



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JONATHAN PORFÍRIO DE QUEIROZ

**PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DE UMA FONTE DE
ALIMENTAÇÃO ESTABILIZADA**

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2014

JONATHAN PORFÍRIO DE QUEIROZ

PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DE UMA FONTE DE
ALIMENTAÇÃO ESTABILIZADA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia e Eletrônica

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2014

JONATHAN PORFÍRIO DE QUEIROZ

PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DE UMA FONTE DE ALIMENTAÇÃO ESTABILIZADA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia e Eletrônica

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Tarso Vilela Ferreira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos pequenos João Pedro, Isabel Luara e Kauã Victor, para que se inspirem na busca, desenvolvimento e aplicação do conhecimento para o bem das pessoas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por me guiar ao longo do caminho que ela representa e pelas pessoas que colocou em meu convívio.

Agradeço a meus pais e a minha esposa pelo apoio conferido em qualquer momento. Agradeço também a meu filho, cujo sorriso ingênuo e sublime acalmava-me nos momentos de aflição e cuja imensa curiosidade tornava-se motivo de inspiração.

Agradeço a minha família pelo incentivo, ajuda, conselhos e descontração que me proporcionaram até então.

A essa Instituição, pela minha acolhida e pelos valorosos conhecimentos que me foram transmitidos ao longo de minha jornada acadêmica como aluno de graduação.

Ao Laboratório de Alta Tensão, que propiciou as condições que me permitiram desenvolver este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Tarso Vilela, por ter proposto este trabalho, pela paciência, pela disponibilidade em ajudar e pelo tempo dedicado ao diálogo, aos conselhos e às sugestões.

Agradeço também aos amigos que deixaram sua parcela de contribuição, como Saulo Lucena, que disponibilizou seu microcontrolador pessoal para meu aprendizado.

Agradeço ao colega de laboratório Lenílson Barbosa pelo auxílio prestado na aquisição de materiais e na resolução de problemas aferidos nas montagens.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção deste trabalho e de quem sou hoje.

*“Dinheiro não significa para mim
o que significa para outros.
Todo meu dinheiro foi investido,
em invenções que tornassem a
vida do homem mais fácil.”*

Nikola Tesla.

RESUMO

O avanço tecnológico crescente na microeletrônica resulta no lançamento de produtos eletroeletrônicos mais sofisticados e eficientes, substituindo os atuais em intervalos de tempo cada vez mais curto. Em paralelo, o custo de manutenção e reparação de equipamentos mais antigos corrobora por influenciar na decisão de sua troca, gerando estoques de aparelhos, dispositivos e componentes em desuso, todavia, ainda capazes de realizar suas funções específicas. Dessa forma, o presente trabalho traz como objetivo a recapacitação de uma fonte de alimentação DC (corrente contínua) regulada, promovendo uma reavaliação dos componentes de potência originais, como o emprego de componentes modernos. Em adição, foi desenvolvido um sistema de controle baseado em um microcontrolador moderno e um sistema de proteção para assegurar sua função original de modo seguro. Através de estudos, simulações e teste em laboratório, os sistemas propostos foram implementados fisicamente, de modo a se obter corrente ou tensão regulada nos terminais de saída do equipamento.

Palavras-chave: Recapacitação, fonte de alimentação DC, microcontrolador, corrente regulada, tensão regulada.

ABSTRACT

The increasing technological growth in microelectronics results in launching sophisticated and efficient new electro electronic products, replacing the current in short time intervals. In parallel, the cost of maintenance and repair of old equipments influences on the decision of replacement, producing stocks of unused equipments, devices and components, however, still capable to perform their specific tasks. Thus, the present work has the goal to recondition a regulated dc power supply, promoting a revaluation on original power components, as the employment of modern equipment. In addition, were developed a modern microcontroller-based control system and a protection system to ensure its original operation safely. By means of studies, simulations and testing in laboratory, the proposed systems were physically implemented, in order to obtain a regulated current or voltage in the equipment output.

Keywords: Recondition, dc power supply, microcontroller, regulated current, regulated voltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Topologia de uma fonte linear.	14
Figura 2 – Faixa de tensão de saída de uma fonte linear .	15
Figura 3 – Geração de um sinal PWM com componente fundamental senoidal.	16
Figura 4 – Sinal PWM gerado pelo Arduino de acordo com o valor de dutycycle.	16
Figura 5 – Resposta dos tipos de filtros quanto à função.	18
Figura 6 – Circuito de um filtro passa-baixa passivo.	18
Figura 7 – Resposta em frequência de um passa-baixa ideal.	20
Figura 8 – Resposta em frequência de um passa-baixa real.	20
Figura 9 – Topologias de implementação de um filtro passa-baixa RC ativo de primeira ordem.	20
Figura 10 – Diagrama de bloco de uma cadeia de processamento realizada pelo Arduino.	21
Figura 11 – Modelo comerciais da família Arduino	22
Figura 12 – Arduino Uno.	23
Figura 13 – Fonte a ser recapitada.	24
Figura 14 – Destaque do transformador, indutor e capacitor da fonte.	25
Figura 15 – Vista traseira da fonte e dos bornes de alimentação na rede elétrica.	25
Figura 16 – Placa de transistores (abaixo), diodos e tiristores (montados em dissipadores).	26
Figura 17 – Sensor ACS e sua tensão de saída em função da corrente medida.	28
Figura 18 – Ação de um eletroímã no fechamento, abertura ou comutação de contatos de um relé.	30
Figura 19 – Exemplo de driver de potência.	31
Figura 20 – Diagrama de simulação da fonte.	32
Figura 21 – Tensão (verde) e corrente (lilás) na carga.	33
Figura 22 – Placa de Transistores de Potência.	34
Figura 23 – Detalhe dos transistores na placa.	35
Figura 24 – Diagrama esquemático da montagem.	35
Figura 25 – Teste da placa de transistores e do regulador de tensão.	36
Figura 26 – Diagrama elétrico do circuito de proteção.	37

Figura 27 – Teste do circuito de proteção.	38
Figura 28 – Detalhe do circuito de proteção.	38
Figura 29 – Tensão na bobina com botão não acionado.	39
Figura 30 – Tensão na bobina com botão acionado.	39
Figura 31 – Fluxograma regulação de tensão.	40
Figura 32 – Fluxograma regulação de corrente.	40
Figura 33 – Alimentação do amperímetro (esquerda) e voltímetro (direita) analógicos.	41
Figura 34 – Trimpots de ajuste e diodos de proteção.	41
Figura 35 – Topologia simplificada da fonte.	43
Figura 36 – Vista geral da montagem da topologia simplificada da fonte.	43
Figura 37 – Topologia simplificada para modo de tensão regulada.	44
Figura 38 – (a) Circuito final em matriz de contatos; (b) Emprego dos potenciômetros de ajuste de referência: tensão e corrente.	45
Figura 39 – Tensão de referência e de saída (divisor) em função da corrente na carga para valores mostrados na tabela 4.	47
Figura 40 – Corrente de referência e de saída em função da tensão na carga para valores mostrados na tabela 5.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características básicas do microcontrolador Arduino UNO.	23
Tabela 2 – Teste de alimentação de lâmpada com ajuste de tensão.	36
Tabela 3 – Modo de Regulação de Tensão sem carga.	46
Tabela 4 – Modo de Regulação de Tensão com uma lâmpada 12V/100W como carga.	46
Tabela 5 – Modo de Regulação de Corrente com uma lâmpada 12V/100W como carga.	47

SUMÁRIO

1- Introdução	13
2- Fundamentos Teóricos	14
2.1 Topologia Básica de uma Fonte de Alimentação Linear	14
2.2 Modulação por Largura de Pulso (PWM)	15
2.3 Filtros Elétricos Analógicos	17
2.3.1 Filtro Passa-Baixa RC passivo.....	18
2.3.2 Filtro Passa-Baixa RC ativo.....	19
2.4 Arduino	21
3- Metodologia	24
3.1 Fonte Original	24
3.2 Regulador de tensão LM317T	27
3.3 Regulador LM7805	27
3.4 Sensor de Corrente ACS-712	27
3.5 Filtro RC ativo	28
3.6 Relé e Contator.....	29
3.7 Opto-acoplador.....	30
3.8 Transistor MOSFET	30
3.9 Diodos	31
4- Simulação	32
5- Implementação	34
5.1 Placa de transistores de potência	34
5.2 Circuito de Proteção	37
5.3 Algoritmo de Regulação de Tensão e de Corrente	39
5.4 Mostradores Analógicos.....	41
6- Resultados	42
6.1 Componentes da Fonte Original.....	42
6.2 Topologia de Implementação Simplificada da Fonte	42
6.3 Modos de Operação Regulados	44
6.4 Modo de Tensão Regulada	45
6.5 Modo de Corrente Regulada	47
7- Conclusão	49
Referências Bibliográficas.....	50
Anexo A – Código de Regulação Implementado no UNO Atmega 328	51
Anexo B – Diagrama Esquemático da Fonte Implementada	56

1 INTRODUÇÃO

Diante do avanço cada vez maior na área da microeletrônica, vários equipamentos e componentes modernos acabam, irremediavelmente, se tornando obsoletos em um período de tempo relativamente curto. As novas tecnologias surgem para otimizar ou mesmo substituir métodos, processos, materiais e dispositivos em busca de menor tamanho, maior produtividade e complexidade, e maior eficiência com menor consumo energético.

Paralelamente, os vários dispositivos eletroeletrônicos também estão sujeitos ao desgaste e defeitos pelo tempo e condições de uso. Quando um equipamento sofre uma avaria ou começa a apresentar um mau funcionamento, normalmente opta-se por substituí-lo por um equivalente mais moderno, influenciado em grande parte pela questão do custo-benefício, na qual em muitos casos se torna menos onerosa a compra de um equipamento novo diante de reparos ou eventuais manutenções no equipamento atual.

Tal prática termina por implicar no descarte de uma enorme quantidade de material reaproveitável. Por consequência, grandes acúmulos de componentes e carcaças de aparelhos eletroeletrônicos são formados, ocupando espaços físicos preciosos e podendo agredir o meio ambiente, por meio de contaminação de substâncias tóxicas. Uma significativa parcela destes materiais pode ser reutilizada em novas aplicações ou então receber atualizações para continuar a servir com o propósito a que foram projetados.

O presente trabalho de conclusão de curso tem por objetivo apresentar o projeto de recapacitação de uma fonte de alimentação de corrente contínua em desuso, buscando-se reaproveitar os elementos principais do circuito de força. Um estudo será feito com o intuito de se avaliar a funcionalidade dos componentes de potência do equipamento original, discutindo a necessidade de se modificar a topologia de circuito original e do emprego de componentes modernos. Em adição, será abordado o projeto de um novo sistema de controle baseado em microcontrolador moderno para assegurar a operação de regulação do aparelho e de um sistema de proteção para salvaguardar o aparelho remodelado de condições anormais de funcionamento.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

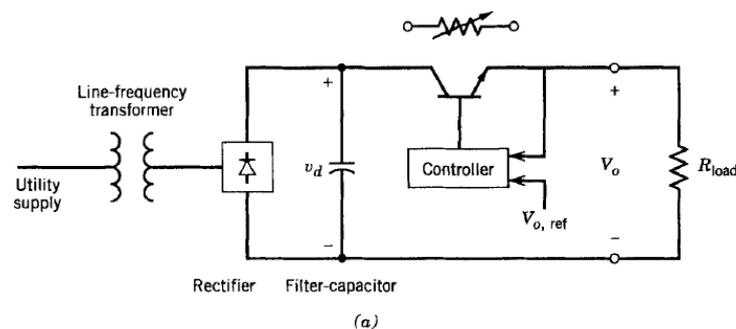
2.1 TOPOLOGIA BÁSICA DE UMA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

LINEAR

Embora os avanços na tecnologia dos semicondutores tenham dado significativas vantagens às fontes chaveadas em face às fontes lineares, estas ainda são competitivas dependendo do nível de potência desejado e por sua simplicidade.

A topologia básica de uma fonte linear está representada na figura abaixo.

Figura 1 – Topologia de uma fonte linear.

