensão;
- Produção da placa de circuito impresso;
- Programação do microcontrolador;
- Testes de desempenho.

Foram necessários alguns equipamentos voltados à produção da placa de circuito impresso, análise do circuito e testes, bem como os componentes para realização das modificações como microcontrolador, potenciômetro digital e outros componentes diversos, como resistores.

3.1 Análise do Funcionamento da Fonte ATX

A primeira etapa foi o estudo detalhado do funcionamento da fonte ATX. Foi realizada uma análise do circuito interno da fonte para identificar a topologia do conversor CC-CC, o circuito regulador de tensão e o controlador PWM. Com estas informações, procurou-se na internet um esquema elétrico que pudesse ser usado como base para uma análise mais profunda. Por meio da comparação com o circuito real, as diferenças foram incorporadas ao esquema, gerando uma nova representação esquemática.

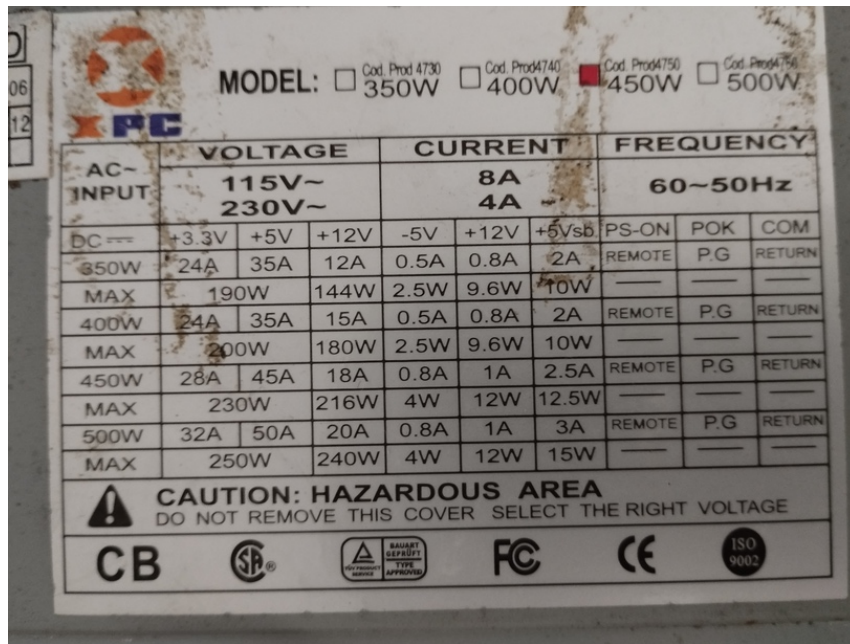
Buscou-se localizar a realimentação da saída de 12V, responsável pela regulação da tensão. Este ponto foi escolhido para a modificação por interferir diretamente no controle da tensão de saída. Neste processo, também foram observadas as tolerâncias dos componentes à potência dissipada e à tensão elétrica.

3.2 Coleta de Requisitos

Sabendo as possibilidades que o equipamento provê, por meio de suas especificações impressas no gabinete (Figura 3.1), foram estabelecidos os requisitos necessários para o projeto. Optou-se por limitar a saída de tensão a 15V, por satisfazer a maior parte das situações enfrentadas na bancada de eletrônica e para que não fosse necessário modificar os capacitores de saída. São eles:

- Tensão Mínima de Saída: 3V;
- Tensão Máxima de Saída: 15V;
- Corrente Máxima de Saída: 5A;
- Potência Máxima de Saída: 75W;
- Controle Manual;
- Controle via Comunicação Serial;

Figura 3.1: Especificações da Fonte ATX.



MODEL: ☐ Cod. Prod 4730 350W ☐ Cod. Prod 4740 400W ☒ Cod. Prod 4750 450W ☐ Cod. Prod 4760 500W

AC~ INPUT	VOLTAGE			CURRENT			FREQUENCY		
	115V~ 230V~			8A 4A			60~50Hz		
DC	+3.3V	+5V	+12V	-5V	+12V	+5Vsb	PS-ON	POK	COM
350W	24A	35A	12A	0.5A	0.8A	2A	REMOTE	P.G	RETURN
MAX	190W		144W	2.5W	9.6W	10W	—	—	—
400W	24A	35A	15A	0.5A	0.8A	2A	REMOTE	P.G	RETURN
MAX	200W		180W	2.5W	9.6W	10W	—	—	—
450W	28A	45A	18A	0.8A	1A	2.5A	REMOTE	P.G	RETURN
MAX	230W		216W	4W	12W	12.5W	—	—	—
500W	32A	50A	20A	0.8A	1A	3A	REMOTE	P.G	RETURN
MAX	250W		240W	4W	12W	15W	—	—	—

CAUTION: HAZARDOUS AREA
DO NOT REMOVE THIS COVER SELECT THE RIGHT VOLTAGE

CB     

Fonte: Autor.

- Proteção Contra Curto Circuito;
- Proteção Contra Sobrecorrente;
- Funcionamento Bivolt por Chave Seletora.

3.3 Modificação do Circuito

Buscou-se primeiro verificar a validade das modificações a serem realizadas por meio da substituição de alguns componentes por outros de valor diferente para observar o impacto causado. Feito isso, a próxima etapa foi aplicar uma resistência ajustável digitalmente.

O controle da realimentação foi realizado com um potenciômetro digital e um microcontrolador com comunicação serial. Antes de implementar o potenciômetro digital, no entanto, ele foi substituído por um mecânico, analógico, para certificar-se de que as demais modificações no circuito funcionaram bem.

Os microcontroladores mais populares normalmente possuem mais GPIOs do que o necessário, como foi o caso. Isto permitiu deixar alguns pinos disponíveis para

posterior adição de *displays*, outro tipo de comunicação ou módulos. O dispositivo escolhido foi um ESP32-WROOM32 pela sua disponibilidade e funções adicionais como WiFi e Bluetooth, que permitem uma expansão das possibilidades de controle da fonte no futuro. Para permitir ajuste manual, um destes GPIOs foi designado como sinal de controle. Mais especificamente, o pino com conversor analógico para digital (ADC), em que foi conectado um potenciômetro para seleção da tensão de saída de forma mecânica, sem necessidade de outro dispositivo para configuração, como é o caso da comunicação serial. Tudo isto foi montado primeiramente em *protoboard* e somente depois do funcionamento verificado, foi transferido para placa de circuito impresso (PCB) (Salmony, 2024).

3.4 Produção da Placa de Circuito Impresso

Existem vários métodos para produção de PCBs, além da opção de encomendá-las em empresas especializadas, que normalmente fazem a partir de 5 unidades e podem, inclusive, entregá-las já com os componentes montados a um custo e prazo razoáveis. No entanto, como a forma mais popular e difundida de manufatura por entusiastas da eletrônica é através da impressão térmica, esta foi a utilizada. O procedimento realizado consistiu no seguinte passo a passo:

1. Projeto do *layout* da placa no CAD Altium Designer;
2. Impressão com impressora a laser em papel fotográfico;
3. Limpeza da oxidação no cobre na placa virgem, por meio de abrasão;
4. Transferência térmica da impressão no papel fotográfico para a placa;
5. Furação dos furos de referência para alinhamento dos dois lados da placa;
6. Transferência da outra face da placa;
7. Corrosão em percloroeto de ferro;
8. Remoção do toner;

9. Furação das demais ilhas e vias.

Com o cuidado de remediar curtos-circuitos ou descontinuidades provenientes do processo de produção, a PCB foi então montada e testada com inserção de sinais apenas para garantir a conformidade do projeto.

3.5 Programação do Microcontrolador

Para se implementar a comunicação serial e ajuste automático da tensão de saída, foi necessário implementar um programa para o microcontrolador a ser usado. O programa foi escrito no editor Visual Studio Code, juntamente com a extensão do ESP-IDF, que reúne os *toolkits* oficiais do fabricante e algumas bibliotecas que permitem desenvolver o *firmware* de forma mais rápida e fácil.

3.6 Testes de Desempenho

Após as modificações, foram realizados testes para avaliar o desempenho da fonte modificada. Os seguintes parâmetros foram analisados:

- Regulação da Tensão de Saída: a fonte foi submetida à uma entrada AC variável, dentro dos limites estabelecidos na Tabela 2.2. As tensões de entrada e saída foram medidas para estudar a regulação mediante diferentes condições de entrada. A estabilidade também foi verificada sob diferentes condições de carga;
- Faixa de Tensão Ajustável: mediu-se a faixa de tensão alcançável pela fonte após a modificação;
- Tensão de Oscilação e Ruído: a oscilação e ruído na saída foram medidos usando um osciloscópio para determinar a qualidade da tensão fornecida;
- Proteção Contra Curto Circuito: foi testada a capacidade da fonte em resistir a um curto circuito.

3.7 Análise de Viabilidade

Para avaliar a viabilidade da modificação, foram considerados os seguintes aspectos:

- Complexidade Técnica: o nível de habilidade necessário para replicar o procedimento foi analisado, incluindo as etapas de soldagem, configuração do microcontrolador e integração dos componentes;
- Custo Total: foi calculado o custo total da modificação, incluindo os componentes principais (potenciômetro digital, microcontrolador e resistores adicionais). Este custo foi comparado com o de fontes ajustáveis disponíveis comercialmente;
- Sustentabilidade: foi avaliado o impacto ambiental positivo da modificação, destacando a reutilização de fontes ATX obsoletas que, de outra forma, seriam descartadas como lixo eletrônico.

3.8 Equipamentos e Materiais Utilizados

Os componentes utilizados para a modificação foram:

- Capacitor cerâmico 0.1 μ F 50V;
- Potenciômetro;
- Resistores diversos;
- Microcontrolador ESP32 (placa de desenvolvimento);
- Circuito integrado X9C104P;
- Conectores KK;
- Cabos;
- Placa de fibra FR4 dupla face 10x10cm.

Além dos componentes necessários ao circuito, alguns equipamentos foram necessários para o projeto, manufatura e testes. Foram estes:

- *Protoboard*;
- Multímetro;
- Osciloscópio (Figura 3.2);
- Computador com os *softwares* Altium Designer e VS Code com ESP-IDF;
- Impressora a *laser*;
- Prensa térmica (Figura 3.3);
- Micro retífica com suporte e respectivas brocas;
- Ferro de Solda;
- Furadeira;
- Reostato de 500W (Figura 3.4).

Figura 3.2: Osciloscópio Digital.



Fonte: Autor.

Figura 3.3: Prensa Térmica.



Fonte: Autor.

Figura 3.4: Reostato de 500W.



Fonte: Autor.

Destes itens, alguns não foram necessários para a produção da fonte, tendo seu uso restrito à análise de desempenho ou à facilitação da detecção de problemas no circuito. O reostato utilizado, apesar de ser de 500W, estava com um fusível de 6A, o que limitou a corrente de carga passível de ser aplicada nos testes.

Capítulo 4

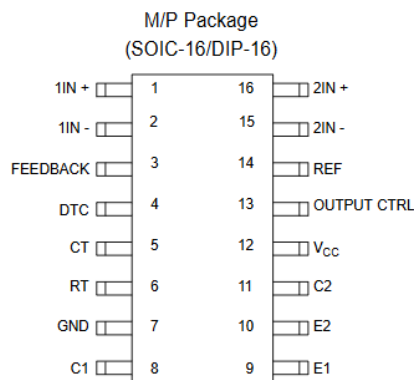
Desenvolvimento

ANTES de se realizar qualquer ação, é necessário coletar os requisitos do projeto e as características do material disponível. Eles foram devidamente definidos e estão listados na Seção 3.2. A fonte modificada é do tipo ATX na versão antiga, onde ainda constava a saída de -5V, bivolt, por meio de chave seletora da tensão de entrada. Uma versão mais antiga e que encontrava-se sem uso.

