

FONTE REGULAVEL DE 0-30V/2A

RESUMO

A fonte de alimentação linear regulada 0-30V/3A é um projeto que implementa regulação linear série com múltiplos estágios de controle e proteção. O circuito utiliza um transformador de 24V AC conectado a uma ponte retificadora de onda completa, seguido por sistema de filtragem em cascata para garantir baixo ripple na saída. O estágio de entrada foi projetado para suportar as demandas de corrente e tensão do circuito. A regulação é realizada por três amplificadores operacionais que monitoram e controlam precisamente a tensão e corrente de saída. O estágio de potência utiliza um transistor série 2SD1047 com circuito driver complementar para controle. O projeto permite ajuste contínuo de tensão de 0 a 30V e corrente até 3A, com transição automática para modo corrente constante quando necessário. O sistema incorpora proteções contra sobrecorrente e provisão para ventilação forçada. O projeto como um todo demonstra uma implementação robusta combinando regulação linear tradicional com recursos modernos de proteção e monitoramento. As especificações técnicas garantem regulação de linha e carga inferior a 0,01%, ripple menor que 0,01% e precisão de tensão de $\pm 0,1\%$, características essenciais para aplicações laboratoriais que exigem fonte de alimentação estável e precisa. A placa de circuito impresso apresenta layout em dupla face com dimensões 84x84mm, incorporando segregação de planos de terra e isolamento estratégica entre circuitos de potência e sinal. O dimensionamento dos componentes considera margens de segurança adequadas, como os diodos retificadores 1N5408 especificados para 3A/1000V e capacitores com tensão de trabalho 50V. O projeto prevê ainda possibilidade de expansão através de conexão em série ou paralelo de múltiplas unidades.

¹Anderson Andrade é acadêmico do 5º período do Curso Superior de Engenharia da Computação na Faculdade de Tecnologia de Curitiba, em Curitiba-Pr

²Jamilly Vitória Franco Nichele é acadêmica do 5º período do Curso Superior de Engenharia da Computação na Faculdade de Tecnologia de Curitiba, em Curitiba-Pr

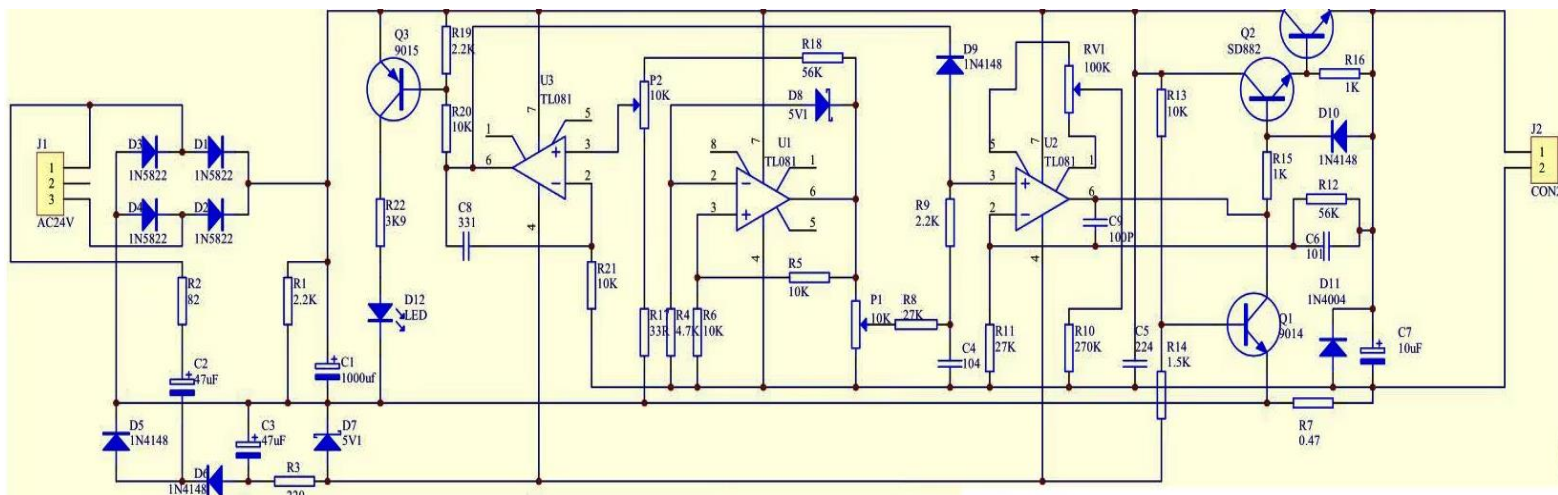
³Victor Hugo Manasczek de Souza é acadêmico do 3º período do Curso Superior de Engenharia da Computação na Faculdade de Tecnologia de Curitiba, em Curitiba-Pr