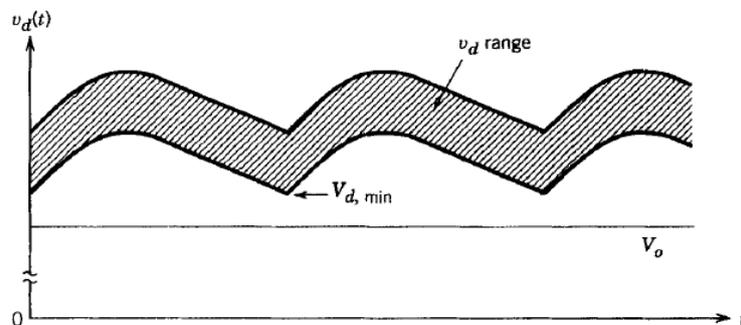


Para promover isolamento entre a saída e a entrada, um transformador na frequência da linha, isto é, 60Hz, é utilizado. Dependendo do nível de potência almejado, seu tamanho e peso podem ser consideráveis. Após o transformador, tem-se um retificador em ponte para retificar o sinal alternado da entrada AC (alternado) em DC. Em paralelo a este, um filtro capacitor é colocado para reduzir o *ripple* na tensão retificada.

Conectado em série ao arranjo anterior, o transistor (ou banco de transistores) opera em sua região linear ou ativa. Um circuito de controle compara a tensão de saída V_O com a tensão de referência V_{Ref} e ajusta a corrente de base do transistor de modo que ambas as tensões se igualem. Assim, o transistor atua como um resistor ajustável, estando submetido à diferença de tensão entre V_O e v_d e, conseqüentemente, a uma perda de potência. Para minimizar esta perda, o transformador tem sua relação de espiras cuidadosamente escolhida de forma que a tensão mínima retificada seja maior

que o valor máximo que a saída possa assumir, por uma margem pequena. A faixa de tensão de saída da fonte linear ilustrada na Figura 1 pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Faixa de tensão de saída de uma fonte linear.



A vantagem das fontes lineares, apesar do peso e tamanho do transformador na frequência da linha e das perdas de potência no transistor, reside no seu circuito mais simples, custo menor para potências inferiores a 25 W (watts) e não produzir interferência eletromagnética com outros equipamentos.

2.2 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)

Um dos métodos utilizados para controle da tensão de saída de conversores emprega chaveamento em uma frequência constante – logo, um período de chaveamento constante – e ajuste da duração do intervalo de estado ligado da chave para controlar a tensão de saída média. Neste método, chamado de modulação por largura de pulso (do inglês PWM, *pulse-width-modulation*), a razão de chaveamento (ou de trabalho), definida como a razão entre o intervalo de estado ativo e o período de tempo de chaveamento, é variada (Mohan, 2003).

Como a frequência se mantém constante e a amplitude do sinal se alterna entre dois valores ou estados (1 e -1 ou Ligado e Desligado), a variação da largura dos pulsos e, conseqüentemente, a razão de trabalho, permite transmitir o valor médio de tensão desejado. Também pode ser interpretado como um meio de se obter um sinal analógico a partir de sinais digitais, empregando-se a filtragem necessária. Sua aplicação pode ser observada em situações de regulação de potência ou modulações mais complexas, como apresentado na Figura 3 e na Figura 4.

A razão de trabalho (*dutycycle*) é definida pela seguinte expressão:

$$D = \frac{t_{on}}{T_S} \quad (1)$$

Em que t_{ON} representa o tempo de estado ligado e T_S o período de chaveamento.

Figura 3 – Geração de um sinal PWM com componente fundamental senoidal.

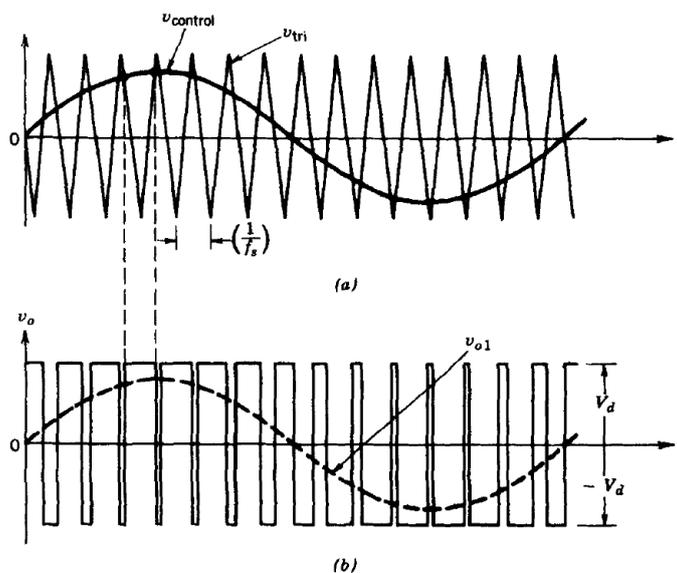
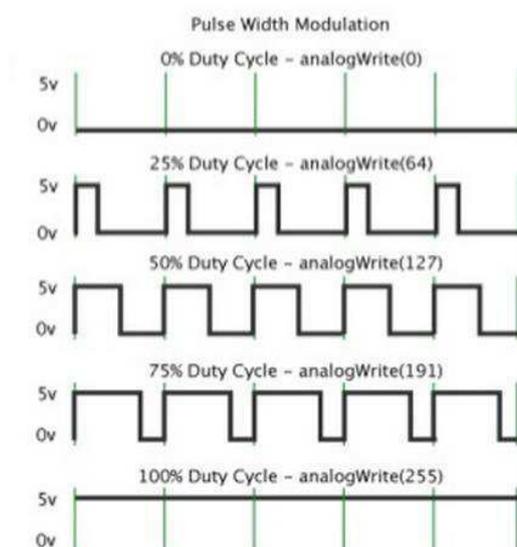


Figura 4 – Sinal PWM gerado pelo Arduino de acordo com o valor de dutycycle.



2.3 FILTROS ELÉTRICOS ANALÓGICOS

Filtros são essenciais para a operação da maioria dos circuitos eletrônicos, principalmente de sistemas de comunicação e instrumentação. Portanto, é de grande interesse no projeto de circuitos eletrônicos o desenvolvimento e emprego de filtros capazes de atender a um conjunto de especificações e requisitos, como separar sinais desejados de indesejados, amplificar ou alterar sinais e rejeitar interferências.

São circuitos que apresentam um comportamento típico em função da frequência do sinal a ele aplicado, permitindo a passagem de sinais em certas frequências ou faixa de frequência, enquanto suprime sinais com outras frequências (Mussoi, 2004). Assim, sua resposta a um sinal em sua entrada dependerá dos componentes conectados, de seus valores e da topologia da interligação.

Os filtros analógicos são caracterizados pelos elementos constituintes e pela sua função desempenhada. Quanto aos elementos empregados, podem ser:

- **Passivos:** empregam somente componentes passivos, como resistores, indutores e capacitores. Na prática, seu sinal de saída apresenta uma pequena atenuação em amplitude em comparação com o de entrada.
- **Ativos:** empregam elementos ativos como transistores e amplificadores operacionais, sendo, portanto, capazes de manter ou amplificar a magnitude do sinal de saída.

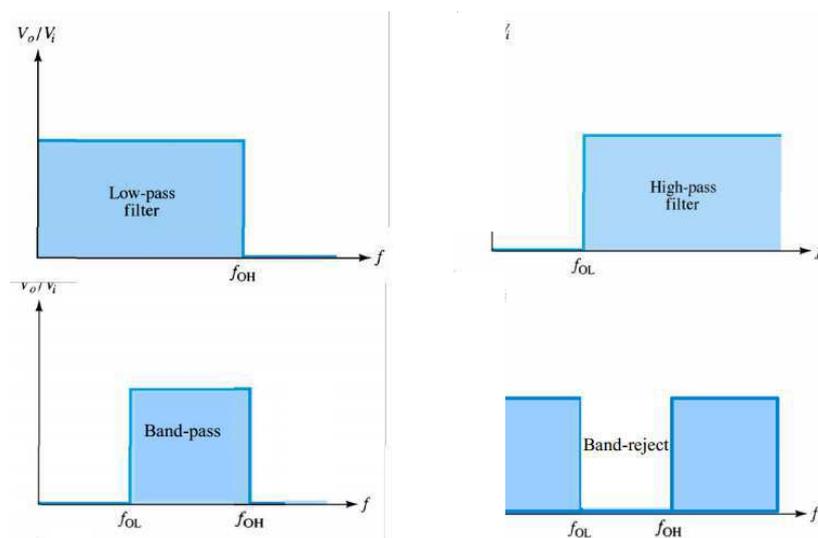
Quanto à função desempenhada, são classificados conforme listagem a seguir, ilustrada na Figura 5:

- **Passa-Baixa:** permite a passagem de sinais de frequências inferiores a um valor limite, chamado de frequência de corte, atenuando sinais nas demais frequências.
- **Passa-Alta:** atenua sinais de frequências abaixo da frequência de corte, transmitindo aqueles acima deste valor.
- **Passa-Faixa:** permite a passagem de sinais dentro de uma faixa de frequências em torno da frequência de ressonância, suprimindo os

demais que se situarem abaixo da frequência de corte inferior e acima da frequência de corte superior.

- **Rejeita-Faixa:** opondo-se ao passa-faixa, rejeita sinais dentro de uma faixa de frequências em torno da frequência de ressonância, permitindo a passagem daqueles cujas frequências estejam abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior.

Figura 5 – Resposta dos tipos de filtros quanto à função.

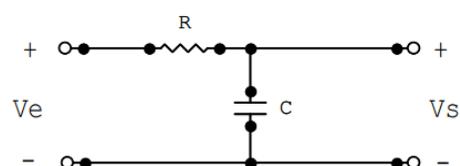


O modelo de um filtro pode ser descrito tanto por meio de equações diferenciais no domínio do tempo, como por funções de transferência no domínio da frequência. Contudo, como seu efeito nos sinais só é percebido claramente em relação ao espectro de frequências, a maioria das representações analíticas e gráficas de seu comportamento são realizadas no domínio da frequência, no qual as ferramentas matemáticas largamente empregadas se baseiam.

2.3.1 FILTRO PASSA-BAIXA RC PASSIVO

Um circuito simples de um filtro passa-baixa passivo é mostrado na Figura 6:

Figura 6 - Circuito de um filtro passa-baixa passivo.



Como dito, ele pode ser representado pela seguinte equação diferencial de primeira ordem (2):

$$V_S = V_E(1 - e^{-t/RC}) \quad (2)$$

Ou pela sua função de transferência na frequência complexa ω :

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{\frac{1}{j\omega RC}}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \rightarrow H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (3)$$

Pelas razões supracitadas, a análise relacionada à frequência é mais conveniente. Dessa forma, obtêm-se o ganho de tensão e fase que, em resumo, é o módulo e o ângulo da função de transferência na forma polar, conforme (4) e (5), respectivamente.

$$GV = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c RC)^2}} \quad (4)$$

$$\alpha = -\arct(\omega RC) \quad (5)$$

O ganho de tensão na frequência de corte é dado por (6):

$$GV |_{\omega_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (6)$$

O que resulta em (7):

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c RC)^2}} \quad (7)$$

Consequentemente, obtêm-se a expressão da frequência de corte (8):

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (8)$$

2.3.2 FILTRO PASSA-BAIXA RC ATIVO

Comparando-se as respostas do modelo ideal e do modelo real, observam-se dois fatos importantes, conforme ilustrado na Figura 7 e na Figura 8, e listado abaixo:

- O ganho do filtro não se mantém constante durante toda a sua banda passante e é reduzida a 70% na frequência de corte.
- As frequências imediatamente superiores à frequência de corte não são completamente atenuadas, ainda que respeitem critérios de projeto.