4.1 Sistema Proposto

A fonte ATX serve de base para o sistema final, ao qual deve possuir uma tensão de saída ajustável, mantendo a regulação com o desempenho próximo ao original. Para tanto, o circuito de realimentação de tensão do sistema de controle deve ser alterado, permitindo seu ajuste para atingir o nível de interesse. Tal circuito é parecido entre as diferentes fontes disponíveis no mercado, mudando poucas coisas. Dentre elas, o próprio controlador utilizado, que no caso deste trabalho, é o AZ7500B, visto na Figura 4.1; também compatível com o TL494. Este controlador integra dois amplificadores de erro com pino de realimentação, ajuste de frequência, PWM, controle de tempo morto e tensão de referência. Para atender o objetivo deste trabalho, somente é necessário ajustar a entrada do amplificador de erro.

A alteração no controle, que pode ser feita de forma manual, puramente analógica, inclui componentes eletrônicos digitais. Assim, é possível selecionar a tensão de saída

Figura 4.1: AZ7500B.

Fonte: (BCD Semiconductor Manufacturing Limited, 2006).

por meio de um microcontrolador, que receberá comandos via comunicação serial ou via um periférico, como é o caso do potenciômetro.

O circuito desenvolvido para o controle e conexão com o microcontrolador deve ser montado em placa de circuito impresso, de forma a poder ser fixado em alguma parte que seja conveniente de acordo com as pretensões do projetista em adicionar funcionalidades extras como *display* LCD, entre outras. No presente caso, foi instalado na parte superior do gabinete, para conferir robustez mecânica e elétrica, visto que a ação de conectar e desconectar o USB ao módulo, pode, com o tempo, causar danos às conexões e cabos. Ao mesmo tempo, facilita o projeto, visto que o espaço interno da fonte é limitado e deve-se observar o distanciamento de segurança entre as conexões elétricas da saída e entrada AC do equipamento, evitando risco de choque elétrico e de ruído eletromagnético.

4.2 Implementação

O primeiro passo foi a análise do circuito para entender as possibilidades e alterações necessárias. Como a topologia das fontes ATX costuma ser parecida, com variações, foi possível obter esquemas elétricos online e compará-los com a realidade. O controlador da fonte utilizada foi o AZ7500B. Com base nisto, e com a análise preliminar do circuito por meio de componentes e saídas presentes, foi possível encontrar o esquema elétrico mostrado na Figura 4.2. Tal achado, apesar de ter a

mesma topologia e controlador, possui algumas diferenças pontuais, que foram desvendadas por meio de análise mais minuciosa. O resultado, após conferência, está exposto na Figura 4.3. As conexões destacadas em amarelo foram devidamente verificadas, enquanto as demais não passaram por conferência prévia. A decisão de não inspecionar essas conexões antes dos testes se deve ao fato de que o circuito correspondente, a princípio, não apresentava influência relevante no funcionamento esperado do sistema e não estava sujeito a modificações. Somente após a execução dos testes foi possível confirmar que sua presença não impactava o desempenho geral, validando assim a premissa inicial.

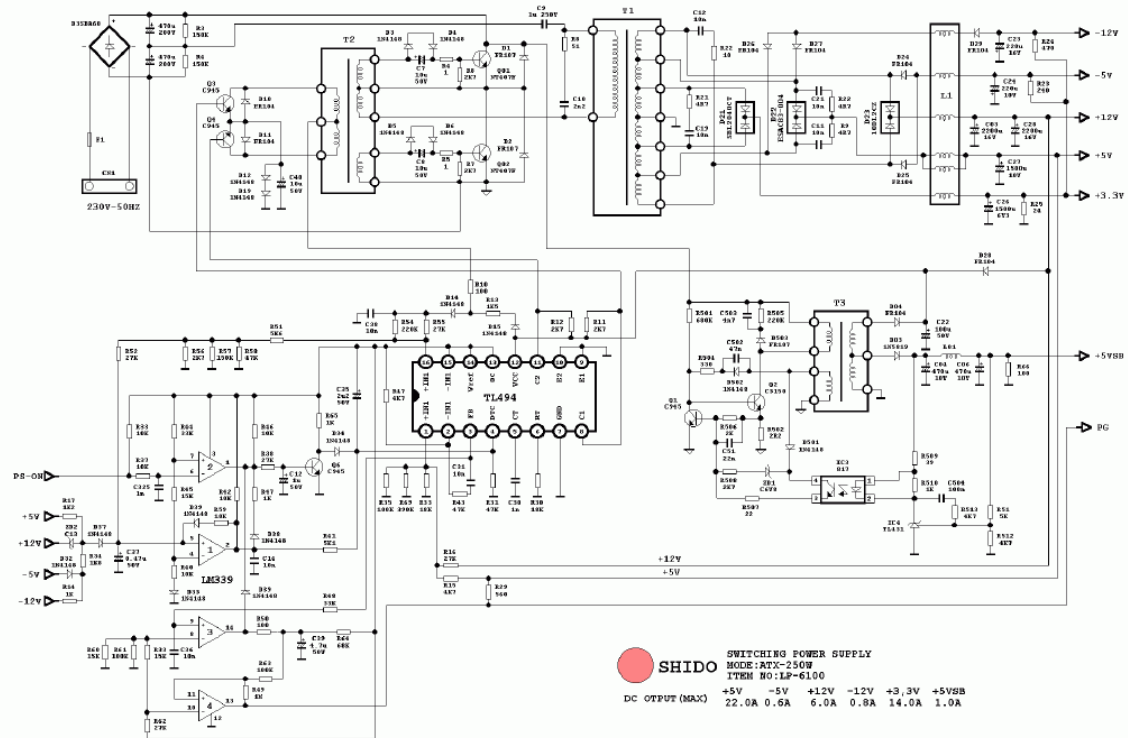
O estágio inicial simplificado do controlador é formado pelo amplificador de erro da Figura 4.4. Quando a tensão de saída excede a tensão de referência por meio do divisor de tensão, o controlador diminui a largura do pulso no PWM (*Pulse Width Modulator*), diminuindo a tensão efetiva aplicada ao transformador e acarretando a consequente diminuição na tensão de saída. Quando o contrário ocorre, ele aumenta a largura de pulso, elevando a tensão de saída. Desta forma, ao atingir o equilíbrio, a saída se mantém estável. Sabendo disso, o objeto central na implementação do sistema proposto foi o amplificador de erro.

4.2.1 Modificações no Circuito

A primeira modificação e teste, foi no circuito de realimentação do controlador, conectado ao amplificador de erro. Como a Figura 4.3 mostra, há duas realimentações das tensões de saída, uma para a saída de $+5V_{DC}$ e outra para a saída de $+12V_{DC}$. Como a saída de $+5V_{DC}$ não é usada neste projeto, o resistor de realimentação R15 foi retirado. Na saída de $+12V_{DC}$, o resistor de feedback R16 (R_{fb}), originalmente de $27k\Omega$, foi substituído por outros para analisar a relação com a tensão de saída. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 4.1 que indica tensão na saída $+12V_{DC}$. Nota-se que ao remover a realimentação da saída de $+5V_{DC}$, a tensão se eleva para além da original do circuito.

Ao plotar o gráfico da Figura 4.5, é possível encontrar um ajuste linear com

Figura 4.2: Esquema Elétrico Disponível na Internet.

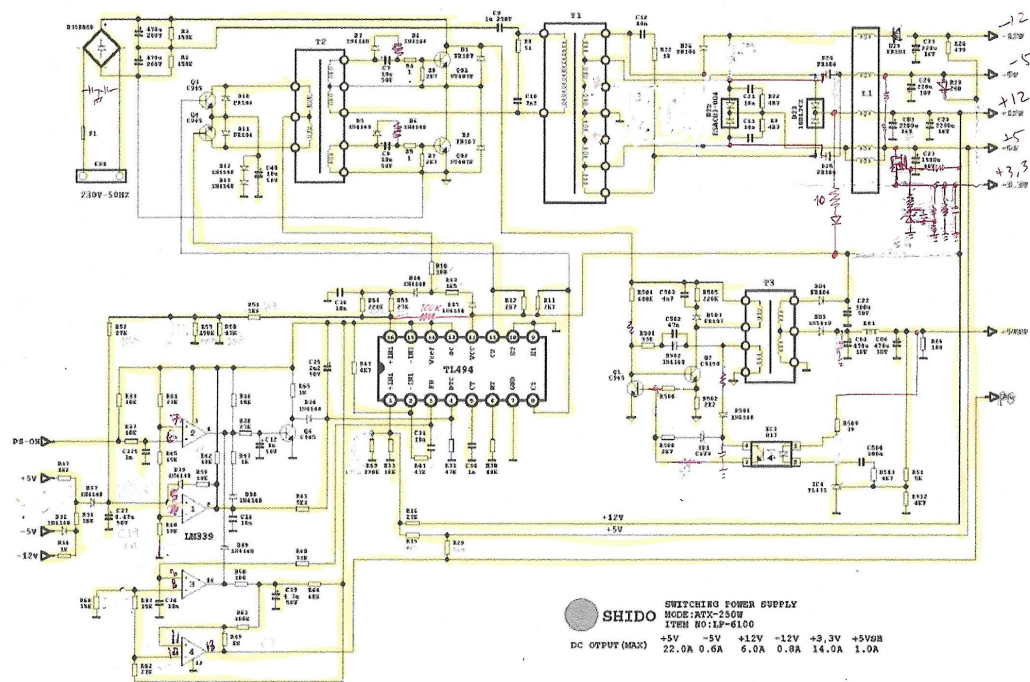


Fonte: (Dan, 2014).

Figura 4.3: Esquema Elétrico Conferido.

03/11/2024, 00:59

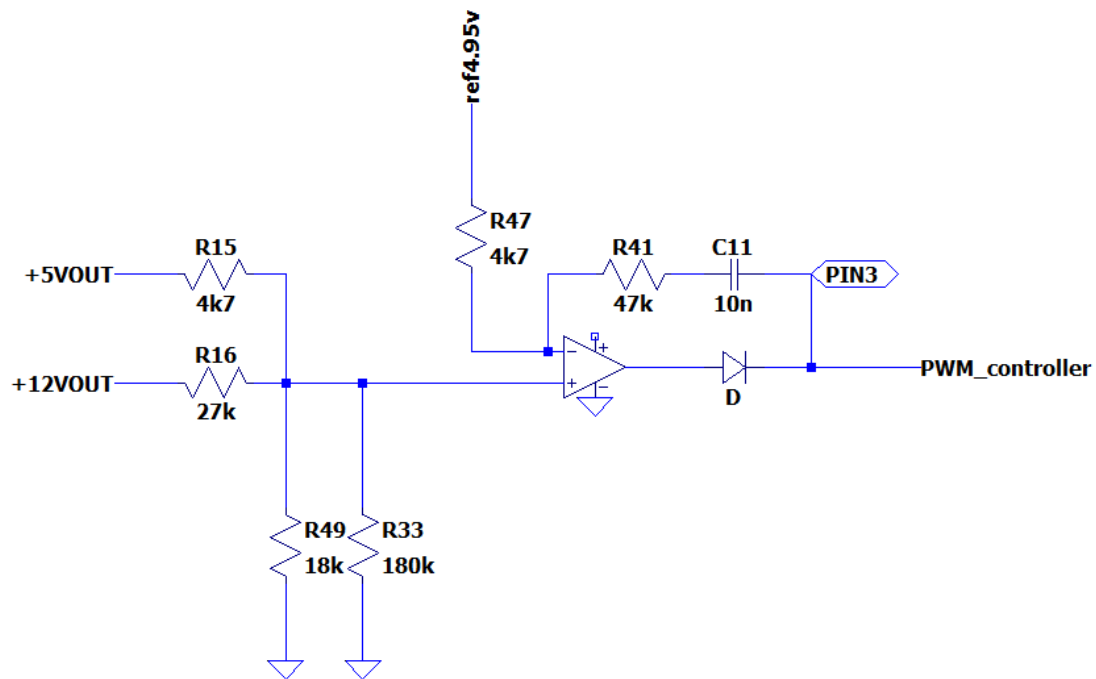
s_atx01b.png (1012x674)



https://danyk.cz/s_atx01b.png

1/1

Fonte: Autor.