Figura 7 – Resposta em frequência de um passa-baixa ideal

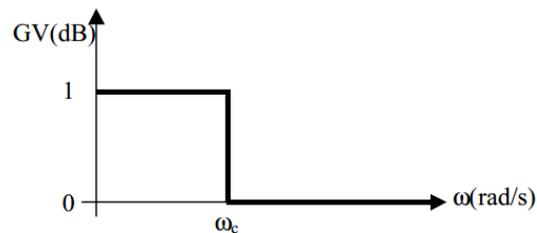


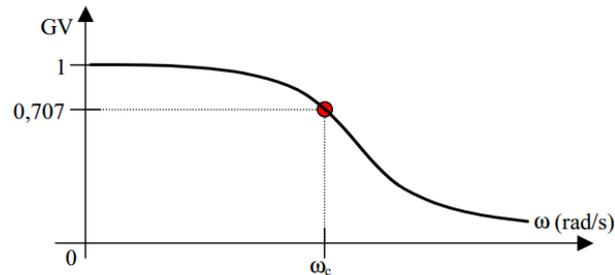
Figura 8 – Resposta em frequência de um passa-baixa real

▪ Ganho:

$$\omega = 0 \Rightarrow GV = 1$$

$$\omega = \omega_c \Rightarrow GV = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow GV = 0$$

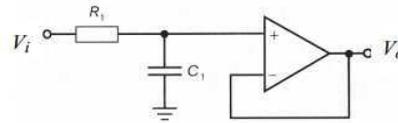


Caso haja redução no valor da magnitude do sinal filtrado ou mesmo se desejar dar ganho neste valor, então um filtro passivo RC ativo deverá ser utilizado. Há várias topologias e ordens a serem empregadas, a depender do nível de exigência de projeto. Entretanto, para filtros passa-baixa de primeira ordem, destacam-se algumas topologias de implementação, conforme destacado na Figura 9.

Figura 9 – Topologias de implementação de um filtro passa-baixa RC ativo de primeira ordem.

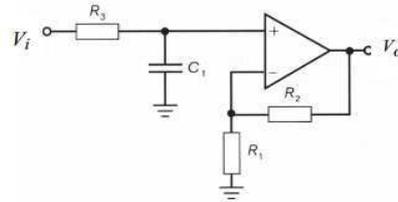
*Passa-baixo não inversor
de ganho unitário:*

$$A_v = 1 \quad , \quad f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$



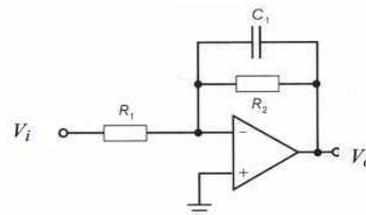
*Passa-baixo não inversor
com ganho de tensão:*

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad , \quad f_c = \frac{1}{2\pi R_3 C_1}$$



*Passa-baixo inversor
com ganho de tensão:*

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad , \quad f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$



2.4 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* baseada em hardware e software de fácil uso. É destinado a artistas, projetistas, entusiastas e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos. (Arduino, 2014).

Em termos de hardware, trata-se de uma plataforma simples de baixo custo, ancorada em microcontroladores da família Atmel, pronta para programação e disponível em placas com diversas capacidades e processadores. Reúne acessos de entrada/saída digitais, entradas analógicas (com conversor A/D interno), saídas especiais para geração de sinais PWM, e vários padrões de comunicação, seja com computadores pessoais que utilizam os diversos sistemas operacionais, seja com outros microcontroladores.

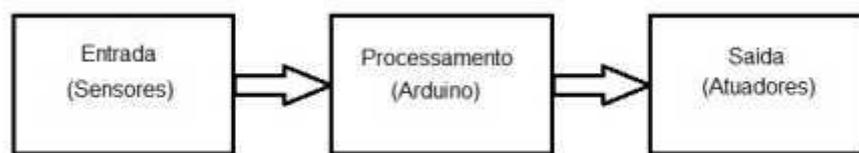
Sua programação é realizada por instruções baseadas em linguagem C/C++, porém com sintaxe mais simples e beneficiando-se do suporte de sua extensa biblioteca. Seu modo fácil de programar, aliado a uma interface simples e objetiva, facilita o desenvolvimento de programas.

Como qualquer computador, ele é capaz de receber, processar e transmitir dados. Sua capacidade é ampliada pela compatibilidade com uma vasta gama de tipos de

sensores e circuitos eletrônicos disponíveis comercialmente, aumentando consideravelmente o leque de possibilidades para desenvolvimento de projetos. Além disso, há módulos especialmente desenvolvidos para uso em sua plataforma, realizando as mais diversas funções. Assim, é nítido o reconhecimento do mercado e dos usuários sobre suas potencialidades como ferramenta eletrônica, proporcionando uma grande interação homem-máquina.

Um diagrama de blocos, de uma cadeia básica de processamento realizada em um projeto empregando a Plataforma Arduino, pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de blocos de uma cadeia de processamento realizada pelo Arduino.



Na Figura 11 são mostrados alguns modelos comerciais de placas da Família Arduino.

Figura 11 – Modelo comerciais da família Arduino.



A figura 12 ilustra um dos modelos de microcontrolador Arduino mais difundidos do mercado, o Arduino Uno. Apesar das dimensões compactas, possui capacidade de processamento e número de portas analógicas e digitais suficientes para atender grande parcela de programas desenvolvidos. Além disso, conta com portas dedicadas a gerar sinais PWM.

Figura 12 – Arduino Uno.



As características básicas do Arduino Uno são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características básicas do microcontrolador Arduino UNO.

Microcontrolador	Atmega328 (ATM328)
Pinos de entrada analógica	6
Pinos de I/O digitais	14
Tensão de operação	5 V
Tensão de alimentação (recomendada)	7-12 V
Tensão de alimentação (limites)	6-20 V
Corrente contínua por pino de I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino de 3,3 V	50 mA
Número de conversores A/D	1
Numeros de PWM	6
Frequência do PWM	490 Hz
EEPROM	1 kB
Frequência de clock	16 MHz

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi concebido com o propósito de recapacitar uma fonte de alimentação DC baseada em topologia de eletrônica linear e no emprego de reguladores e microcontrolador para regulação de tensão e corrente.

O microcontrolador escolhido foi o UNO ATMEGA 328 da plataforma Arduino por possuir capacidade de processamento suficiente o escopo do trabalho, poder gerar sinais de onda PWM e apresentar uma placa de dimensões compactas e fácil de usar. A plataforma Arduino conciliou também uma interface de programação clara em linguagem de alto nível e hardware compatível com o sensor de corrente utilizado.

3.1 FONTE ORIGINAL

A fonte de alimentação DC, objeto do estudo de recapacitação, é da marca Siemens, modelo STABIZET. É uma fonte linear que adota uma configuração semichaveada de um conversor buck, para fornecer uma tensão regulada de saída de até 32 V (volts) e corrente de saída de 30 A (ampéres). Fotografias da fonte podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13 – Fonte a ser recapacitada.



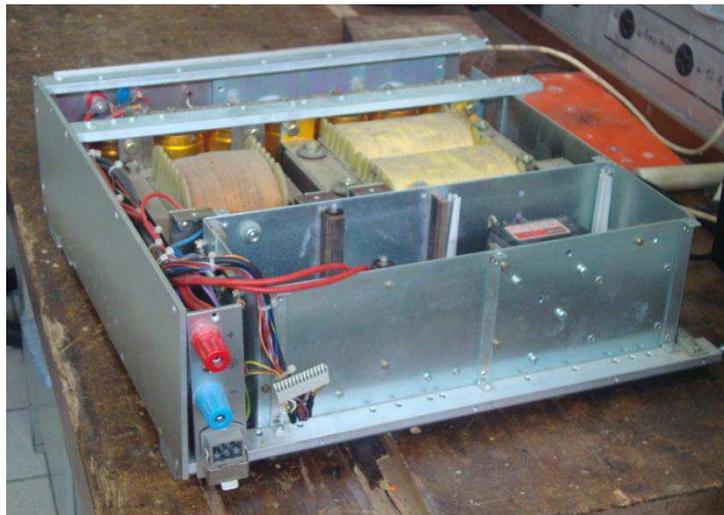
Sendo alimentada diretamente pela rede elétrica em 220 V, a fonte possuía um transformador projetado para operar na frequência da linha e suportar a corrente máxima de saída, bem como um indutor e um banco capacitivo de grande porte a fim de realizar a filtragem, caracterizando o conversor buck. O transformador e o indutor

podem ser vistos na Figura 14. Uma vista traseira do equipamento é exibida na Figura 15.

Figura 14 – Destaque do transformador, indutor e capacitor da fonte.



Figura 15 – Vista traseira da fonte e dos bornes de alimentação na rede elétrica.



Apesar de ser uma fonte relativamente antiga (o indutor e o transformador datavam de 1984) e encontrar-se em desuso há um bom tempo nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT), os três componentes supracitados, além da placa de transistores, diodos, mostradores analógicos entre outros, apresentavam um bom estado de conservação. Tais componentes podem ser vistos na Figura 16.

Sabendo-se de antemão que os componentes de força do aparelho funcionavam e poderiam ser reutilizados, foi proposto um projeto para recapacitação do mesmo, beneficiando-se do uso de componentes modernos de baixo custo, como foi elencado nos objetivos deste trabalho.

Figura 16 – Placa de transistores (abaixo), diodos e tiristores (montados em dissipadores).



Após a realização da inspeção, iniciou-se o processo de desmontagem do aparelho, buscando separar os componentes e peças que poderiam ser reaproveitados para compor o novo projeto. Partindo da ideia do reuso do grande transformador original, elaborou-se uma lista de componentes reutilizáveis.

- Transformador abaixador principal para 30A;
- Transformador abaixador 220V para múltiplas derivações;
- Banco de 6 capacitores, cada um com 6800uF/63V;
- Capacitor de 10mF/40V;
- Capacitor de 4,7mF/40V;
- Diodos de potência HFR40;
- Limitador de corrente de magnetização do transformador principal;
- Placa de transistores 2N3055;
- Voltímetro e Amperímetro Analógicos.

Alguns componentes foram submetidos a testes para se certificar se eles estavam aptos a continuar a desempenhar suas funções na fonte remodelada, com exceção do capacitor de 4,7 mF/40 V, todos tiveram sucesso.

3.2 REGULADOR DE TENSÃO LM317T

Este circuito integrado monolítico é integrante de uma família de chips que atuam como reguladores de tensão de ajuste positivo. É capaz de fornecer uma corrente de carga superior a 1,5 A com uma tensão de saída ajustável dentro de uma faixa de 1,25 a 37 V. Sua tensão nominal de saída é selecionada por meio de um divisor resistivo ligado ao seu terminal/pino de ajuste, satisfazendo a seguinte equação:

$$V_{OUT} = V_{ADJ} + 1.25 \quad (9)$$

Devido à sua tensão máxima de operação ser superior à tensão máxima que a fonte irá disponibilizar em sua saída, além da forma utilizada para ajustar a tensão no pino de ajuste, torna o dispositivo apropriado para ser utilizado no projeto.

3.3 REGULADOR LM7805

Assim como o LM317, é um regulador de tensão. Contudo, atua limitando a tensão de saída a um valor fixo, independente do valor da tensão de entrada, desde que esta se situe dentro da faixa de valores que o chip pode suportar.

Seu emprego é fundamental para que os potenciômetros responsáveis pelos ajustes dos valores de referência, tanto para tensão como para corrente, possam fornecer tensão de saída regulada e não superior a 5 V, tensão máxima que pode ser lida pelas portas do microcontrolador utilizado.

3.4 SENSOR DE CORRENTE ACS-712

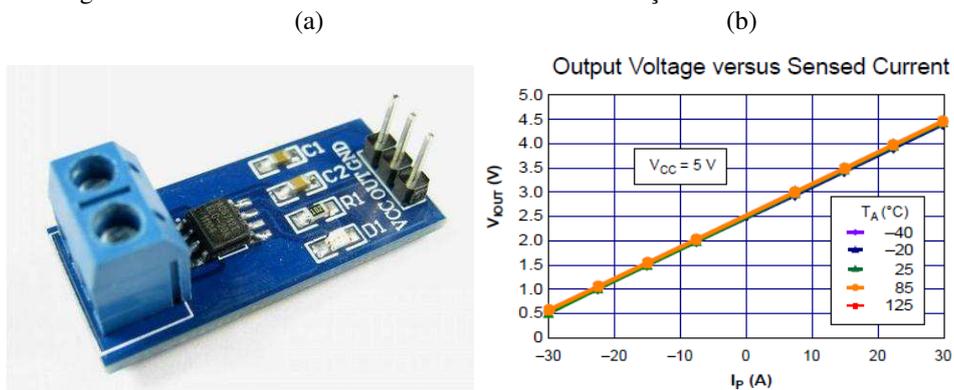
Para leitura da corrente na carga ou na saída da fonte, adotou-se o sensor de corrente ACS-712. Este é um sensor linear integrado baseado em efeito Hall, de baixo custo e aplicável para medição tanto de corrente contínua como alternada.

Possui um caminho de condução para medição de corrente isolado das demais partes do chip, possibilitando seu uso em aplicações que demandem isolamento elétrica sem a necessidade de isoladores ópticos. Quando o fluxo de corrente atravessa o

caminho de condução, produz um campo magnético que sensibiliza um circuito integrado específico, e este fornece um valor de tensão proporcional à corrente.

O modelo do sensor em questão permite ler correntes de até trinta ampéres e gera tensão de saída entre 0 e 5V, sendo ideal para uso conjunto com o microcontrolador Atmega. Outras características a serem destacadas são o fato do sensor ser bidirecional, podendo ler de -30 a 30 A; e sua sensibilidade é proporcional a tensão de alimentação, dessa forma, flutuações de tensão não implicará em erros na leitura da tensão de saída do sensor pelo conversor A/D do microcontrolador.

Figura 17 – Sensor ACS e Sua Tensão de Saída em função da corrente medida.



3.5 FILTRO RC ATIVO

Para controle da tensão no pino de ajuste do regulador LM317, um sinal PWM será fornecido pelo microcontrolador. Como mostrado na figura 4 da seção 2.2, a forma de onda PWM gerada pelo ATM328 assemelha-se a uma onda quadrada de razão de trabalho variável e de amplitude oscilando entre 0 e 5V, cujo valor médio representa um certo nível de tensão.

Para extrair o nível DC desse sinal, empregou-se um filtro RC passa-baixa com frequência de corte suficientemente pequena em comparação com a frequência do sinal PWM. O microcontrolador gera este sinal a uma frequência de cerca de 490 Hz (conforme tabela 1). Portanto, empregando um resistor de 10 k Ω e um capacitor de 10 μ F resulta numa frequência de corte de:

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \times 10^3 \cdot 10 \times 10^{-6}} = 1.59 \text{ Hz} \quad (10)$$

Em testes posteriores, definiu-se o filtro composto por um resistor de 4.62 k Ω e um capacitor de 10 μ F, resultando numa frequência de corte de 3.45 Hz, satisfazendo também a exigência de projeto.

Conforme descrito em 3.1 e através de testes anteriores, para que a tensão de saída do regulador LM317 possa atingir valores pretendidos, a tensão de ajuste deve situar-se na faixa de 0 a 15V. Como 5V é o máximo que se consegue extrair em nível DC do sinal PWM, logo é necessário dar ganho neste sinal. Empregando-se a topologia 2 da figura 9, conseguiu-se um ganho de aproximadamente 3, como mostrado em (11):

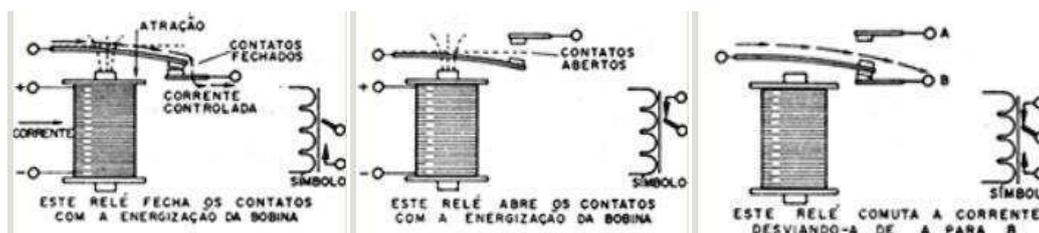
$$A_v = 1 + \frac{R_3}{R_2} = 1 + \frac{19.68k}{9.85k} = 2.998 \quad (11)$$

Os valores resistores R2 e R3 foram obtidos pela leitura com um multímetro de resistores de 10 k Ω . O uso da topologia 2 (figura 9) deveu-se à economia de espaço e praticidade de utilizar um filtro RC passa-baixo ativo com ganho de tensão não-inversor, composto de um filtro passivo e um amplificador de sinal. Em adição, colocou-se um buffer na saída do filtro, sendo ambos implementados por meio do circuito integrado TL084.

3.6 RELÉ E CONTATOR

Os relés são dispositivos comutadores eletromecânicos. É constituído basicamente de um eletroímã e uma armadura móvel, instalada próximo ao primeiro e que tem por finalidade abrir ou fechar um jogo de contatos. Quando a bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é gerado um campo magnético que age sobre a armadura, atraindo-a. Nesta atração ocorre um movimento que ativa os contatos, os quais podem ser abertos, fechados ou comutados, dependendo de sua posição, como exemplificado na figura 18.

Figura 18 – Ação de um eletroímã no fechamento, abertura ou comutação de contatos de um relé.



Os contadores seguem o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se dos relés por possuírem tanto contatos normalmente aberto quanto normalmente fechados.

Para a concepção de um circuito de proteção a ser instalado lado de alta tensão do transformador da fonte, um contator será empregado para realizar a abertura deste sob condições anormais de operação, como sobrecorrentes ou sobrecargas.

No LAT encontravam-se disponíveis modelos de contadores para contatos conectados em 220 V e com bobina acionada por tensão contínua de 12 V e de 24 V. Preteriu-se pelo modelo de 24 V, devido a sua baixa corrente de acionamento, em torno de 170 mA.

3.7 OPTO-ACOPLADOR

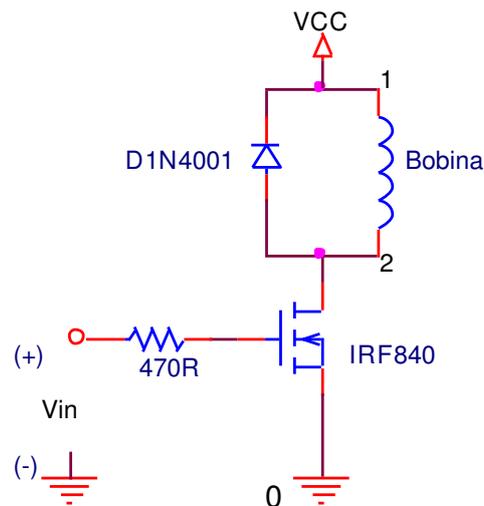
Destinado a prover isolação elétrica entre o circuito de comando e o circuito de força, o opto-acoplador será utilizado como interface entre o microcontrolador e o contator. Além dos diferentes níveis de tensão de operação (o Atmega328 trabalha com 5V e a bobina do contator com 24V), a interrupção de um circuito de características indutivas pode induzir sobretensões que podem se propagar em direção ao microcontrolador e danificá-lo, sendo, portanto, necessária a isolação fornecida pelo opto-acoplador.

Escolheu-se o modelo 4n25 da ST, disponível no laboratório, cujas características se adéquam as exigências do trabalho.

3.8 TRANSISTOR MOSFET

Enquanto a corrente fornecida pela saída digital do microcontrolador apresenta valor máximo de 40 mA, o contator 220Vca/24Vdc necessita em torno de 170 mA alimentando sua bobina para fechar/abrir seus contatos. Para resolver este problema, utilizou-se um circuito de *driver* para amplificar o sinal de alerta de modo que o mesmo pudesse sensibilizar o eletroímã adequadamente, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Exemplo de driver de potência.

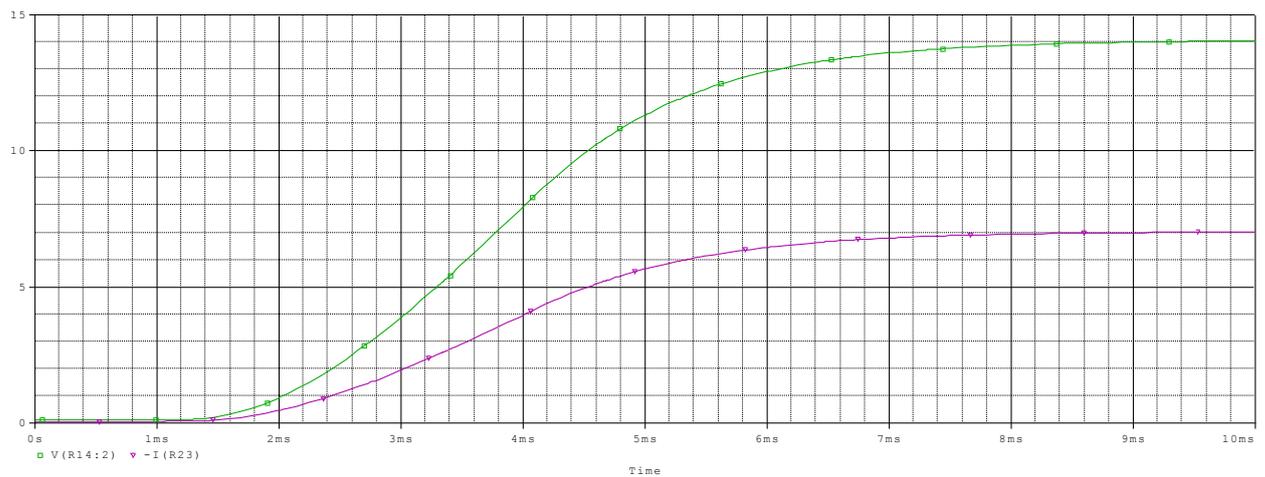


Foi utilizado um MOSFET IRF840, disponível no portfólio do LAT. Este transistor é do tipo canal-n (de uso em circuitos similar ao TBJ npn), necessitando de uma baixa tensão de ativação em seu terminal de *gate*, sendo capaz de fornecer a corrente demanda para acionamento da bobina do contator. Observou-se a necessidade de colocar um resistor entre os terminais de *gate* e *source* do dispositivo, visando evitar flutuações nestes terminais.

3.9 DIODOS

Para a proteção de vários componentes, como no regulador LM317, na saída PWM do microcontrolador, na bobina do contator e nos terminais dos medidores analógicos, empregou-se os diodos 1N4007, disponíveis no laboratório.

Figura 21 – Tensão (verde) e corrente (lilás) na carga.



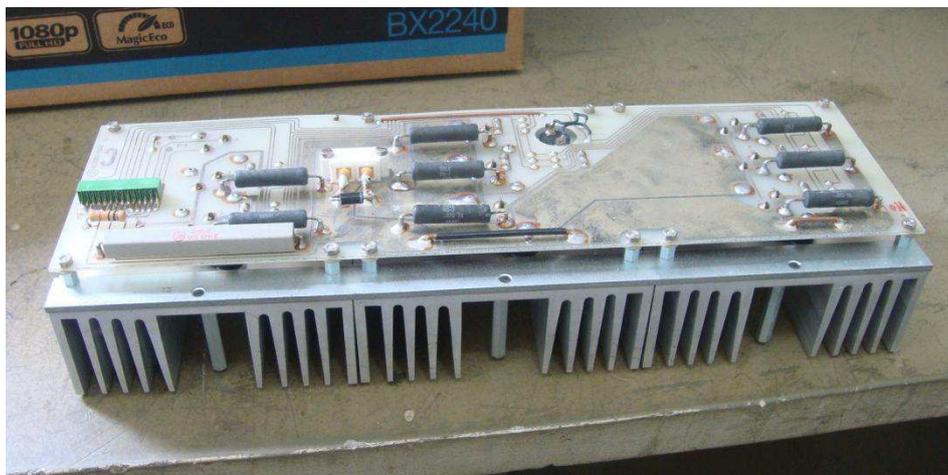
Pelo gráfico, observa-se que a saída do circuito manteve-se regulada, mesmo que o circuito gerador de sinal de ajuste para o regulador de tensão simulado fosse diferente do projetado e implementado na prática.