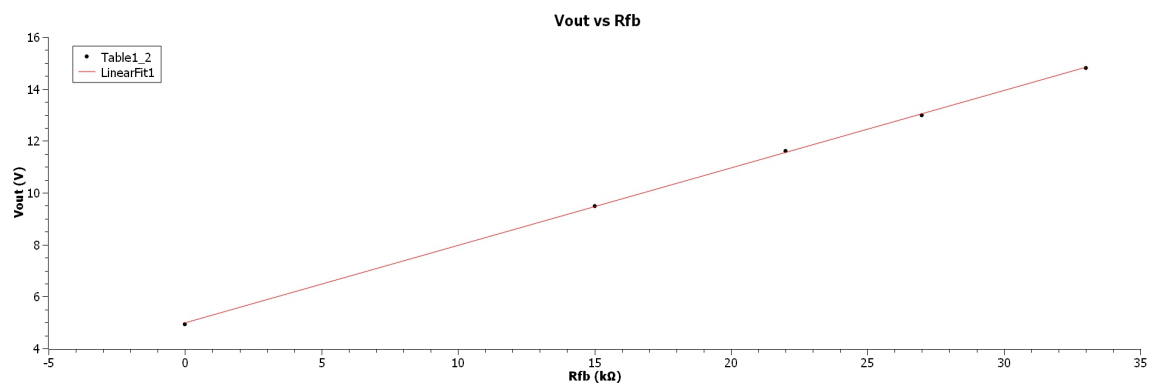
Figura 4.4: Amplificador de Erro.

Fonte: Autor.

função

$$V_{out} = (0,299 \pm 0,002) \times R_{fb} + (4,969 \pm 0,053) \quad (4.1)$$

Após os testes com resistores fixos, testou-se também um potenciômetro analógico de 100kΩ. Ao variar o potenciômetro, foi possível constatar o correto funcionamento do controle, ajustando para tensões variadas. Como o potenciômetro possuía uma resistência muito maior que a do resistor original, foi preciso tomar cuidado para não

Figura 4.5: Tensão de Saída (V) vs Resistor de Feedback (kΩ).

Fonte: Autor.

Tabela 4.1: Resposta à Variação da Resistência de Feedback

Resistor ($k\Omega$)	Tensão de Saída (V)
0	4,94
15	9,48
22	11,62
27	12,98
33	14,82

Fonte: Autor.

exceder demasiadamente a tensão além dos 12V originais, visto que os capacitores presentes na fonte tinham uma tensão máxima de 16V na saída +12VDC. Para obter tensões maiores, seria necessário substituí-los. No entanto, não foi preciso devido aos requisitos do projeto. Com esta modificação opcional, poderia-se aumentar a tensão até um nível que depende da tensão de saída do transformador e da largura de pulso máxima do controlador, que é especificada no *datasheet*, mas pode variar entre dispositivos, dentro de uma faixa também especificada.

A tensão mínima que se pôde atingir no teste foi próxima à tensão de referência $V_{ref} = 4,95V$ fornecida pelo AZ7500B, segundo o *datasheet* [2]. Para atingir tensões menores, a tensão de referência foi reduzida por meio de um divisor de tensão resistivo, com a inserção de um resistor $R_{div} = 390\Omega$ da entrada inversora do amplificador de erro no controlador ao terra (Figura 4.6), passando a compor o circuito da Figura 4.7 e dando origem a uma nova tensão de referência V_{ref_2} . Desta forma, a tensão de referência passa a ser

$$V_{ref_2} = V_{ref} \times \frac{R_{47}}{R_{div} + R_{47}} = 4,95 \times \frac{390}{4700 + 390} = 0,379V \quad (4.2)$$

Como foi possível confirmar a possibilidade de ajustes na tensão por meio do uso de um potenciômetro sem maiores problemas, o potenciômetro analógico foi então, substituído pelo digital, de mesma resistência.

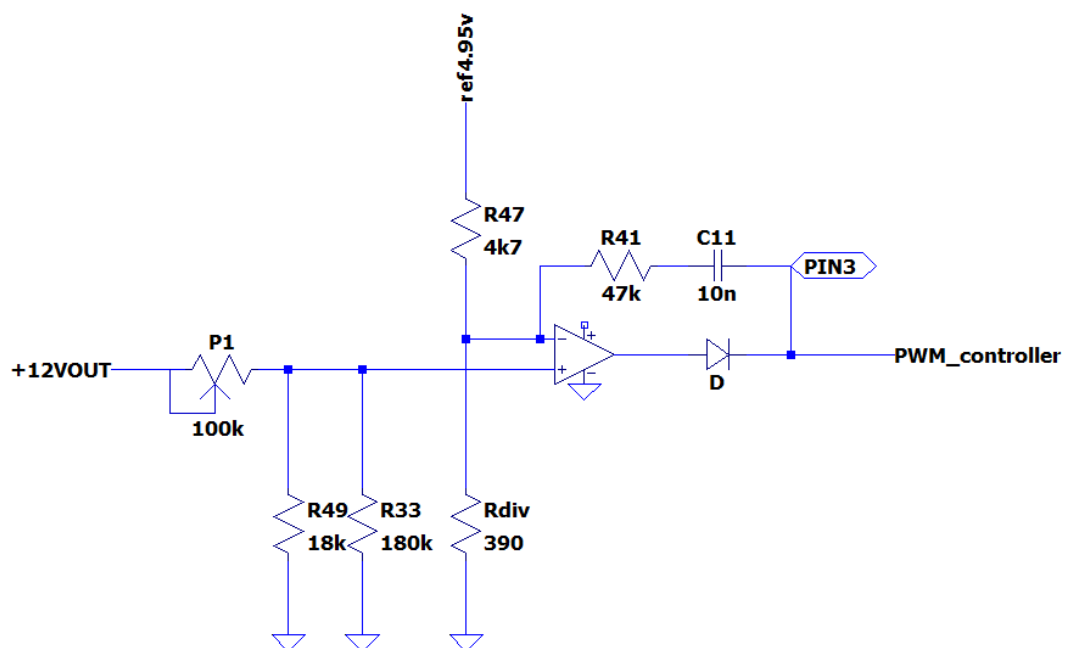
O dispositivo escolhido foi o X9C104P da Figura 4.8, que é um potenciômetro digital de $100k\Omega$ com cadeia resistiva de 99 elementos com $1k\Omega$ cada e tensão de operação de 5V. Possui 8 pinos onde 3 deles são responsáveis pela comunicação, sendo os pinos de incremento (1), Direção do Movimento do Cursor (2) e Seleção do

Figura 4.6: Resistor Divisor da Tensão de Referência.

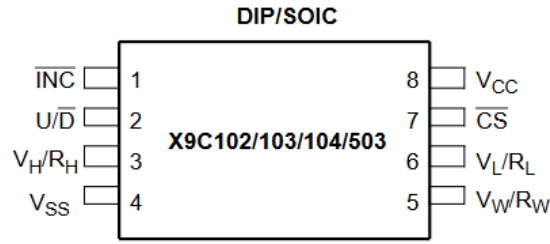


Fonte: Autor.

Figura 4.7: Circuito com Divisor de Vref.



Fonte: Autor.

Figura 4.8: Pinos do X9C104P.

Fonte: (Intersil Americas Inc., 2005).

Chip (7). Segundo o *datasheet* do CI, a tensão limite suportada por ele em qualquer um de seus pinos é de $V_{max} = \pm 5V$. Devido a esta característica, foi necessário implementar mais um divisor de tensão para limitá-la e atender a faixa de operação do dispositivo (Intersil Americas Inc., 2005).

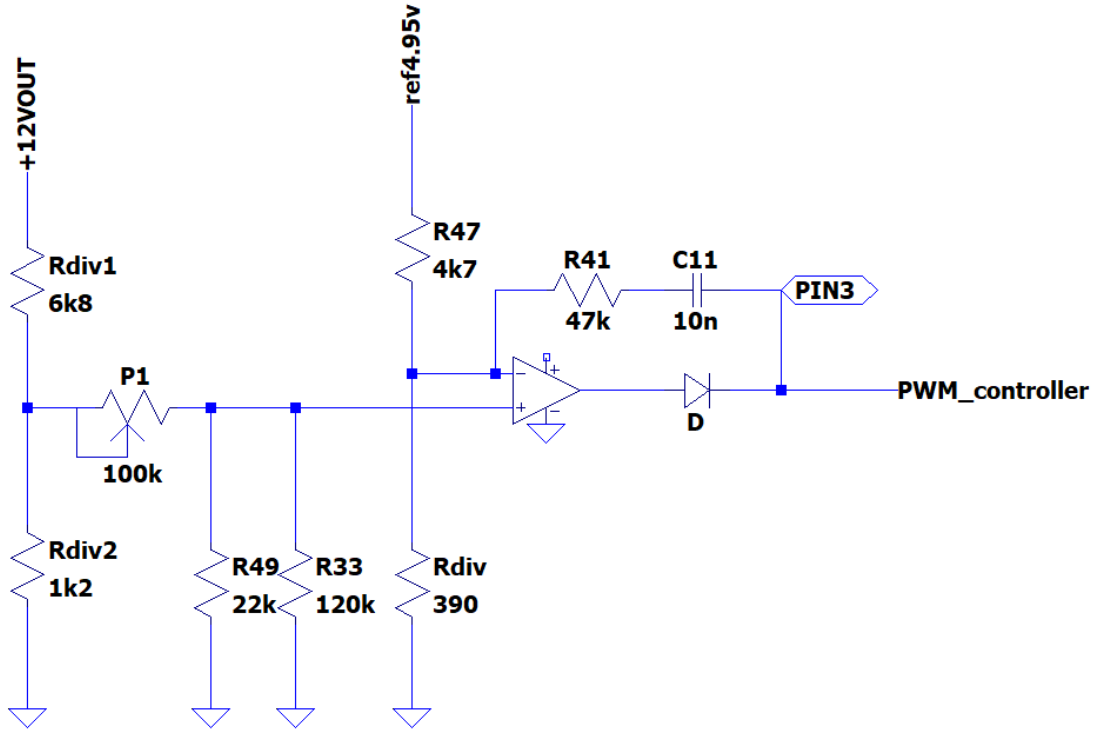
Sabendo que a saída do transformador pode chegar a $V_{N_2} = 30V$, conforme medido com o osciloscópio, considerou-se esta tensão para calcular os valores dos componentes. Neste caso, não se utilizou um valor maior como segurança, devido a atenuação, filtragem, que os outros componentes oferecem e pela própria característica do circuito. Os resistores R_{div1} e R_{div2} a serem utilizados no divisor de tensão foram escolhidos a partir da relação necessária para se obter a atenuação desejada:

$$V_{max} = V_{N_2} \times \frac{R_{div2}}{R_{div1} + R_{div2}} \Rightarrow 5 = 30 \times \frac{R_{div2}}{R_{div1} + R_{div2}} \Rightarrow \frac{R_{div1}}{R_{div2}} = \frac{25}{5} \quad (4.3)$$

Para atender os valores comerciais dos componentes, os resistores escolhidos foram $R_{div1} = 6,8k\Omega$ e $R_{div2} = 1,2k\Omega$, que se aproximam da relação calculada.

A alteração da tensão de referência causou uma mudança na curva de resposta da fonte, de forma que, para atender o intervalo de tensões desejado, as resistências em paralelo R_{49} e R_{33} , vistas na Figura 4.7, que em conjunto com o potenciômetro formam o divisor de tensão, também precisaram ser substituídas por resistores de $22k\Omega$ e $120k\Omega$. A resistência total da associação em paralelo pode ser obtida pela Equação 4.4. Desta forma, o circuito resultante é o exposto na Figura 4.9, com

Figura 4.9: Circuito Resultante.



Fonte: Autor.