5 IMPLEMENTAÇÃO

5.1 PLACA DE TRANSISTORES DE POTÊNCIA

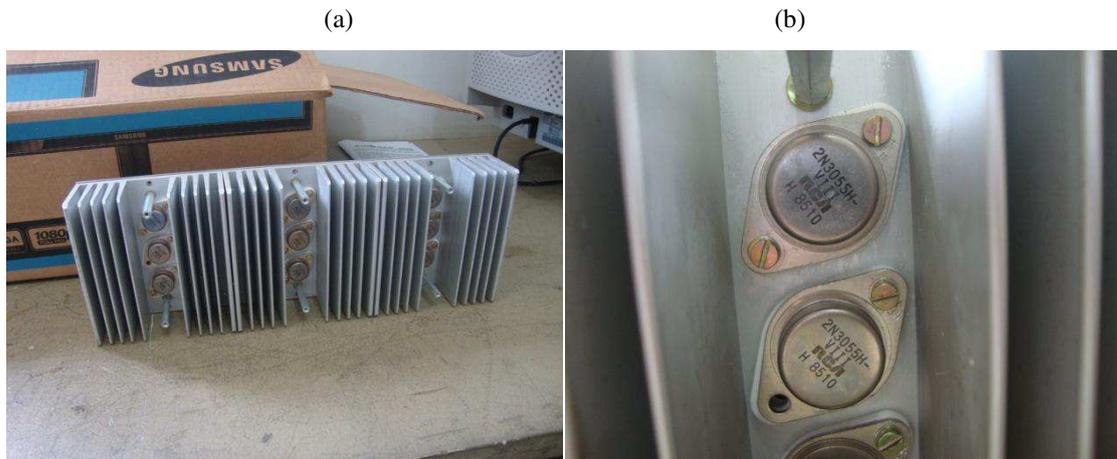
Conjuntamente com o transformador, o retificador e o banco capacitivo, a placa dissipadora, onde foi instalado o banco de transistores de potência, constituem os elementos de força principais do modelo da fonte original. Conforme explicado na seção 2.1, o banco de transistores - representado por um transistor apenas na figura 1 - é responsável por absorver a diferença de tensão entre a saída e o valor de referência, como também responde pela regulação de corrente que a fonte pode fornecer. Uma fotografia do dissipador, placa de circuito impresso e resistores associados a tais transistores pode ser vista na Figura 22. Detalhamentos podem ser vistos na Figura 23.

Figura 22 – Placa de Transistores de Potência.



A placa é constituída por nove transistores de potência, modelo 2N3055. Segundo diagramas elétricos originais da fonte em estudo, constatou-se que um dos nove transistores se comportava como “mestre” enquanto os demais eram tidos como “escravos”. Na verdade, o transistor mestre era responsável por excitar a base dos demais oito – saturando-os, assim, permitindo a condução de corrente na saída – quando recebesse sinal apropriado do circuito de comando original em sua própria base que o levasse a saturar.

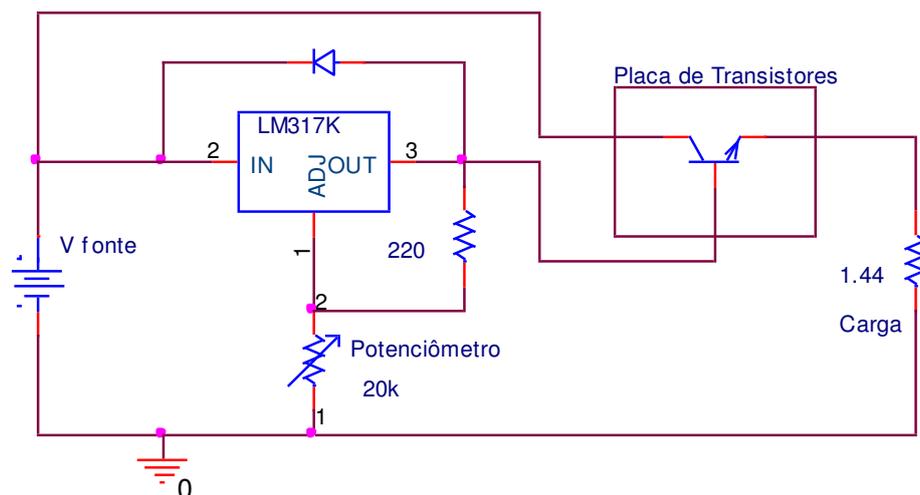
Figura 23 – Detalhe dos transistores na placa.



Após cada transistor ser testado para se confirmar se estavam operacionais, realizou-se uma montagem da placa conjuntamente com o regulador LM317 para testar a capacidade de fornecimento de tensão pelo regulador, e de corrente para a carga. Para tal, desativou-se o transistor mestre da placa, pois sua função seria realizada pelo regulador. Como carga, foi utilizada uma lâmpada automotiva, de especificação 12 V/100 W.

O diagrama esquemático apresentado na Figura 24 foi desenvolvido, utilizando os componentes indicados.

Figura 24 - Diagrama esquemático da montagem.



Uma fotografia da montagem experimental pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 – Teste da placa de transistores e do regulador de tensão.



O potenciômetro no diagrama permitia o ajuste da tensão de saída do LM317. Como resultado, obteve-se a seguinte tabela:

Tabela 2 – Teste de alimentação de lâmpada com ajuste de tensão.

V fonte	I fonte	V carga	V saída LM317	V potenciom.
25 V	0.65 A	0.08 V	1.26 V	0.0 V
25 V	2.80 A	1.25 V	2.94 V	1.68 V
25 V	4.70 A	3.67 V	5.57 V	4.30 V
25 V	6.00 A	5.66 V	7.71 V	6.10 V
25 V	7.50 A	8.00 V	10.28 V	8.98 V
25 V	8.70 A	9.93 V	12.23 V	11.07 V
25 V	8.80 A	12.09 V	14.49 V	13.24 V
25 V	9.50 A	13.03 V	15.43 V	14.23 V
25 V	9.52 A	13.99 V	16.51 V	15.20 V

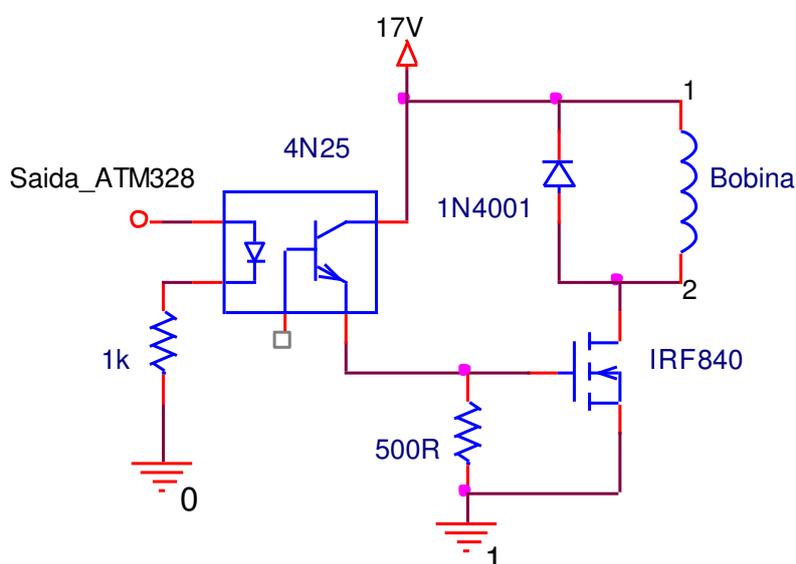
Por meio desta tabela, definiu-se o ganho de tensão que o filtro passa-baixa RC ativo deveria apresentar em sua saída.

5.2 CIRCUITO DE PROTEÇÃO

Como detalhe adicional, todavia não menos importante, foi sugerida a inclusão de um circuito de proteção para salvaguardar o circuito principal da fonte, que caracteriza sua topologia, de condições anormais de operação, sobretudo de sobrecorrentes.

O circuito foi testado por meio do acionamento de um botão simulando as condições que levariam o microcontrolador a ordenar a abertura da porção de alta tensão do circuito principal, conforme ilustrado no diagrama da figura 26.

Figura 26 - Diagrama elétrico do circuito de proteção.



Uma fotografia do teste em execução pode ser vista na Figura 27, com respectivo detalhamento na Figura 28.

Figura 27 – Teste do circuito de proteção.

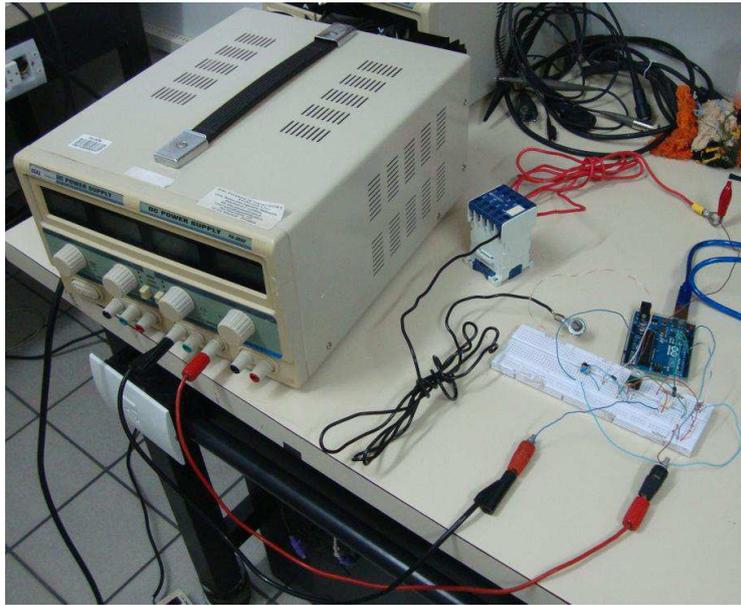
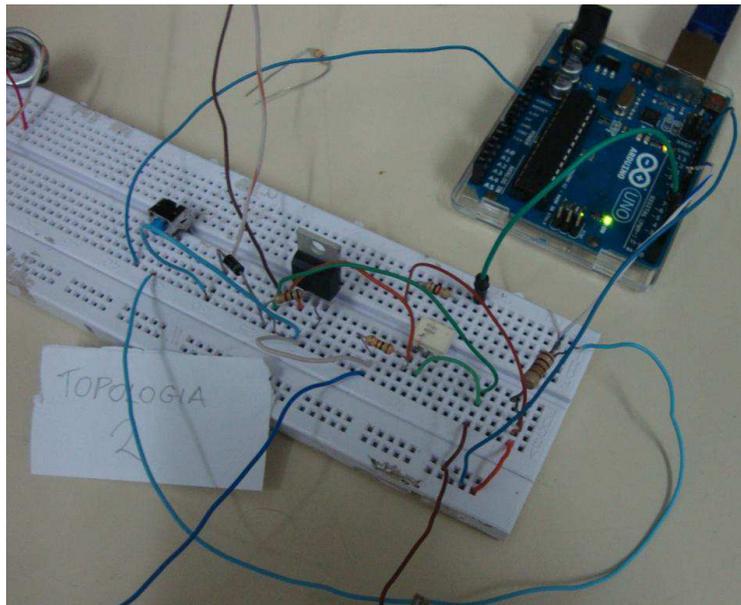


Figura 28 – Detalhe do circuito de proteção.