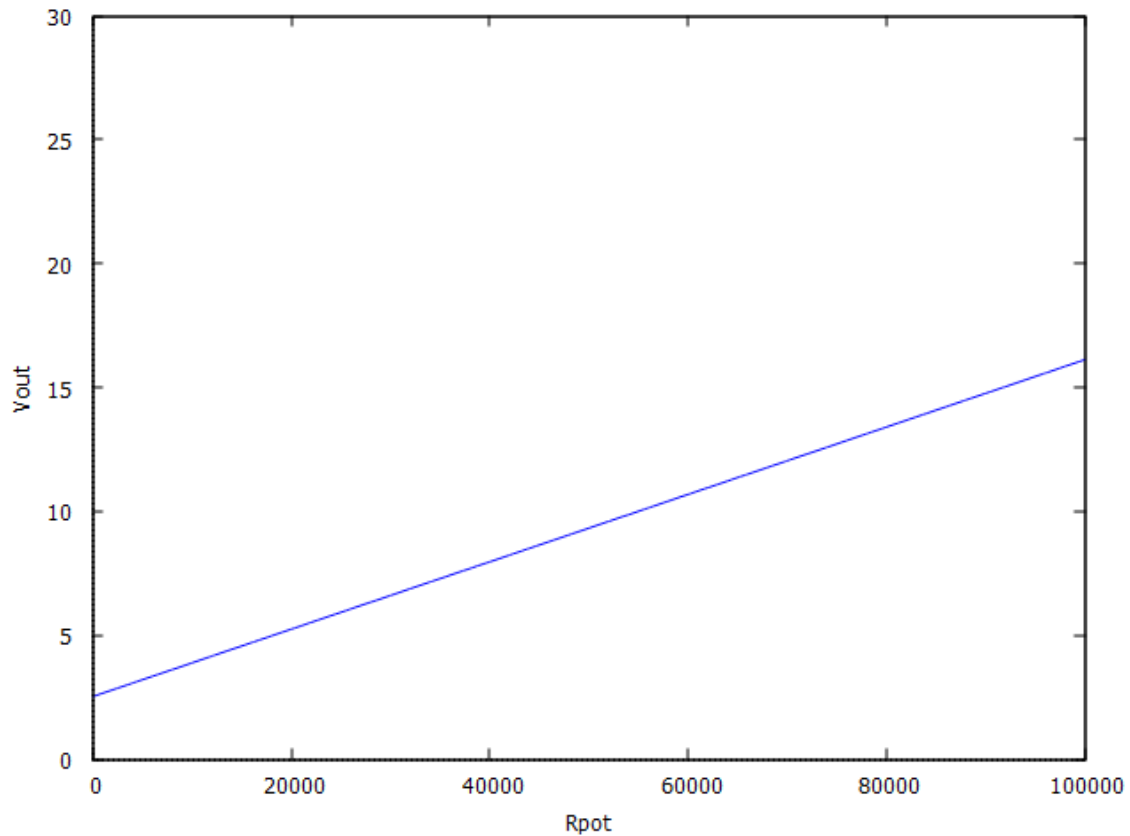
curva mostrada na Figura 4.10 e dada, com os valores das resistências em $k\Omega$, pela Equação 4.5.

$$R_{49} // R_{33} = \frac{22 \times 120}{22 + 120} = 18,59k\Omega \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} V_{ref2} &= V_{out} \times \frac{R_{div2}}{R_{div1} + R_{div2}} \times \frac{18,59}{R_{pot} + 18,59} \Rightarrow \\ 0,379 &= V_{out} \times \frac{1,2}{6,8 + 1,2} \times \frac{18,59}{R_{pot} + 18,59} \Rightarrow \\ V_{out} &= 0,136 \times R_{pot} + 2,53 \quad (4.5) \end{aligned}$$

Para a montagem do circuito em teste, os resistores discutidos foram removidos da placa original e cabos soldados em seus lugares, levando o sinal para uma *protoboard* onde o circuito foi inicialmente montado. Apesar de os *datasheets* encontrados

Figura 4.10: Tensão de Saída (V) em Função da Resistência do Potenciômetro (Ω).



Fonte: Autor.

na internet não informarem nada, notou-se que para o correto funcionamento do X9C104P, os pinos de sinal INC e U/D necessitam de resistor de *pull-up* enquanto o pino CS precisa de um resistor de *pull-down*. O *pull-up* interno do ESP32, utilizado para enviar os comandos, não se mostrou suficiente. O primeiro teste foi realizado com um código simplificado, em C++ por meio do ESP-IDF no editor VS Code. Este código foi responsável por sincronizar os pulsos de incremento, controle de direção do cursor e seleção do CI, além de testar a função de gravação da posição inicial do cursor na memória do *chip*. O resultado foi uma onda triangular de tensão, entre 2,95 e 17 volts, que era próximo ao esperado, levando em consideração a montagem e a tolerância dos componentes. Com o intuito de auxiliar na identificação de problemas no circuito, LEDs foram utilizados nos sinais vindos do MCU. Por estar na *protoboard*, houve algumas dificuldades devido a mal contato, então optou-se por prosseguir com a produção de uma placa de circuito impresso.

4.2.2 Placa de Circuito Impresso

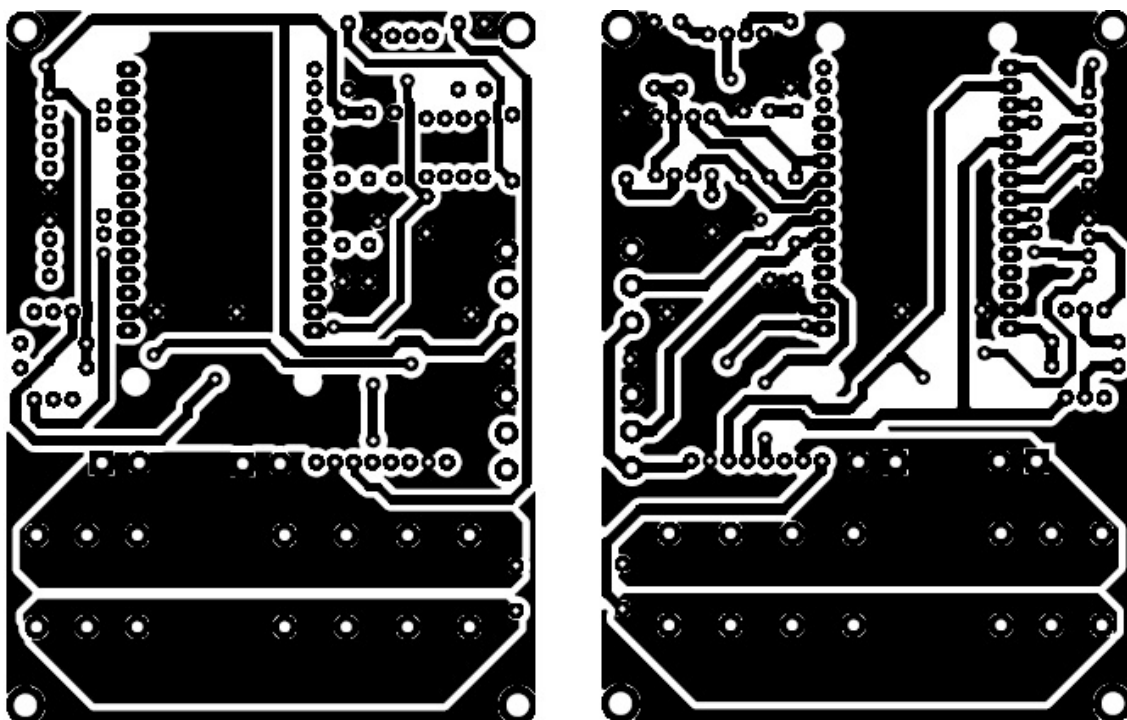
O primeiro passo para a confecção da PCB foi elaborar o esquema elétrico envolvendo todos os componentes presentes no circuito final. Além de adicionar os potenciômetros para ajuste manual, foram adicionados capacitores de filtragem de ruído tanto na alimentação do CI quanto nas entradas dos ADCs conectados aos potenciômetros. Resistores de alta potência (5W) e baixa resistência foram adicionados à placa para auxiliar na medição de corrente, funcionando como um *shunt* de 0,40Ω. Considerou-se a possibilidade de adicionar módulos extras no futuro, como um módulo medidor de corrente e tensão, *display*, controle de corrente, comunicação I²C e SPI. Portanto, no projeto foram disponibilizadas estas portas de expansão. O esquema final é o da Figura 4.11.

Com o esquema em mãos, foi hora de elaborar o *layout* da placa. Optou-se, por trabalhar com uma placa de fibra de vidro do tipo FR4 de dupla face, para permitir um maior espaçamento entre trilhas e facilitar o processo de manufatura.

O *software* utilizado, assim como na produção do esquema elétrico, foi o Altium Designer. Ele permite escolher os componentes a serem posicionados de acordo com seu modelo, encapsulamento e após concluído o esquema, importá-los para o *design* da PCB. A partir de então, foram posicionados primeiramente os conectores de borda, componentes maiores, com mais pinos (como é o caso do MCU) e depois os resistores e capacitores. Foram utilizados conectores do tipo KK para interligar a placa de controle à placa principal, facilitando a posterior manutenção ou desmontagem para alterações. Com uma melhor noção do espaço necessário, foram definidas as bordas da placa e seu tamanho, com pequenas alterações feitas no processo de roteamento das trilhas.

A maior parte dos CADs disponíveis em mercado possui um *auto router*: um algoritmo que procura realizar todas as conexões (trilhas) entre componentes de forma automática. Tal recurso foi utilizado como base para acelerar este processo. No entanto, sempre é necessário realizar intervenções manuais para melhorar o *layout* gerado computacionalmente, seguindo regras de *design*, compatibilidade

Figura 4.12: Layout da PCB. Camadas Superior e Inferior.



Fonte: Autor.

eletromagnética e de boas práticas para fabricação.

Como o método de manufatura escolhido foi a corrosão após transferência térmica e não se tinha o aparato para produção de vias, que são furos revestidos de cobre que interligam sinais de diferentes camadas, seu uso foi minimizado. A conexão dos sinais entre as camadas (superior e inferior) foi realizada em sua maioria com uso das próprias ilhas e terminais dos componentes, aplicando solda de ambos os lados. Nos casos em que foi necessário utilizar uma via, esta foi tratada como uma ilha, inserindo um fio transpassado e soldado. A fixação da placa no gabinete da fonte ATX foi feita por meio de 4 furos nas extremidades da placa para uso de parafusos de 3 mm e espaçadores.

O resultado final pode ser visto na Figura 4.12, onde a camada superior (lado esquerdo) está espelhada para que no momento da transferência térmica, fique em sua posição correta.

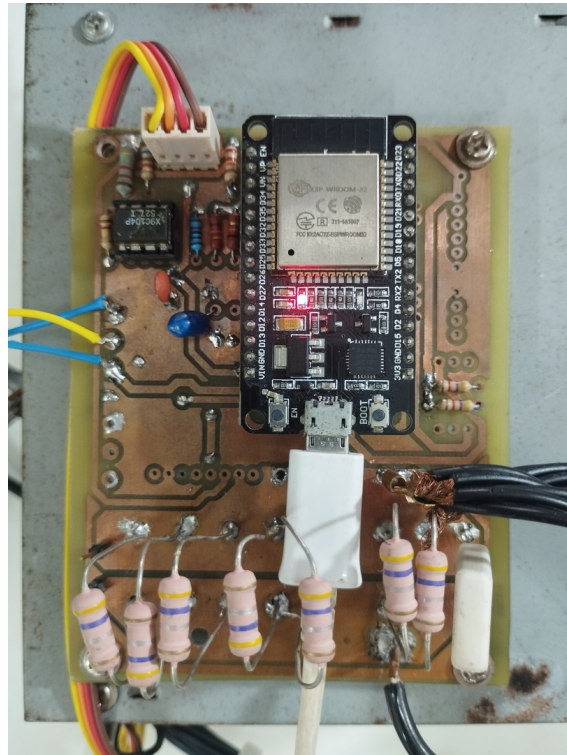
4.2.3 Manufatura

O processo indicado na metodologia foi utilizado. A imagem da Figura 4.12 foi impressa em papel fotográfico, recortada e fixada com fita kepton à placa virgem, devidamente cortada no tamanho adequado. A fita kepton é adequada devido à sua capacidade de suportar altas temperaturas sem grandes deformações. Antes de realizar a fixação, no entanto, foram feitos 4 furos no papel, na posição de ilhas ou vias, tanto na imagem da face superior quanto da inferior, para alinhar as trilhas e *layout* na placa. Após fixar a primeira imagem, a placa também foi furada nestes mesmos 4 pontos para poder finalmente posicionar corretamente a imagem da outra face.