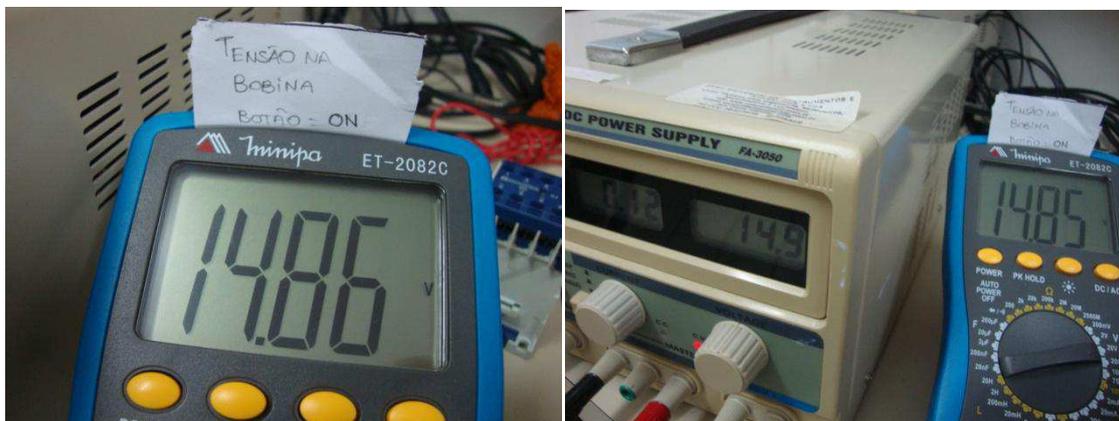


Medições de tensão na bobina do contator podem ser vistas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Tensão na bobina com botão não acionado.
(a) (b)



Figura 30 – Tensão na bobina com botão acionado.
(a) (b)



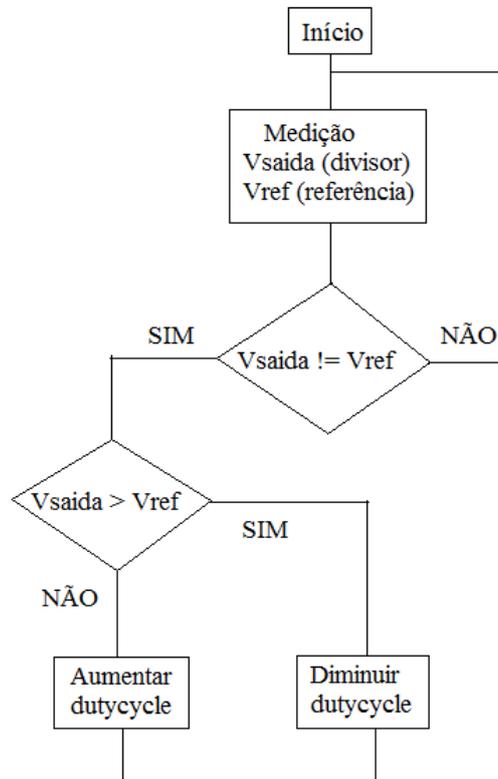
5.3 ALGORITMO DE REGULAÇÃO DE TENSÃO E DE CORRENTE

Visando adequá-la diante dos métodos de ajuste de tensão e corrente de outras fontes de alimentação em corrente contínua, determinou-se que a fonte em estudo deveria trabalhar em dois modos de operação:

- Tensão regulada na saída, em relação a uma tensão de referência;
- Corrente regulada, em relação a uma corrente de referência.

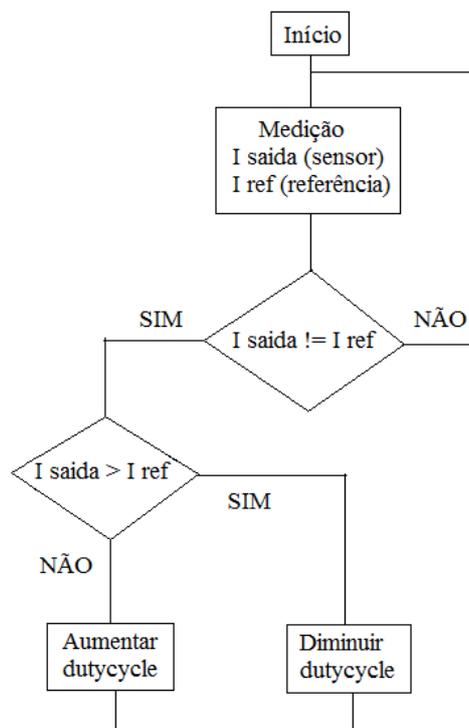
Para se alcançar o efeito de regulação da tensão na saída da fonte, foi implementado digitalmente, no software do microcontrolador, o algoritmo ilustrado no fluxograma da Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma regulação de tensão.



O algoritmo usado para regulação da corrente na saída segue estrutura análoga àquele para regulação de tensão, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Fluxograma regulação de corrente.



5.4 MOSTRADORES ANALÓGICOS

Para informar a tensão e a corrente de saída da fonte original, a mesma contava com um voltímetro e um amperímetro, ambos analógicos. A ideia foi reutilizá-los para informar estes mesmo parâmetros na fonte remodelada.

Após comprovar que os dois mostradores estavam operacionais, decidiu-se que ambos seriam alimentados com sinais PWM provenientes do ATM328. Para que os dois mostradores apresentassem medição correta de tensão e corrente, um código de ajuste do sinal PWM foi elaborado no programa de controle da fonte, pois esses parâmetros são manipulados em faixas de valores diferentes dentro do programa, e potenciômetros (do tipo *trimpot*) foram instalados em série com o terminal positivo de cada um, para calibração manual.

Para proteção dos galvanômetros, colocou-se um diodo (roda livre) entre os terminais de cada um, com o cátodo ligado aos terminais positivos, conforme pode-se observar nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Alimentação do amperímetro (esquerda) e voltímetro (direita) analógicos.

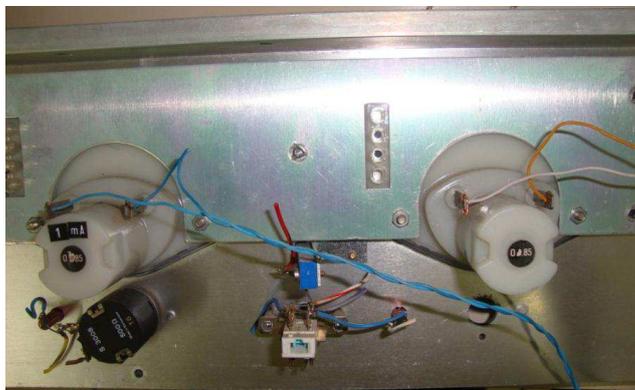
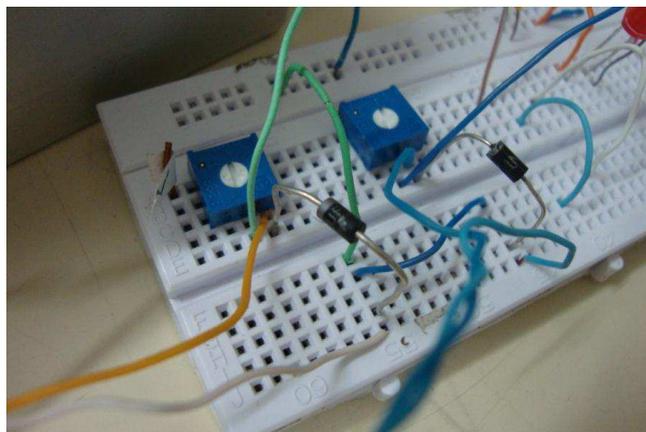


Figura 34 – Trimpots de ajuste e diodos de proteção.



6 RESULTADOS

6.1 COMPONENTES DA FONTE ORIGINAL

Como foi dito no fim da seção 3.1, os componentes originais da fonte que se pretendia reutilizar não foram todos testados e empregados. Originalmente, quando da análise dos mesmos, considerou-se que, como a tensão máxima de saída da fonte era 32 V, o transformador de potência deveria permitir o uso do LM317, ou seja, teria tensão máxima abaixo de 43 V. Contudo, testes posteriormente realizados informaram um valor de relação entre primário e secundário de 4,1:1, o que implica dizer que o transformador alimentaria a porção de baixa tensão do circuito da fonte com 53,70 V_{RMS} (para 220 V_{RMS} na entrada), portanto, inviabilizando o uso do regulador citado.

Como boa parte dos demais blocos funcionais da fonte estavam projetados e construídos, optou-se por testar o circuito de regulação e controle por meio de uma fonte de alimentação, de modo a disponibilizar tensão contínua para a porção de baixa tensão da fonte alvo do projeto. Apesar deste contratempo, empregou-se a placa de transistores e os mostradores analógicos.

6.2 TOPOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO SIMPLIFICADA DA FONTE

De acordo com as mudanças realizadas, elencadas na seção 6.1, empregou-se uma topologia simplificada da fonte em que a placa de transistores, o regulador de tensão de saída, os reguladores de tensão para ajuste de referência e, conseqüentemente, a carga, receberiam potência provinda de uma fonte de alimentação disponível no laboratório. O circuito implementado é mostrado na Figura 35. Nas Figuras 36 e 37 relativas às montagens, uma segunda fonte fornece tensão simétrica para operação dos amplificadores operacionais.

Figura 35 – Topologia Simplificada da Fonte

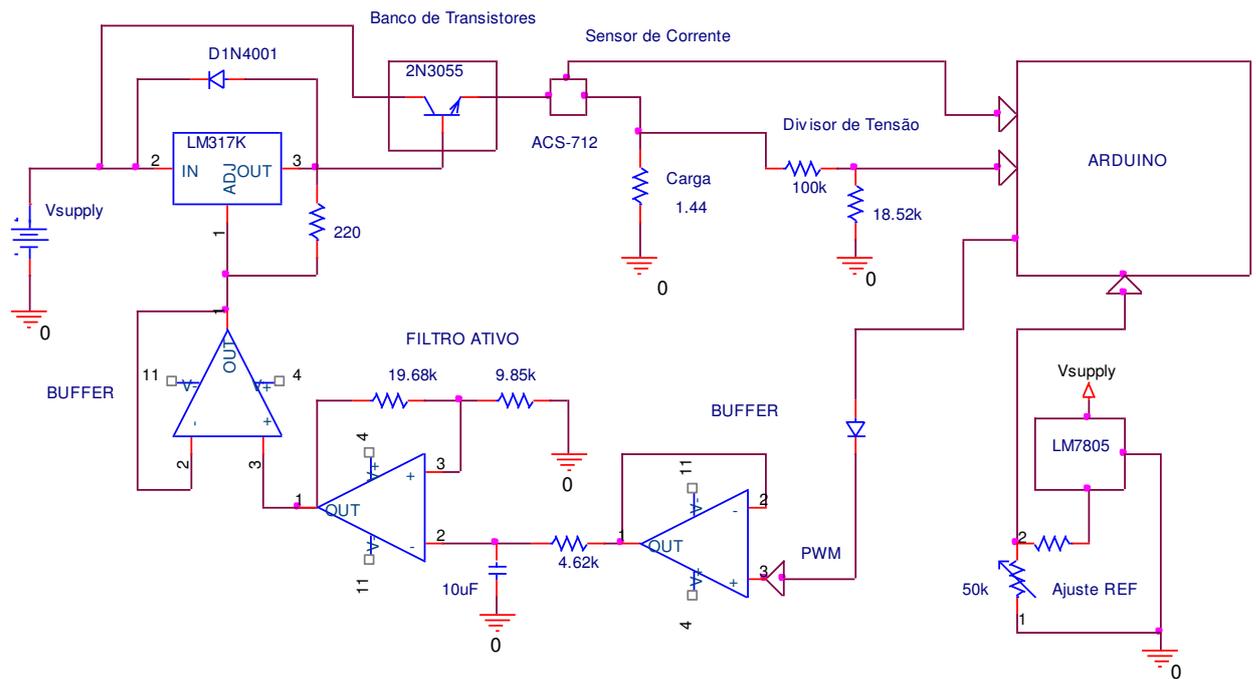


Figura 36 – Vista geral da montagem da topologia simplificada da fonte.

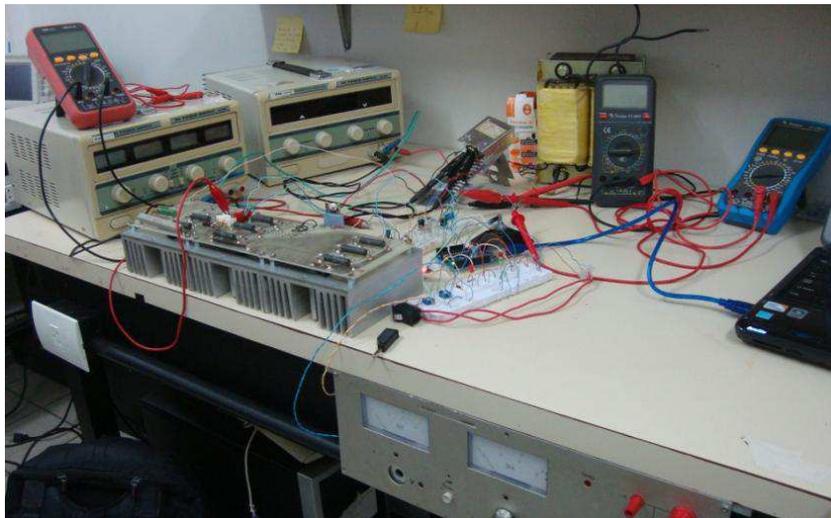
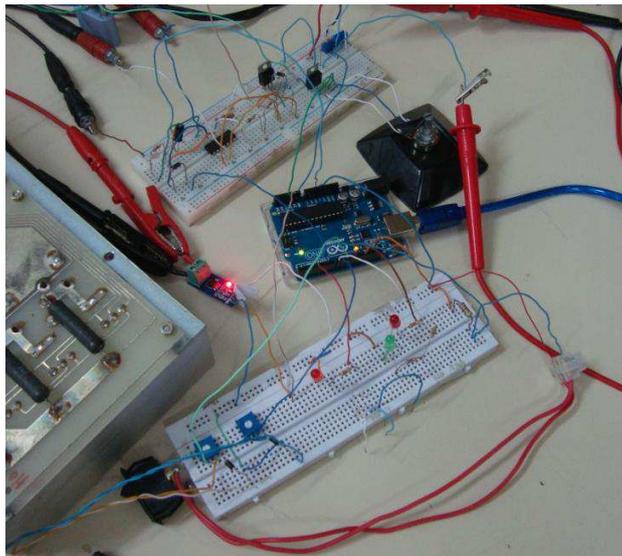


Figura 37 – Topologia simplificada para modo de tensão regulada.