Com ambos os lados fixados, a placa foi levada à prensa térmica, com cada face sendo aquecida por 3 intervalos de 1,5 minutos. Após a prensa térmica, a placa foi retirada, bem como o papel fotográfico. Na primeira tentativa, a transferência do toner não foi satisfatória, então uma segunda tentativa foi realizada, seguindo o mesmo procedimento, porém com outra marca de papel fotográfico. A segunda tentativa se mostrou muito melhor, com praticamente nenhum defeito na transferência, mostrando que a marca do papel fotográfico influencia no resultado. Após a retirada do papel, a placa foi corroída no percloroeto de ferro e perfurada com auxílio de uma micro retífica. O toner foi removido com auxílio de uma escova de latão e uma lã de aço para então checar as conexões elétricas em busca de trilhas abertas ou curto-circuitos. Não foi encontrado nenhum defeito significativo. Finalmente, os componentes foram devidamente montados e o resultado pode ser visto na Figura 4.13.

4.2.4 Componentes Utilizados

A Tabela 4.2 lista os componentes utilizados no projeto e seus respectivos preços, totalizando R\$ 80,91. Os componentes mais caros foram os resistores *shunt* de potência, para leitura da corrente, que neste projeto foram utilizados exclusivamente para análise de desempenho e o microcontrolador. A Figura 4.14 mostra a

Figura 4.13: Placa devidamente montada e fixada.

Fonte: Autor.

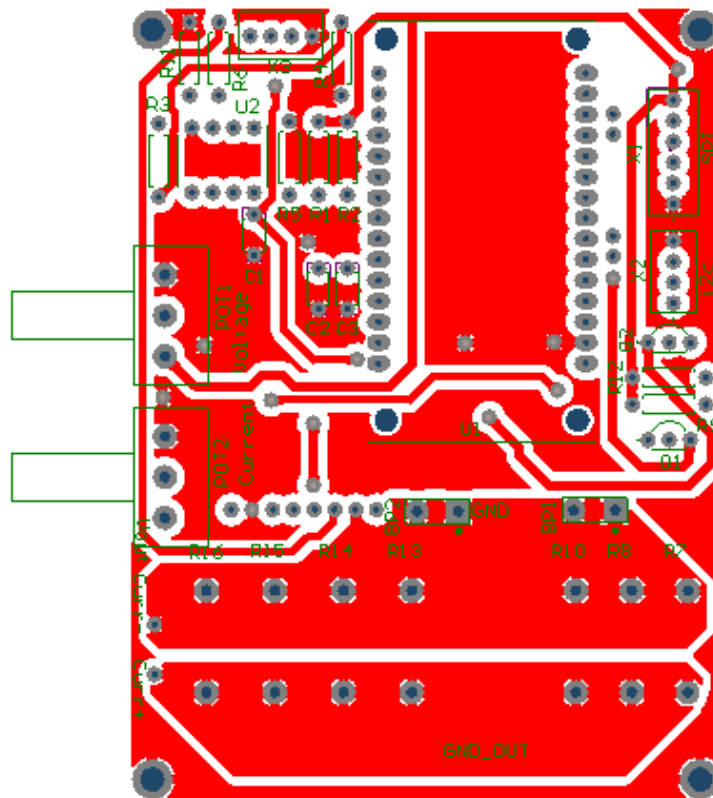
distribuição dos componentes de acordo com sua designação na PCB.

Tabela 4.2: Lista de componentes e valores.

Designação	Descrição	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
BP1, BP2	Terminal Faston PCI	2	0,59	1,18
C1, C2	Capacitor cerâmico 0,1µF 50V X7R, radial	2	0,36	0,72
POT1	Potenciômetro	1	2,75	2,75
R1, R2, R5	Resistor axial, 10kΩ, ±1%, 0,25W, -55 a 155°C, 2 pinos THD, RoHS, a granel	3	0,13	0,39
R3	Resistor axial, 22kΩ, ±5%, 0,25W, 2 pinos THD	1	0,13	0,13
R4	Resistor axial, 120kΩ, ±5%, 0,25W, 2 pinos THD	1	0,13	0,13
R6	Resistor axial, 6,8kΩ, ±5%, 0,25W, 2 pinos THD	1	0,13	0,13
R7, R8, R10, R13, R14, R15, R16	Resistor CW BPR 5W vertical PTH	8	1,85	14,80
R11	Resistor axial, 1,2kΩ, ±1%, 0,25W, -55 a 155°C, 2 pinos THD, RoHS, a granel	1	0,13	0,13
U1	ESP32 DEVKIT V1.0	1	41,18	41,18
U2	Circuito integrado X9C104P	1	4,80	4,80
X2, X3	Conector macho, passo 2,54mm, 1x4 posições, altura 11,7mm, comprimento do terminal 3,56mm, RoHS, a granel	2	1,29	2,58
-	Cabo de 4 vias (m)	1	2,28	2,28
-	Placa de fibra FR4 dupla face 10x10cm	1	9,52	9,52
Custo Total (R\$)				80,91

Fonte: Autor.

Figura 4.14: Distribuição dos Componentes na PCB



Fonte: Autor.

4.2.5 Código de Controle

Com a placa já produzida e montada, bem como suas conexões, foi a vez de desenvolver o código de controle. A lógica utilizada foi a de que a tensão deveria ser ajustada manualmente por meio do potenciômetro, mas a partir do momento em que se enviasse um comando via serial, a tensão deveria comutar automaticamente para aquela solicitada. Tal requisição teria validade de alguns segundos, de modo que se não fosse recebido nenhum outro comando após esse tempo, o controle de tensão voltaria para o ajuste manual. Outro aspecto importante é que a tensão deve sempre iniciar em seu mínimo, com a energização da fonte ou reinício do MCU e só então subir para o nível requerido.

O código foi desenvolvido com utilização de bibliotecas e *toolkits* oficiais, disponibilizados pelo fabricante do MCU, a Espressif. Ele dispõe de um Sistema Operacional de Tempo Real - RTOS nativo, baseado no FreeRTOS, que trabalha com *multitasking*, dividindo a execução do código em várias tarefas com diferentes prioridades

e que podem ser executadas em núcleos diferentes (neste caso, 2 núcleos possíveis) (Espressif Systems Co., Ltd., 2024).

O ESP32-WROOM32 possui 3 portas UART. A configuração programada para a comunicação serial é de 115200 *bits* por segundo, com 8 *bits* de dados, 1 *bit* de parada sem checagem de paridade, na porta UART0, que por padrão, é conectada ao módulo USB da placa de desenvolvimento utilizada. O MCU também emite algumas informações para depuração, através deste canal, sendo possível ter um retorno textual acerca do recebimento dos comandos. O trecho de código 1 mostra as definições citadas, funcionando como uma tarefa própria, definida na função principal. A variável `last_serial_command` é global e armazena o tempo em que o último comando serial foi recebido, permitindo o cálculo do tempo de validade do modo de controle via serial (Espressif Systems Co., Ltd., 2023).

```
void uart_task(void *arg) {
    uart_config_t uart_config = {
        .baud_rate = 115200,
        .data_bits = UART_DATA_8_BITS,
        .parity = UART_PARITY_DISABLE,
        .stop_bits = UART_STOP_BITS_1,
        .flow_ctrl = UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE,
    };
    uart_param_config(UART_NUM_0, &uart_config);
    uart_driver_install(UART_NUM_0, 1024, 0, 0, NULL, 0);

    uint8_t data[128];
    while (1) {
        int len = uart_read_bytes(UART_NUM_0, data, sizeof(data) - 1, 20 /
        ↪ portTICK_PERIOD_MS);
        if (len > 0) {
            data[len] = '\0';
            float voltage = atof((char *)data);
            set_voltage(voltage);
            last_serial_command = esp_timer_get_time()/1000;
            control_mode = MODE_SERIAL;
        }
    }
}
```

Listing 1: Inicialização da Porta Serial

A entrada do conversor de sinal analógico para digital, por estar suscetível a ruído, mesmo com um filtro capacitivo, precisou de um filtro digital para evitar que o potenciômetro digital fosse acionado constantemente. Foi implementado um filtro

de média móvel com auxílio de um *buffer* circular de tamanho 8, visto no trecho de código 2. Esse *buffer* atualiza os valores armazenados e retorna a diferença entre o valor novo e o antigo para o cálculo da média. O tipo `buffer_t` é uma *struct* que contém as variáveis necessárias à operação do *buffer* circular, cuja definição pode ser vista no trecho de código 3

```
float update_buffer(buffer_t* buf, buffer_elem_t e) {
    uint8_t new_wr = buf->wr + 1;
    if (new_wr >= BUF_SIZE)           //wrapping
        new_wr = 0;
    buffer_elem_t old = buf->buffer[buf->wr];
    buf->buffer[buf->wr] = e;
    buf->wr = new_wr;
    return e-old;
}
```

Listing 2: *Buffer Circular*

```
typedef float buffer_elem_t;
typedef struct {
    uint8_t rd;
    uint8_t wr;
    buffer_elem_t buffer[BUF_SIZE];
    uint8_t error_buffer_full;
} buffer_t;
```

Listing 3: Definição do Tipo `buffer_t`

A função `check_pot_value()` do trecho de código 4 é responsável por ler o potenciômetro analógico através do canal 9 do ADC 2, filtrar e converter para o nível de tensão a ser fornecido na saída. Esse ADC possui 12 *bits*, ou seja, seu valor máximo é 4095, que representa a tensão máxima alcançável pela fonte.

O trecho de código 5 calcula a quantidade de passos necessários que o cursor do potenciômetro digital deve percorrer e a sua direção, informando via serial a quantidade de passos percorridos. A quantidade de passos é calculada de forma a se atingir a tensão mais próxima à requisitada.

O controle do potenciômetro foi feito por meio de duas funções: `x9c104p_set_value()` e `x9c104p_save_value()`, vistas nos trechos de código 6 e 7. A primeira, sincroniza os sinais de incremento, seleção do *chip* e direção do cursor, respeitando o tempo de resposta do CI e tornando a comutação de resistência mais suave, como

```

float check_pot_value(){
    ret = adc2_get_raw(POT_PIN, ADC_WIDTH_BIT_12, &adc_raw);
    if (ret == ESP_OK) {
        float desired_voltage = adc_raw * MAX_VOLTAGE / 4095;
        desired_voltage = (desired_voltage*1000)/1000;

        ma_sum += update_buffer(ma_buffer, desired_voltage);
        moving_average = ma_sum/BUFFER_SIZE;

        return moving_average;
    }
    else {
        ESP_LOGE(TAG, "ADC reading failed");
        return 0;
    }
}

```

Listing 4: Leitura do Potenciômetro Analógico

```

uint8_t calculate_steps(float voltage) {
    if (voltage > MAX_VOLTAGE) voltage = MAX_VOLTAGE;
    if (voltage < MIN_VOLTAGE) voltage = MIN_VOLTAGE;
    return (uint8_t)((voltage - MIN_VOLTAGE) / (MAX_VOLTAGE - MIN_VOLTAGE) *
        ↪ MAX_STEPS);
}

void set_voltage(float voltage) {
    uint8_t target_steps = calculate_steps(voltage);
    int8_t steps = target_steps - current_steps;

    if (steps > 0) {
        x9c104p_set_value(steps, 1);
        ESP_LOGI("SET_VOLTAGE", "Ajustando para %0.2f V (%d passos)", voltage,
            ↪ target_steps);
    } else if (steps < 0) {
        x9c104p_set_value(-steps, 0);
        ESP_LOGI("SET_VOLTAGE", "Ajustando para %0.2f V (%d passos)", voltage,
            ↪ target_steps);
    }
}

```

Listing 5: Cálculo da Quantidade de Passos Necessários

indicam as instruções presentes no *datasheet*. Caso este tempo não seja respeitado e o cursor seja movimentado por múltiplas posições de uma vez, a resistência equivalente pode cair significativamente. Isto pois os transistores da cadeia resistiva serão conectados simultaneamente, em paralelo, fazendo com que haja uma queda brusca e acentuada na tensão de saída.

A segunda função tem como objetivo armazenar a posição atual do cursor na

memória do CI para que, a cada reinicialização dele, inicie na posição previamente armazenada. Esta função é utilizada no código principal para garantir que a fonte sempre iniciará na tensão mínima e só depois atingirá o valor selecionado. Este salvamento é realizado ao se transicionar o pino CS do nível baixo para o alto, enquanto o pino INC está em nível alto. Este procedimento foi evitado na função de controle `x9c104p_set_value()`.

```
void x9c104p_set_value(uint8_t value, uint8_t direction) {
    gpio_set_level(UD_PIN, direction);

    for (int i = 0; i < value; i++) {
        if(direction == 0 && current_steps >= 0){
            current_steps--;
        }
        else if(direction == 1 && current_steps <= 99){
            current_steps++;
        }
        else{
            ESP_LOGI("ERROR", "current_steps fora do limite. Valor: %d",
                ↪ current_steps);
            return;
        }
        gpio_set_level(INC_PIN, 1);
        gpio_set_level(CS_PIN, 0);           // Selecionar o chip
        esp_rom_delay_us(1);
        gpio_set_level(INC_PIN, 0);          // Pulso de incremento
        esp_rom_delay_us(1);
        gpio_set_level(CS_PIN, 1);           // Deselecionar o chip
        esp_rom_delay_us(1);
        gpio_set_level(INC_PIN, 1);
    }
}
```

Listing 6: Função de Controle do Potenciômetro Digital

```
void x9c104p_save_value(){
    gpio_set_level(INC_PIN, 1);
    vTaskDelay(16);
    gpio_set_level(CS_PIN, 0);
    vTaskDelay(32);
    gpio_set_level(CS_PIN, 1);
    vTaskDelay(32);
    ESP_LOGI("SAVED_VALUE", "Valor atual salvo na memória");
}
```

Listing 7: Função de Salvamento da Posição do Cursor

A habilitação do controle manual ou via serial é feita no *loop* do código principal, visto no trecho de código 8. Assim que um comando serial é recebido, a tarefa `uart_`

task() do trecho de código 1, alterna o modo de operação para serial. No trecho de código 8 o MCU está sempre checando se o tempo do controle serial expirou. Caso tenha expirado, ele alterna o controle para o modo manual (MODE_POT). Neste modo, o valor do potenciômetro, que está sempre sendo lido é comparado com o último valor e se houver mudança, o ajuste é transmitido para o potenciômetro digital.

```
while(1){
    float aux = check_pot_value();
    current_time = esp_timer_get_time()/1000;
    if(current_time - last_serial_command > SERIAL_TIMEOUT && control_mode !=
    ↪ MODE_POT){
        control_mode = MODE_POT;
    }
    if(aux!=previous_pot_value && control_mode == MODE_POT && aux <
    ↪ MAX_LIMIT){
        set_voltage(aux);
        previous_pot_value = aux;
        cont++;
    }
    vTaskDelay(1);
}
```

Listing 8: *Loop* do Código Principal

Capítulo 5

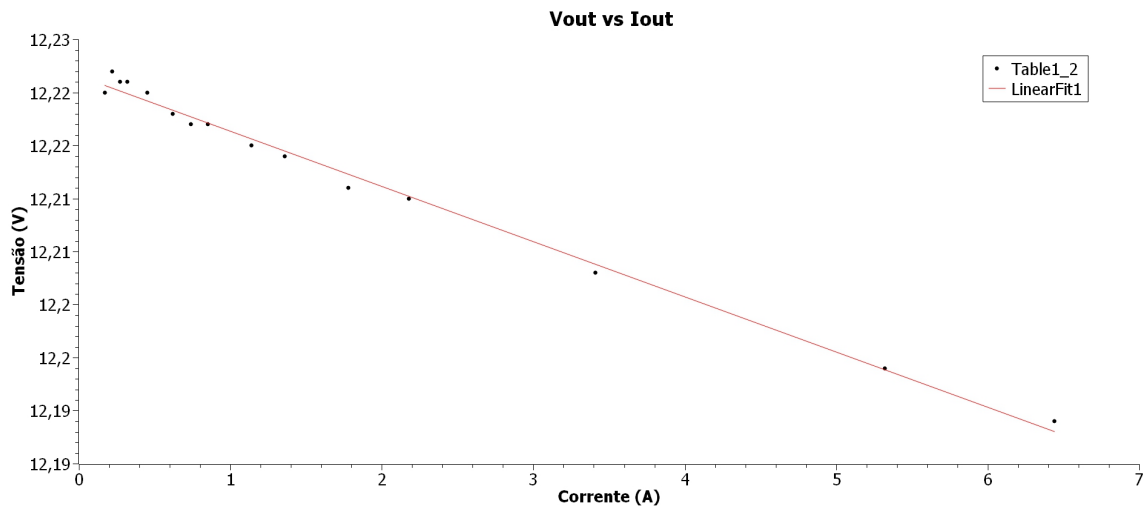
Resultados

A fonte satisfaz os requisitos necessários de projeto. Para averiguar esta afirmação, ela precisou passar por testes de desempenho que avaliaram suas funcionalidades e capacidade de operação em diferentes condições.

Os vários resistores em paralelo vistos na Figura 4.13 foram instalados para poder monitorar a corrente drenada da fonte. São sete resistores de $470\text{ m}\Omega$ e um resistor de $100\text{ m}\Omega$, resultando em um *shunt* de $40\text{ m}\Omega$. Esta configuração em paralelo foi adotada por questão de disponibilidade dos componentes, podendo ser substituídos por um único resistor de maior potência ou menor resistência. O procedimento para obtenção da corrente foi medir a diferença de potencial em seus terminais (da ordem de milivolts) e dividir pela resistência equivalente.

5.1 Regulação de Tensão

Durante a montagem e análise, foi possível notar que, além do circuito em si, outros fatores influenciam na estabilidade do dispositivo. Como alguns resistores foram removidos da placa original e instalados na nova, foi necessário transportar este sinal por meio de alguns cabos. O fato deles ficarem próximos ao cabo que carrega a corrente AC da entrada introduziu um ruído extremamente prejudicial ao funcionamento do equipamento, ocasionando o constante desarmamento dele com a mínima carga aplicada. Isto foi facilmente resolvido ao distanciar os cabos da

Figura 5.1: Relação Tensão vs Corrente Drenada.

Fonte: Autor.

entrada AC e do sinal de controle da saída, fixando-os com auxílio de algumas braçadeiras plásticas.

A fonte foi submetida a uma entrada CA cuja tensão variou entre 221,9 V_{AC} e 230,4 V_{AC} . A saída se manteve constante em 5,117 V_{DC} com uma carga aplicada de 1,67 Ω drenando 3 A, indicando uma boa regulação relativa à tensão de entrada.

Foram aplicadas diferentes cargas com diferentes tensões para verificar o comportamento da fonte, que atendeu com folga a todas as demandas exigidas pelos requisitos.

Posteriormente, foram aplicadas diferentes cargas à fonte com um mesmo ajuste no potenciômetro. Idealmente a tensão na saída seria fixa. No entanto, fontes reais possuem uma resistência interna, ao qual, para mensurá-la, as tensões finais, bem como as correntes, foram registradas. O resultado foi plotado no gráfico da Figura 5.1.

Observou-se a possibilidade de realizar um ajuste linear a estes resultados. Ao fazê-lo, notou-se um comportamento resistivo. O ajuste linear forneceu a relação

$$V_{out} = -(0,00520 \pm 0,000122) * I_{out} + (12,22157 \pm 0,00031) \quad (5.1)$$

de forma que foi possível inferir que a resistência interna da saída desta fonte é de 5,20 m Ω . A regulação de tensão também pôde ser obtida de acordo com a

Equação 5.2, onde V_0 é a tensão sem carga e V_L é a tensão com carga aplicada.

$$\text{Regulação} = \frac{V_0 - V_L}{V_L} = \frac{12,22 - 12,19}{12,19} = 0,25\% \quad (5.2)$$

5.2 Tensões Alcançáveis

A tensão máxima obtida na fonte foi 17,2V, indicando uma relação levemente diferente à vista na Figura 4.10 e Equação 4.5, com 6,6% de erro. Tal diferença se dá pela variação nos valores dos componentes em relação ao nominal, dentro das suas respectivas margens de tolerância. Este valor máximo foi limitado via *software* para atender aos requisitos previamente definidos e evitar danos aos capacitores.

A tensão mínima medida foi de 2,66V, representando uma diferença de 5,1% em relação à tensão mínima calculada pela Equação 4.5, que corresponde a 2,53V.

5.3 Qualidade da Saída

A oscilação de tensão na frequência de chaveamento foi analisada sob diferentes condições de carga. Na Figura 5.2, observa-se o comportamento da oscilação com uma carga menor, mas mantendo a mesma tensão de saída de 12,22V.

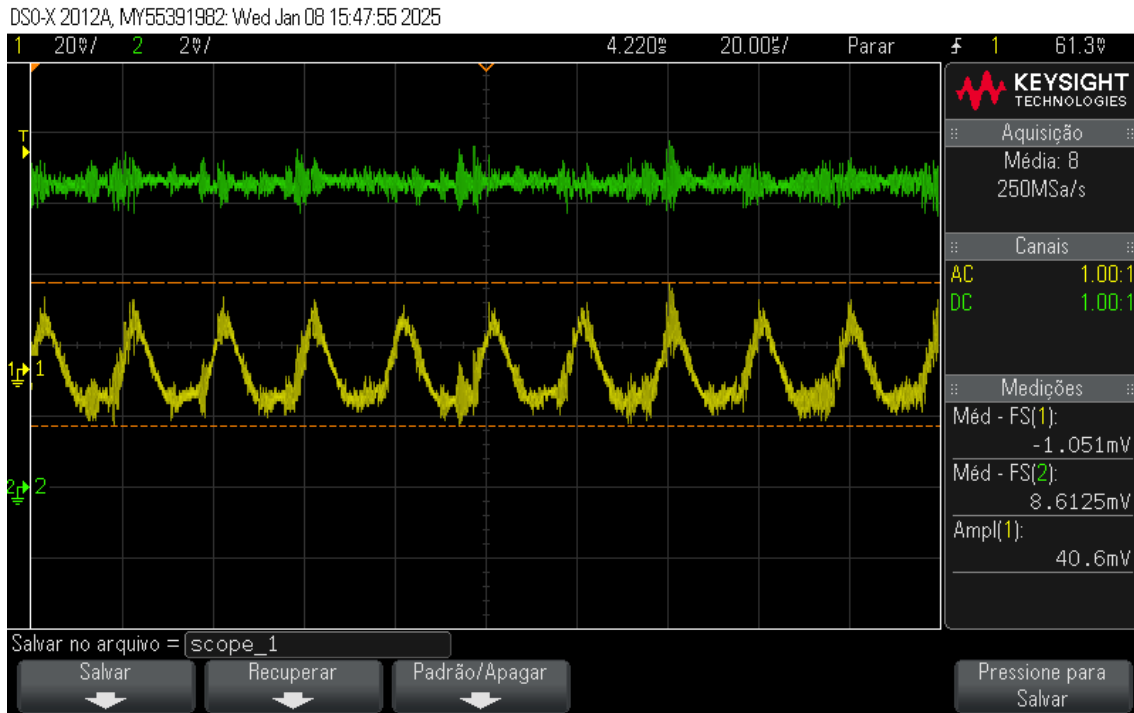
O canal 1 (em amarelo) está conectado entre os terminais positivo e negativo da saída da fonte, configurado no modo de corrente alternada e sem atenuação. A escala utilizada foi de 20 mV por divisão no eixo vertical e 20 μ s por divisão no eixo horizontal.

O canal 2 (em verde) foi configurado para monitorar a corrente aplicada por meio da tensão nos resistores de *shunt*. Este canal opera no modo de corrente contínua, também sem atenuação, com uma escala de 2 mV por divisão.

Com base nos resultados obtidos, a taxa de oscilação para esta condição foi calculada como:

$$\text{Taxa de oscilação} = \frac{\Delta V}{V_{out}} = \frac{0,0406}{12,220} = 0,33\% \quad (5.3)$$

Figura 5.2: Oscilação de Tensão com $V_{out} = 12,22V$ e $I_{out}=0,214 A$.



Fonte: Autor.

$$I_{out} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} = \frac{8,61}{40,17} = 0,214A \quad (5.4)$$

Já na Figura 5.4, o comportamento da oscilação é apresentado para uma carga maior, também com uma tensão de saída de 12,22V.