Na Figura 37, nota-se que é utilizado um potenciômetro para ajuste da tensão de referência, sendo, então, alimentado pelo regulador LM7805, de modo a fornecer um valor estável de tensão que será lido pelo microcontrolador. Posteriormente, foram empregados dois potenciômetros e dois reguladores LM7805.

Outro detalhe a se destacar é que, em virtude do sensor de corrente empregado não conseguir ler valores de corrente acima de 19 A, estabeleceu-se que a corrente máxima a ser fornecida pelo circuito seria de 15 A, e qualquer valor acima disso sensibilizaria o circuito de proteção.

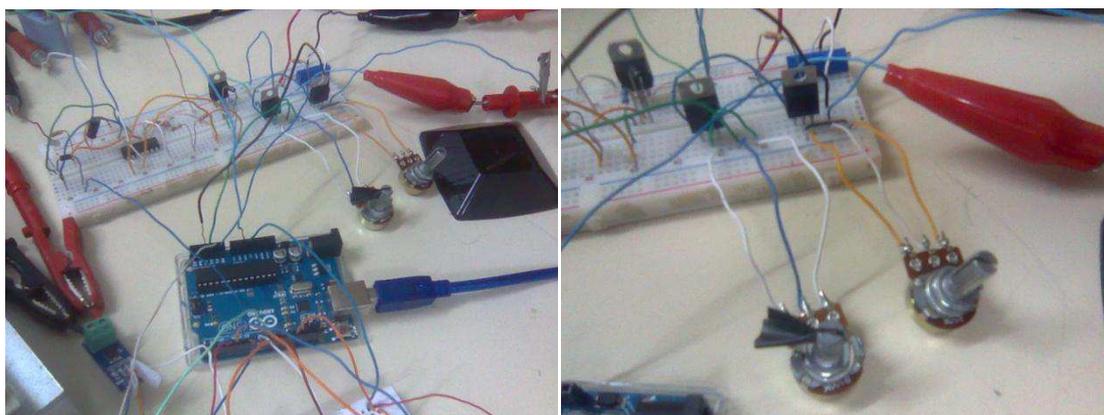
6.3 MODOS DE OPERAÇÃO REGULADOS

A fonte projetada apresenta dois modos de operação: de corrente ou de tensão regulada, selecionados por meio de um botão. O microcontrolador interpreta em que posição encontra-se o botão, escolhendo a parte do código de controle referente a cada modo. Ele, então, realiza as leituras de tensão na carga, feita por meio de um divisor resistivo; da corrente na saída, informada pelo ACS-712; e do potenciômetro de ajuste da referência da grandeza escolhida para regulação, processando os ajustes na razão de trabalho dos sinais PWM, para ajuste da tensão do regulador LM317 e para alimentação do voltímetro e do amperímetro. Por fim, o LM317 fornece a tensão de saída e ajusta a corrente na carga por meio do banco de transistores.

Duas abordagens foram empregadas no programa de regulação dos modos de operação (de corrente e tensão regulada). A primeira foi utilizar o ajuste de referência da outra grandeza, não utilizada para regulação do modo escolhido, para proteção do circuito, definindo um limite de operação seguro, caso não fosse obedecido, o microcontrolador ordenaria a abertura do circuito.

Tal abordagem mostrou-se inviável por ser complexo definir os limites de tensão e de corrente, baseados apenas na leitura de tensão dos potenciômetros de ajuste (na faixa entre 0 e 5V). Dessa forma, a fim de se aproximar do método utilizado pelas fontes comerciais, definiu-se que o ajuste de referência da grandeza não regulada estabeleceria o limite de regulação dinamicamente, isto é, caso fosse ultrapassado, a regulação do modo escolhido seria bloqueado, sendo restabelecida depois de ajustada a referência não regulada.

Figura 38 – (a) Circuito final em matriz de contatos;
 (b) Emprego dos potenciômetros de ajuste de referência: tensão e corrente.



6.4 MODO DE TENSÃO REGULADA

Relaciona-se nas Tabelas 3 e 4, a regulação de tensão de saída da fonte, em relação ao valor definido pelo ajuste de referência, para duas situações distintas: sem carga e com carga. A Figura 39 ilustra os resultados da Tabela 4.

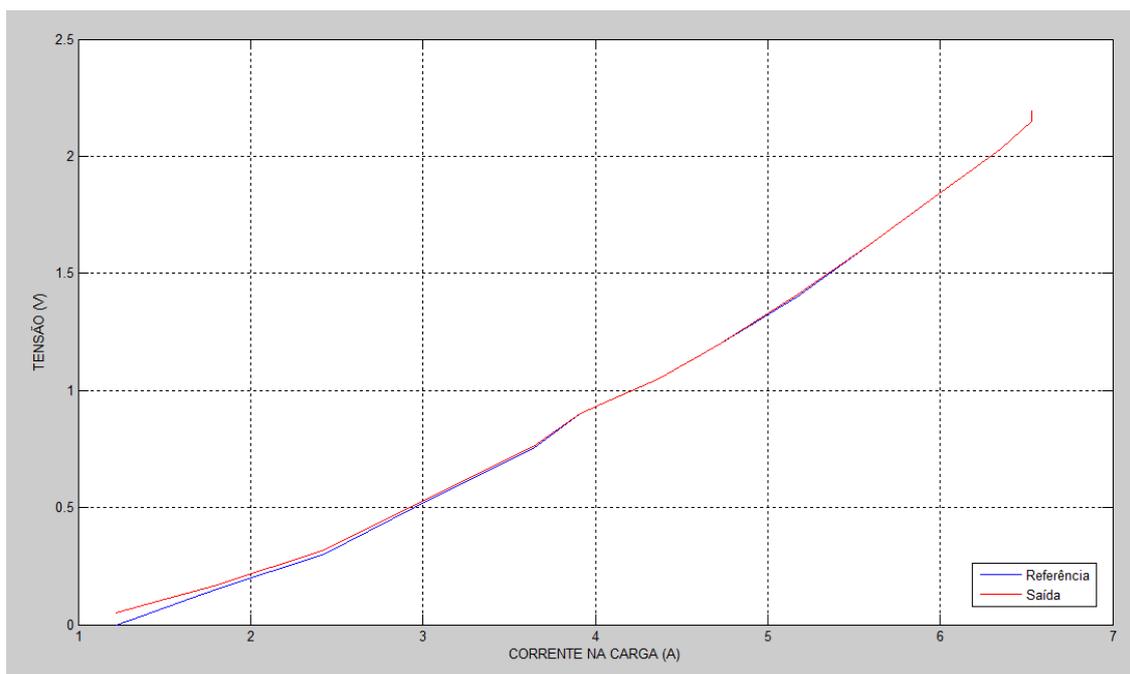
Tabela 3 – Modo de Regulação de Tensão sem carga.

V supply (V)	V ampop (V)	V carga (V)	V divisor (V)	V referência (V)	I carga (A)
19.93	15.02	0.99	0.15	0.0	0.0
19.93	15.02	1.76	0.26	0.21	0.0
19.93	15.02	2.30	0.33	0.30	0.0
19.93	15.02	3.50	0.52	0.50	0.0
19.93	15.02	5.30	0.80	0.80	0.0
19.93	15.02	8.29	1.26	1.25	0.0
19.93	15.02	10.51	1.60	1.60	0.0
19.93	15.02	12.41	1.90	1.89	0.0
19.93	15.02	13.81	2.11	2.10	0.0
19.93	15.02	15.22	2.33	2.33	0.0
19.93	15.02	15.22	2.33	2.55	0.0

Tabela 4– Modo de Regulação de Tensão com uma lâmpada 12V/100W como carga.

V supply (V)	V ampop (V)	V carga (V)	V divisor (V)	V referência (V)	I carga (A)
24.60	15.00	0.37	0.05	0.0	1.22
24.60	15.00	1.19	0.17	0.15	1.81
24.60	15.00	2.13	0.32	0.30	2.43
24.60	15.00	3.23	0.51	0.50	2.95
24.60	15.00	4.80	0.76	0.75	3.64
24.60	15.00	5.76	0.90	0.90	3.91
24.60	15.00	6.69	1.05	1.05	4.37
24.60	15.00	7.69	1.20	1.20	4.73
24.60	15.00	9.03	1.41	1.40	5.17
24.60	15.00	10.31	1.61	1.61	5.57
24.60	15.00	11.55	1.80	1.80	5.92
24.60	15.00	12.92	2.03	2.03	6.35
24.60	15.00	13.63	2.15	2.15	6.53
24.60	15.00	13.64	2.20	2.18	6.53

Figura 39 – Tensão de referência e de saída (divisor) em função da corrente na carga para valores mostrados na tabela 4.



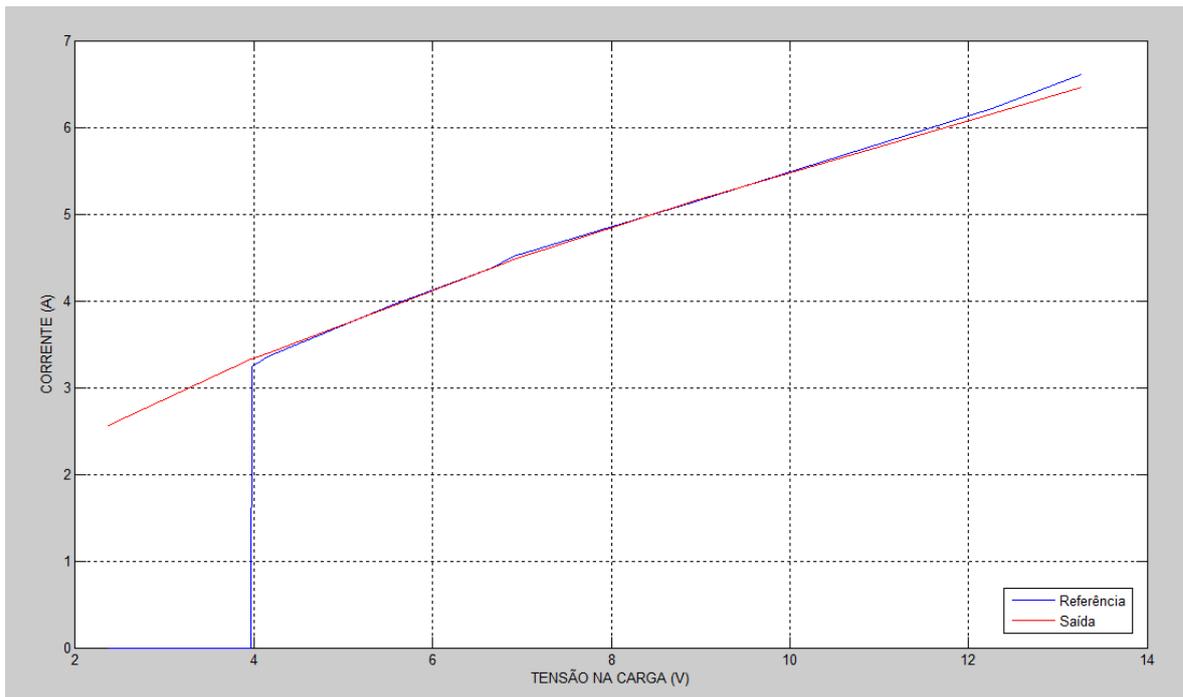
6.5 MODO DE CORRENTE REGULADA

A regulação de corrente na saída, utilizando a lâmpada como carga, é ilustrada na Tabela 5 e na Figura 40:

Tabela 5 - Modo de Regulação de Corrente com uma lâmpada 12V/100W como carga.

V supply (V)	V ampop (V)	V carga (V)	I carga (A)	I referência (V)	I referência (A)
20.20	12.00	2.37	2.56	0.0	0.0
20.20	12.00	3.97	3.33	0.0	0.0
20.20	12.00	3.98	3.33	1.08	3.24
20.20	12.00	4.17	3.40	1.12	3.36
20.20	12.00	5.50	3.92	1.31	3.93
20.20	12.00	6.66	4.38	1.46	4.38
20.20	12.00	6.90	4.47	1.50	4.51
20.20	12.00	8.94	5.15	1.71	5.14
20.20	12.00	12.26	6.16	2.07	6.22
20.20	12.00	13.27	6.46	2.20	6.61

Figura 40 – Corrente de referência e de saída em função da tensão na carga para valores mostrados na tabela 5.



7 CONCLUSÃO

Neste documento, foi proposto a recapacitação de uma fonte de alimentação de regulada, por meio da reavaliação de seus componentes originais de potência, do uso de componentes modernos e do desenvolvimento de um sistema de controle baseado em um microcontrolador.

Para alcançar estas metas, elaborou-se um algoritmo para regulação de corrente e de tensão, implementado em um microcontrolador Atmega328. Este algoritmo permite a escolha de dois modos de operação regulados, cuja estabilização da grandeza de saída – seja corrente e tensão – em relação a uma referência, é atingida por meio da ação do microcontrolador sobre um regulador de tensão, e deste num banco de transistores, para controlar a corrente.

Destaca-se também o desenvolvimento de um sistema de proteção, baseado na ação de um contator para abrir o circuito na eventualidade de condições anormais de operação, como a constatação de sobrecorrentes. Para garantir segurança da central de processamento, um dispositivo de isolamento elétrica por meio óptico foi utilizado.

Apesar de um protótipo não ter sido embarcado, os objetivos propostos foram alcançados através da implementação em circuito de uma topologia simplificada da fonte abordada, conciliando o reuso de componentes originais da fonte, como o banco de transistores e os mostradores analógicos, com a operação desejada do sistema de controle, obtendo-se corrente ou tensão regulada na saída do aparelho. Coloca-se como perspectiva de trabalho a substituição do LM317 por um circuito que possa trabalhar com a tensão de saída do transformador da fonte.

Ressalta-se que a principal contribuição desse trabalho foi descrever e fornecer módulos simples para construção de um sistema mais complexo e passível de refinamento, além de elencar uma metodologia que pode ser aplicada em futuros trabalhos que busquem abordar a temática da reusabilidade de materiais e componentes eletroeletrônicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arduino.** Arduino. *Arduino*. [Online] 27 de Novembro de 2014. www.arduino.cc
- Instituto Newton C Braga.** Instituto Newton C Braga. *Tudo sobre Relés* [Online] 20 de Novembro de 2014. <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/597-como-funcionam-os-reles.html> e <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/597-como-funcionam-os-reles?showall=&start=5>
- Gaier, M. B.** *Aprendendo a Programar em Arduino*. PET. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso. Cuiabá.
- Liraeletronica.** Liraeletrônica. *Material Didático* [Online] 27 de Novembro de 2014. <http://liraeletronica.weebly.com/material-didaacutetico.html>
- Mohan, N.** *Power Electronics- Converters, Applications and Design*. Ed. Wiley & Sons Inc, 2003. Third Edition.
- Mussoi, F. L. R.** *Resposta em Frequência - Filtros Passivos*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Gerência Educacional de Eletrônica. Florianópolis, 2004
- Rubasinghe, A.** EDN. *Control na LM317 with a PWM signal* [Online] 30 de Setembro de 2014. <http://www.edn.com/design/analog/4363990/Control-an-LM317T-with-a-PWM-signal>
- Sedra, Adel S. e Smith, K. C..** *Microeletrônica*. Pearson, 2007. 5ª Edição
- Souza, F.** Embarcados. *Arduino – Entradas Analógicas* [Online] 20 de Outubro de 2014. <http://www.embarcados.com.br/arduino-entradas-analogicas/>

ANEXO A – CÓDIGO DE REGULAÇÃO

IMPLEMENTADO NO UNO ATMEGA 328

```
/* Programa de Regulação de Tensão e Corrente da Fonte de Alimentação DC 32V-15A STABIZET */
```

```
//Definição de variáveis em pinos
```

```
#define vSensor A0    // define pino A0 para ler tensão na carga
#define iSensor A1    // define pino A1 para ler corrente na carga via sensor ACS-712
#define vKnob A2      // define pino A2 para ler valor de tensão do Knob (V) da Fonte
#define iKnob A3      // define pino A3 para ler valor de corrente do Knob (A) da Fonte

#define pwmLM 6       // define pino 6 pwm para ajustar o LM317T
#define pwmVmed 10    // define pino 10 pwm para alimentar medidor de tensão
#define pwmImed 9     // define pino 9 pwm para alimentar medidor de corrente
#define knockOut 4    // define pino 4 para enviar sinal para optoacoplador - irf840 acionar contator e
desarmar o circuito

#define led1 8        // define pino 8 para o led de aviso de mudança de escala do VU de tensão
#define led2 12       // define pino 12 para o led de aviso de corrente superior a 15A no VU de corrente
#define led3 4        // define pino 4 para o led de aviso se opMode está ON ou OFF
#define led4 7        // define pino 7 para led de teste da condição de proteção
#define button 5      // define pino 5 para botão de teste de circuito de proteção
```

```
float vLoad;
```

```
float iLoad;
```

```
float vRef;
```

```
float iRef;
```

```
int duty = 1;    // define valor inicial para dutycycle
```

```
int opMode = 2;  // define pino digital 2 para botão de seleção de Modo de Operação
```

```
int d1;
```

```
int d2;
```

```
int lim = 30;    // valor de iterações para leitura analógica dos sensores de V e I
```

```
// Inicialização de variáveis
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
  pinMode(opMode, INPUT);
```

```

pinMode(knockOut, OUTPUT);
pinMode(led1, OUTPUT);
pinMode(led2, OUTPUT);
pinMode(led3, OUTPUT);
pinMode(led4, OUTPUT);
pinMode(button, INPUT);

digitalWrite(knockOut, LOW); // Coloca em Nível Baixo saída de controle para Proteção do
Circuito Geral
digitalWrite(led1, LOW);
digitalWrite(led4, LOW);
}

// Laço do Programa
void loop()
{
// Seleciona-se Modo de Operação via chave opMode

if(digitalRead(opMode) == LOW) // ----- Escolhe-se Modo Tensão Regulada ----- //
{
digitalWrite(led3, LOW);
float cIR = 0;
float cIL = 0;
float cVR = 0;
float cVL = 0;
for (int i=0; i< lim; i++){
cIR = cIR + analogRead(iKnob); // Lê valor entre 0 e 1023
cIL = cIL + analogRead(iSensor); // Lê valor entre 512 ( outACS = 2,5V -> 0A) e 918 (outACS
= 4,48V -> 15A)
cVR = cVR + analogRead(vKnob); // Lê valor entre 0 e 1023
cVL = cVL + analogRead(vSensor); // Lê valor entre 0 e 1023 (Lê a tensão da carga via divisor
de tensão com 32V out -> 5V in)
}
float adj = cIR/lim;
iRef = map(adj, 0, 1023, 512, 918); // Assume valor de 512 a 918
iLoad = cIL/lim; // Assume valor de 512 a 917,52
vRef = cVR/lim; // Assume valor entre 0 e 1023
vLoad = cVL/lim; // Assume valor entre 0 e 1023

if(iLoad > 1.1*iRef){

```

```

digitalWrite(led4, LOW);

if(vLoad != vRef)      /* Regulação da Tensão - Vdc */
{
  if(vLoad < vRef)     // Testa condição
  {
    duty = duty + 1;   // Aumenta o dutycycle do PWM
    if(duty > 255) {
      duty = 255;     // Fixa o valor máximo de dutycycle
    }
  }
  else {               // vLoad > vRef
    duty = duty - 1;   // Diminui o dutycycle do PWM
    if(duty < 1) {
      duty = 0;       // Fixa o valor mínimo de dutycycle
    }
  }
}
}
}
else{
digitalWrite(led4, HIGH);
}
} // ----- Fim do opMode LOW-----//
//
//
//
if(digitalRead(opMode) == HIGH) // ----- Escolhe-se Modo Corrente Regulada ----- //
{
  digitalWrite(led3, HIGH);
  float cVR = 0;
  float cVL = 0;
  float cIR = 0;
  float cIL = 0;
  for (int i=0; i< lim; i++){
    cVR = cVR + analogRead(vKnob);    // Lê valor entre 0 e 1023
    cVL = cVL + analogRead(vSensor);  // Lê valor entre 0 e 1023 (Lê a tensão da carga via divisor
de tensão com 32V out -> 5V in)
    cIR = cIR + analogRead(iKnob);    // Lê valor entre 0 e 1023

```

```

    cIL = cIL + analogRead(iSensor);    // Lê valor entre 512 ( outACS = 2,5V -> 0A) e 918 (outACS
= 4,48V -> 15A)
    }

    vRef = cVR/lim;        // Assume valor entre 0 e 1023
    vLoad = cVL/lim;      // Assume valor entre 0 e 1023

    float adj = cIR/lim;
    iRef = map(adj, 0, 1023, 512, 918);    // Assume valor de 512 a 918
    iLoad = cIL/lim;          // Assume valor de 512 a 917,52

    if(vLoad > 1.1*vRef){

        digitalWrite(led4, LOW);

        if(iLoad != iRef)        /* Regulação da Corrente - Idc *
        {
            if(iLoad < iRef)      // Testa condição
            {
                duty = duty + 1;  // Aumenta o dutycycle do PWM
                if(duty > 255) {
                    duty = 255;   // Fixa o valor máximo de dutycycle
                }
            }
            else {                // iLoad > iRef
                duty = duty - 1;  // Diminui o dutycycle do PWM
                if(duty < 1) {
                    duty = 0;     // Fixa o valor mínimo de dutycycle
                }
            }
        }
    }
    else{
        digitalWrite(led4, HIGH);
    }
} //----- Fim de opMode = HIGH -----//
//
//
//if(iLoad > 920) {            // Testa se corrente de carga superou os 15 ampéres máximos
permitido

```

```

    // digitalWrite(knockOut, HIGH);    // Acione o relé/contator e abra o circuito
//}
//
analogWrite(pwmLM, duty);    // Envia sinal de PWM para o LM317
//
//
// ----- Alimentação dos VU's de Tensão e Corrente ----- //

// ***** Voltímetro *****
if(vLoad <= 512.00){          // Mostra de 0 - 16V
    d1 = map(vLoad, 0, 544, 0, 255);    // Mapeia de 0 - 17V
    digitalWrite(led1, LOW);
    analogWrite(pwmVmed, d1);
}
if(vLoad > 512.00){          // Mostra acima de 16 - 32V
    d1 = map(vLoad, 479, 1023, 0, 255);    // Mapeia de 15 - 32V
    digitalWrite(led1, HIGH);
    analogWrite(pwmVmed, d1);
}

// ***** Amperímetro *****
if(vLoad > 0 && iLoad >= 512){
    if(iLoad < 918){          // Mostra de 0 - 15 A
        d2 = map(iLoad, 512, 918, 0, 255);    // Mapeia de 0 - 15 A
        digitalWrite(led2, LOW);
        analogWrite(pwmImed, d2);
    }
    else{
        d2 = 538;              // Caso maior que 15A, acenda o led e coloque o VU em escala 1
        digitalWrite(led2, HIGH);
        analogWrite(pwmImed, d2);
    }
}
// Fim do Laço --- Retorno ao Início

```

ANEXO B – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA FONTE IMPLEMENTADA