O canal 1 permanece conectado na saída da fonte, no modo de corrente alternada e sem atenuação, com a mesma escala de 20 mV e 20 μs por divisão.

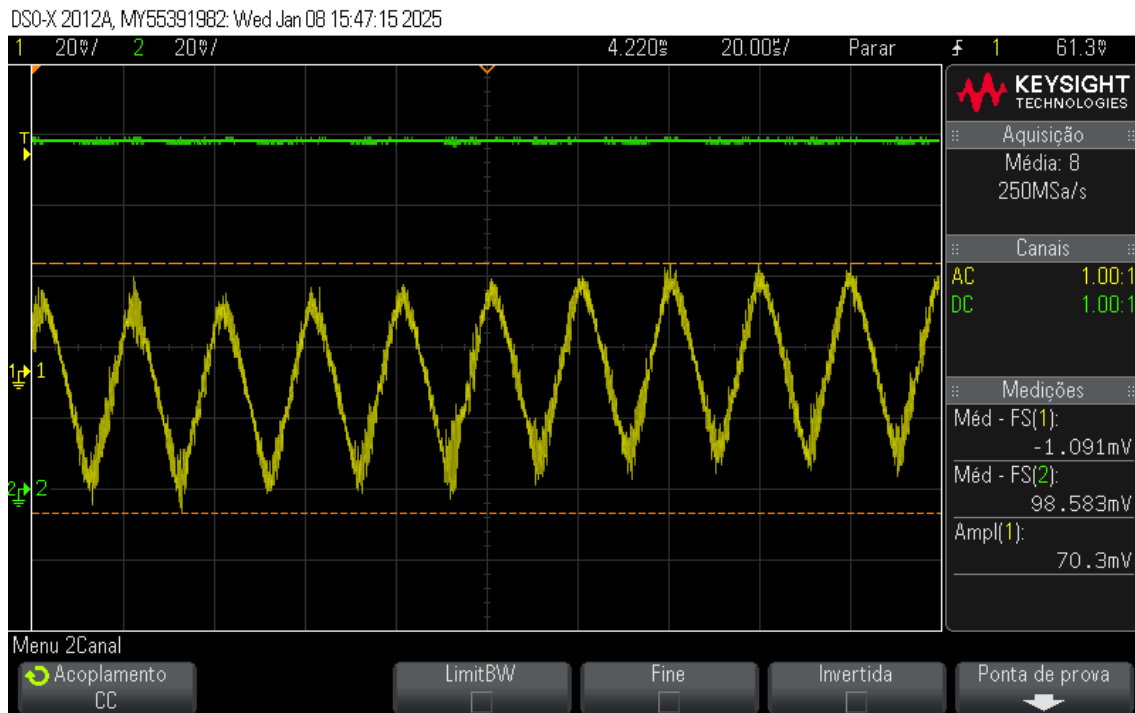
O canal 2 continua monitorando a corrente aplicada por meio dos resistores de *shunt*, configurado no modo de corrente contínua, sem atenuação, desta vez com uma escala de 20 mV por divisão.

A taxa de oscilação correspondente foi calculada como:

$$\text{Taxa de oscilação} = \frac{0,0703}{12,220} = 0,57\% \text{ para } I_{out} = \frac{98,58}{40,17} = 2,45A \quad (5.5)$$

Percebe-se o aumento na taxa de oscilação com o aumento da demanda, mas sempre dentro dos limites estabelecidos na tabela 2.4. Foi possível notar ruído

Figura 5.3: Oscilação de Tensão com $V_{out} = 12,22V$ e $I_{out}=2,45A$.



Fonte: Autor.

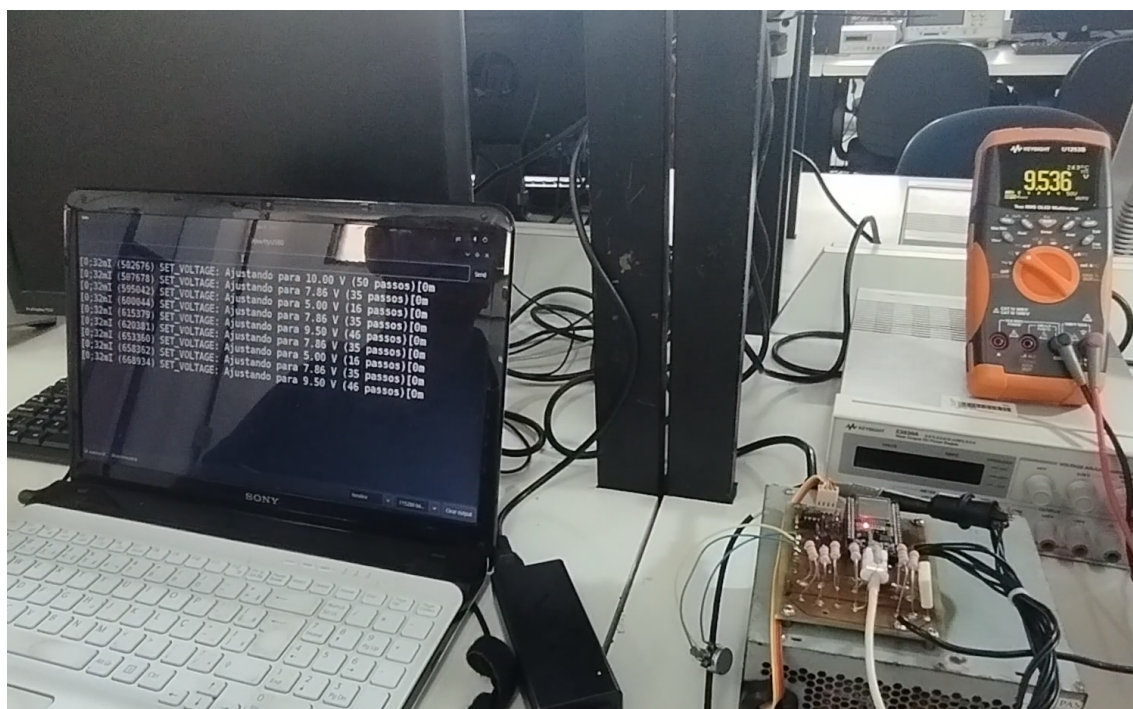
na onda observada, mas não se sabe ao certo quanto era devido à fonte com as modificações implementadas e quanto era inserido pelas ponteiros do osciloscópio.

5.4 Proteção Contra Curto Circuito

A proteção contra curto circuito foi testada e atuou conforme o esperado, desarmando-a. Ela só é reativada ao desligar e ligar novamente depois de alguns segundos. Foi testado tanto o ligamento com a saída em curto quanto o curto aplicado após a fonte já estar operando.

5.5 Teste da Comunicação Serial

A fonte foi conectada a um computador por meio de cabo USB a partir da placa de desenvolvimento do ESP32, que integra um conversor de serial UART para USB. O teste foi realizado por meio do terminal do Linux e por meio do *software* YAT, no Windows.

Figura 5.4: Operação da Fonte em Modo Serial.

Fonte: Autor.

A operação correu, em todos os casos, como esperado, em que ao enviar um comando com um valor de tensão, a fonte automaticamente comutou para o controle por serial e se ajustou para o nível requerido. No casos em que um novo comando não foi enviado dentro de 5 segundos, o controle retornou ao modo manual, para a tensão ajustada no potenciômetro analógico. Já quando o comando foi repetido dentro do intervalo de validade, a tensão se manteve no valor inserido.

A tensão neste modo se mostrou próxima à requerida, com precisão acima de 100 mV. Foi gravado um vídeo mostrando o teste da comunicação serial, ao qual a Figura 5.4 ilustra um dos resultados obtidos.

Capítulo 6

Conclusão e Considerações Finais

O desenvolvimento de uma fonte de bancada ajustável e programável a partir da modificação de uma fonte ATX demonstrou-se uma iniciativa eficaz para atender às necessidades de usuários que buscam soluções acessíveis e sustentáveis. Este trabalho evidenciou que é possível aliar conhecimento técnico e criatividade para reaproveitar equipamentos descartados, como fontes de alimentação de computadores, transformando-os em ferramentas úteis e versáteis.

A reutilização de fontes ATX, além de oferecer uma abordagem sustentável, proporcionou um equipamento capaz de atender a diferentes demandas, como controle manual e programação via comunicação serial, permitindo sua integração com sistemas automatizados. O projeto ainda promoveu a aplicação prática de conceitos fundamentais de eletrônica, contribuindo para o aprendizado e a prática técnica no desenvolvimento de dispositivos customizáveis. Foi conduzido com foco na sustentabilidade, eficiência e viabilidade econômica. Atingiu os objetivos traçados inicialmente e mostrou-se uma solução promissora para uso acadêmico, *maker* e até mesmo em laboratórios profissionais, dependendo de sua aplicação.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a modificação de uma fonte ATX representa uma alternativa economicamente viável e tecnicamente robusta para o desenvolvimento de fontes de bancada ajustáveis e programáveis. O equipamento final apresentou resultados satisfatórios quanto à regulação de tensão e corrente, controle de parâmetros e reaproveitamento sustentável de componentes eletrônicos

descartados.

A proposta deste trabalho não apenas oferece uma solução técnica, mas também reforça a importância da sustentabilidade e da inovação no setor de eletrônica, ao reaproveitar equipamentos em desuso e agregar valor a eles. Sugere-se que estudos futuros ampliem as funcionalidades do projeto, como a incorporação de interfaces de comunicação sem fio, controle de corrente, geração de formas de onda, entre outros.

O projeto demonstra que, com conhecimento técnico e criatividade, é possível transformar desafios em oportunidades, proporcionando soluções úteis e inovadoras alinhadas às demandas de acessibilidade e sustentabilidade da atualidade.

6.1 Viabilidade

A complexidade envolvida nas modificações realizadas requer um conhecimento básico de eletrônica. Os equipamentos que possuem a mesma topologia e controladores equivalentes ao utilizado neste trabalho podem ser modificados de maneira análoga, aproveitando os conhecimentos aqui relatados, sem muito esforço. No caso de outros controladores, pode ser necessária uma nova análise do circuito para dimensionar o circuito de realimentação, o que pode demandar um maior conhecimento da eletrônica. Ainda assim, do ponto de vista técnico, não foi verificado nenhum aspecto tão complexo que possa ser impeditivo. O custo da modificação também foi baixo, podendo ainda ser diminuído com a substituição ou não utilização de alguns componentes.

6.2 Dificuldades Encontradas

Encontrar o esquema elétrico compatível com a fonte que se tinha em mãos e conferir o circuito se mostrou uma tarefa trabalhosa, porém ainda mais eficiente do que desenhar todo o circuito a partir da observação direta da placa. Durante as modificações, problemas como maus contatos nos fios e na *protoboard* atrasaram significativamente o progresso, somados à ausência de informações completas no

datasheet do X9C104P, que não mencionava a necessidade de resistores *pull-up* e *pull-down*, ocasionando ajustes adicionais no circuito.

Na etapa de confecção da placa de circuito impresso, o método de transferência térmica apresentou uma dependência elevada da qualidade do papel fotográfico utilizado. Foi necessário um processo de tentativa e erro para identificar a marca mais adequada para esse tipo de aplicação, o que também contribuiu para atrasos na execução.

6.3 Trabalhos Futuros

A fonte programável possui muitas funcionalidades que podem ser implementadas. *Presets* com formas de onda, níveis de tensão e corrente, registro da corrente drenada, entre outros. Uma atributo importante é o controle e monitoramento da corrente drenada, que pode ser feito manualmente, ou com um módulo como o INA226 ao qual foi criado uma entrada na PCB para conexão dele ao MCU e aos resistores de *shunt*. Os próximos passos para adicionar atributos ao dispositivo são:

- Implementar o monitoramento digital de corrente e tensão;
- Implementar o controle da corrente por meio da tensão;
- Adicionar outro potenciômetro para ajuste da corrente;
- Instalar um *display*;
- Implementar novas funções em código.

Referências

BasuMallick, C. (2023). What is usb (universal serial bus)? meaning, types, and importance. *Spiceworks*.

BCD Semiconductor Manufacturing Limited (2006). Pulse-width-modulation control circuits az7500b/c. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/176244/BCDSEMI/AZ7500B.html>. Acesso em: 02/09/2024.

Boylestad (2012). *Introdução à Análise de Circuitos*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 12. edição.

Dan (2014). At and atx pc computer supplies schematics. https://danyk.cz/s_atx_en.html. Acesso em: 05/10/2024.

EPUSP - PCS 2011 - Laboratório Digital (2011). Conceitos de comunicação serial assíncrona. versão 2015. https://www2.pcs.usp.br/labdig/pdffiles_2015/conceitos-comunicacao-serial.pdf. Acesso em: 10/11/2024.

Espressif Systems Co., Ltd. (2023). Esp32-wroom-32 datasheet. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32-datasheet_en.pdf. Acesso em: 29/12/2024.

Espressif Systems Co., Ltd. (2024). Esp-idf programming guide. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/index.html>. Acesso em: 29/12/2024.

Gontean, A., Lie, I., e Szabo, R. (2009). Using a low cost programmable power supply for automated testing. *2009 15th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages (SIITME)*.

Green Eletron (2023). Resíduos eletrônicos no brasil. https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DADOS_2023.pdf. Acesso em: 04/11/2024.

Hart, D. W. (2016). *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. McGraw Hill Brasil, Rio de Janeiro.

Instituto Newton C. Braga (2023). O que são e como funcionam os potenciômetros digitais (art4623).

<https://www.newtonbraga.com.br/como-funciona/19666-o-que-sao-e-como-funcionam-os-potenciometros-digitais-art4623.html>. Acesso em: 15/01/2025.

Intel Corporation (2000). Atx / atx12v power supply design guide. version 1.1.

https://xdevs.com/doc/Standards/ATX/ATX12V_Power_Supply_Design_Guide_-Rev1.1.pdf. Acesso em: 02/11/2024.

Intersil Americas Inc. (2005). Digitally controlled potentiometer (xdcp™).

x9c102, x9c103, x9c104, x9c503. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/120353/INTERSIL/X9C104P.html>. Acesso em: 16/09/2024.

Pressman, Billings, e Morey (2009). *Switching Power Supply Design*.

McGraw-Hill, EUA, 3. edição.

Salmony, P. (2024). Principais microcontroladores para sistemas embarcados.

<https://resources.altium.com/pt/p/top-microcontrollers-embedded-systems>. Acesso em: 29/12/2024.

TS Shara (2024). Rede elétrica: Entenda a estrutura e o funcionamento.

<https://tsshara.com.br/blog/sem-categoria/rede-eletrica-entenda-a-estrutura-e-o-funcionamento/>. Acesso em: 29/12/2024.

Wikipédia (2023). Atx — wikipédia, a enciclopédia livre.

<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=ATX&oldid=65273776>. Acesso em: 29/12/2024.

Apêndice A

Código de Controle

A.1 Arquivo main.c

```
1  /*
2  *      TCC - Controlador de fonte ATX com potenciômetro digital X9C104P
3  *      Created on:      september, 2024
4  *      Author:         Igor Morimoto
5  */
6
7  #include <stdio.h>
8  #include <inttypes.h>
9
10
11 #include "sdkconfig.h"
12 #include "freertos/FreeRTOS.h"
13 #include "freertos/task.h"
14 #include "esp_chip_info.h"
15 #include "esp_flash.h"
16 #include "esp_system.h"
17 #include "driver/gpio.h"
18 #include "driver/adc.h"
19 #include "esp_log.h"
20 #include "driver/uart.h"
21 #include "esp_timer.h"
```

```

22  #include "circular_buffer.h"
23
24
25
26  // Pinos do X9C104P
27  #define INC_PIN    GPIO_NUM_32  // Incremento
28  #define UD_PIN     GPIO_NUM_33  // Up/Down (direção)
29  #define CS_PIN     GPIO_NUM_25  // Chip Select
30
31  #define POT_PIN     ADC2_CHANNEL_9    // Cursor
32
33  #define MAX_STEPS    99            // Máximo de passos do X9C104P
34  #define MAX_VOLTAGE  17.2         // Tensão máxima ajustável (ex: 30V)
35  #define MIN_VOLTAGE  2.64         // Tensão mínima ajustável (ex: 2V)
36  #define SERIAL_TIMEOUT  5000     // Timeout para modo serial em ms
37
38  #define BUFFER_SIZE    8
39  #define MAX_LIMIT      16
40
41  static const char* TAG = "POTENTIOMETER_READING";
42
43  bool locked = 0;
44  static uint8_t current_steps = 0;
45  int adc_raw = 0;
46  esp_err_t ret;
47  uint8_t control_mode;
48  uint32_t last_serial_command = 0;
49  float moving_average = 0;
50  float ma_sum = 0;
51  buffer_t ma_buffer[BUFFER_SIZE] = {};
52
53
54  enum controlMode{
55      MODE_SERIAL,
56      MODE_POT

```

```

57 };
58
59
60 void x9c104p_init() {
61     gpio_set_direction(INC_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
62     gpio_set_direction(UD_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
63     gpio_set_direction(CS_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
64
65     gpio_pullup_en(INC_PIN);
66     gpio_pullup_en(UD_PIN);
67     gpio_pulldown_en(CS_PIN);
68
69
70     // Estado inicial
71     gpio_set_level(CS_PIN, 1);
72     gpio_set_level(INC_PIN, 1);
73     gpio_set_level(UD_PIN, 1);
74     printf("Init Ok\n");
75 }
76
77 void x9c104p_set_value(uint8_t value, uint8_t direction) {
78     gpio_set_level(UD_PIN, direction);
79
80     for (int i = 0; i < value; i++) {
81         if(direction == 0 && current_steps >= 0){
82             current_steps--;
83         }
84         else if(direction == 1 && current_steps <= 99){
85             current_steps++;
86         }
87         else{
88             ESP_LOGI("ERROR", "current_steps fora do limite. Valor: %d",
89                 ↪ current_steps);
89             return;
90         }

```

```

91     gpio_set_level(INC_PIN, 1);
92     gpio_set_level(CS_PIN, 0);           // Selecionar o chip
93     esp_rom_delay_us(1);
94     gpio_set_level(INC_PIN, 0);         // Pulso de incremento
95     esp_rom_delay_us(1);
96     gpio_set_level(CS_PIN, 1);         // Deselecionar o chip
97     esp_rom_delay_us(1);
98     gpio_set_level(INC_PIN, 1);
99 }
100 }
101
102 void x9c104p_save_value(){
103     gpio_set_level(INC_PIN, 1);
104     vTaskDelay(16);
105     gpio_set_level(CS_PIN, 0);
106     vTaskDelay(32);
107     gpio_set_level(CS_PIN, 1);
108     vTaskDelay(32);
109     ESP_LOGI("SAVED_VALUE", "Valor atual salvo na memória");
110 }
111
112 uint8_t calculate_steps(float voltage) {           //quantos passos a
    ↪ partir no minimo
113     if (voltage > MAX_VOLTAGE) voltage = MAX_VOLTAGE;
114     if (voltage < MIN_VOLTAGE) voltage = MIN_VOLTAGE;
115     return (uint8_t)((voltage - MIN_VOLTAGE) / (MAX_VOLTAGE - MIN_VOLTAGE) *
    ↪ MAX_STEPS);
116 }
117
118 void set_voltage(float voltage) {
119     uint8_t target_steps = calculate_steps(voltage);
120     int8_t steps = target_steps - current_steps;
121
122
123     if (steps > 0) {

```

```

124     x9c104p_set_value(steps, 1);
125     ESP_LOGI("SET_VOLTAGE", "Ajustando para %0.2f V (%d passos)", voltage,
        ↪ target_steps);
126 } else if (steps < 0) {
127     x9c104p_set_value(-steps, 0);
128     ESP_LOGI("SET_VOLTAGE", "Ajustando para %0.2f V (%d passos)", voltage,
        ↪ target_steps);
129 }
130 }
131
132 // Função para ler comandos via serial e ajustar a tensão
133 void uart_task(void *arg) {
134     uart_config_t uart_config = {
135         .baud_rate = 115200,
136         .data_bits = UART_DATA_8_BITS,
137         .parity = UART_PARITY_DISABLE,
138         .stop_bits = UART_STOP_BITS_1,
139         .flow_ctrl = UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE,
140     };
141     uart_param_config(UART_NUM_0, &uart_config);
142     uart_driver_install(UART_NUM_0, 1024, 0, 0, NULL, 0);
143
144     uint8_t data[128];
145     while (1) {
146         int len = uart_read_bytes(UART_NUM_0, data, sizeof(data) - 1, 20 /
        ↪ portTICK_PERIOD_MS);
147         if (len > 0) {
148             data[len] = '\0';
149             float voltage = atof((char *)data);
150             set_voltage(voltage);
151             last_serial_command = esp_timer_get_time()/1000;
152             control_mode = MODE_SERIAL;
153         }
154     }
155 }

```

```

156
157 float check_pot_value(){
158     ret = adc2_get_raw(POT_PIN, ADC_WIDTH_BIT_12, &adc_raw);
159     if (ret == ESP_OK) {
160         float desired_voltage = adc_raw * MAX_VOLTAGE / 4095;
161         desired_voltage = (desired_voltage*1000)/1000;
162
163
164         ma_sum += update_buffer(ma_buffer, desired_voltage);
165         moving_average = ma_sum/BUFFER_SIZE;
166
167         return moving_average;
168     }
169     else {
170         ESP_LOGE(TAG, "ADC reading failed");
171         return 0;
172     }
173 }
174
175 void app_main(void)
176 {
177     float previous_pot_value = 0;
178     uint8_t cont = 0;
179     bool pot_en = 0;
180     control_mode = MODE_POT;
181     uint32_t current_time = esp_timer_get_time();
182
183     adc2_config_channel_atten(POT_PIN, ADC_ATTEN_DB_11);
184     x9c104p_init();
185     xTaskCreate(uart_task, "uart_task", 4096, NULL, 5, NULL);
186     x9c104p_set_value(99, 0); // Inicia no valor minimo
187     x9c104p_save_value();    // Salva valor, para sempre
188                             ↪ iniciar no nível mais baixo
189     vTaskDelay(100);
190     buffer_init(ma_buffer);

```

```

190
191
192     while(1){
193         float aux = check_pot_value();
194         current_time = esp_timer_get_time()/1000;
195         if(current_time - last_serial_command > SERIAL_TIMEOUT && control_mode !=
            ↪  MODE_POT){
196             control_mode = MODE_POT;
197         }
198         if(aux!=previous_pot_value && control_mode == MODE_POT && aux <
            ↪  MAX_LIMIT){
199             set_voltage(aux);
200             previous_pot_value = aux;
201             cont++;
202         }
203
204         vTaskDelay(1);
205     }
206 }

```

A.2 Arquivo circular_buffer.c

```

1  #include "circular_buffer.h"
2
3
4  void buffer_init(buffer_t* buf) {
5      buf->wr = buf->rd = 0;
6      buf->error_buffer_full = 0;
7  }
8
9  float update_buffer(buffer_t* buf, buffer_elem_t e) {
10     uint8_t new_wr = buf->wr + 1;
11     if (new_wr >= BUF_SIZE)           //wrapping
12         new_wr = 0;
13     buffer_elem_t old = buf->buffer[buf->wr];

```

```

14         buf->buffer[buf->wr] = e;
15         buf->wr = new_wr;
16
17     return e-old;
18 }

```

A.3 Arquivo circular_buffer.h

```

1  #ifndef CIRCULAR_BUFFER_H
2  #define CIRCULAR_BUFFER_H
3
4  #include <inttypes.h>
5
6
7  #define BUF_SIZE 8
8
9  typedef float buffer_elem_t;
10 typedef struct {
11     uint8_t rd;
12     uint8_t wr;
13     buffer_elem_t buffer[BUF_SIZE];
14     uint8_t error_buffer_full;
15 } buffer_t;
16
17 void buffer_init(buffer_t* buf);
18 float update_buffer(buffer_t* buf, buffer_elem_t e);
19
20 #endif /* CIRCULAR_BUFFER_H */

```