⁴Wesley Prestes Pereira é acadêmico do 5º período do Curso Superior de Engenharia da Computação na Faculdade de Tecnologia de Curitiba, em Curitiba-Pr

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1 DIAGRAMA ELETRÔNICO | 3 |
| 1.1 Análise | 3 |
| 2 DIAGRAMA PCI (TRILHAS E COMPONENTES)..... | 6 |
| 2.1 Análise | 8 |
| 1 FUNCIONAMENTO..... | 10 |
| 1.1 Componentes | 10 |
| 1.2 Entrada(CA)..... | 13 |
| 1.3 Retificação(CC) | 14 |
| 1.4 Filtragem(CC)..... | 15 |
| 1.6 Funcionamento Geral | 17 |

1 DIAGRAMA ELETRÔNICO



1.1 Análise

O circuito constitui uma fonte de alimentação linear regulada com capacidade de tensão variável 0-30V e corrente máxima de 3A. A arquitetura implementada utiliza regulação linear série com múltiplos estágios de controle e sistemas de proteção integrados.

O estágio de entrada opera com transformador de 24V AC conectado a uma ponte retificadora de onda completa constituída por diodos 1N5408. Estes diodos são especificados para corrente nominal de 3A e tensão reversa de 1000V, garantindo margem de segurança adequada para a aplicação. A ponte retificadora executa a conversão AC-DC através da retificação dos semiciclos positivo e negativo da tensão alternada.

O sistema de filtragem é implementado através de configuração em cascata. O capacitor principal C1 de 3300 μ F/50V realiza a filtragem primária da tensão retificada, reduzindo a ondulação residual. Os capacitores C2 e C3 de 47 μ F/50V constituem um segundo estágio de filtragem, atenuando componentes de alta frequência. O dimensionamento dos capacitores foi calculado para manter o ripple inferior a 0,01% na saída regulada.

A regulação é executada por três amplificadores operacionais TL081 em configuração específica. U3 opera como comparador de tensão, monitorando continuamente o diferencial entre a tensão de saída e a referência estabelecida. U1 implementa o circuito de controle principal, processando o sinal de erro e gerando o comando de correção. U2 monitora a queda de tensão no resistor shunt R7 ($0.47\Omega/5W$), implementando o controle de corrente. A realimentação negativa mantém a estabilidade do sistema.

O estágio de potência utiliza o transistor Q4 (2SD1047) como elemento série de controle. A polarização é estabelecida pelo circuito driver composto por Q1 (9014), Q2 (2SD882) e Q3 (9015), fornecendo o ganho de corrente necessário. O resistor R7 implementa simultaneamente as funções de sensor de corrente e realimentação para o circuito de proteção.

O controle de corrente utiliza o potenciômetro P1 (10K) para ajuste do limite entre 0-3A. A transição para modo corrente constante ocorre automaticamente quando o limite é atingido, indicado pelo LED D12. O sistema mantém a corrente constante através do loop de realimentação dedicado.

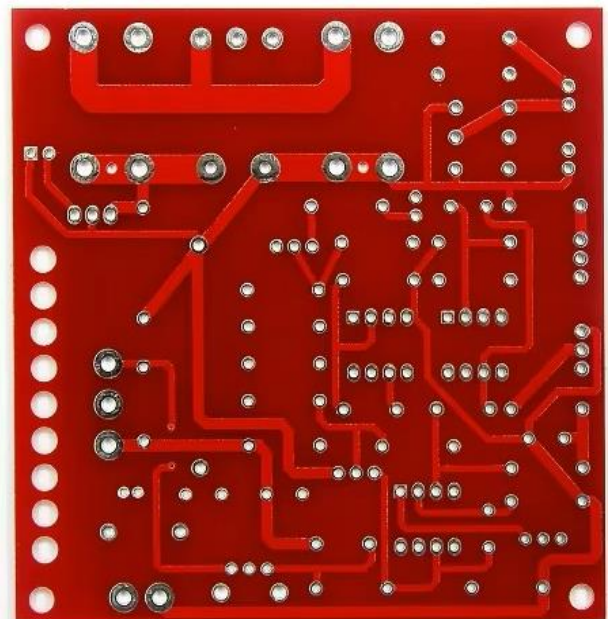
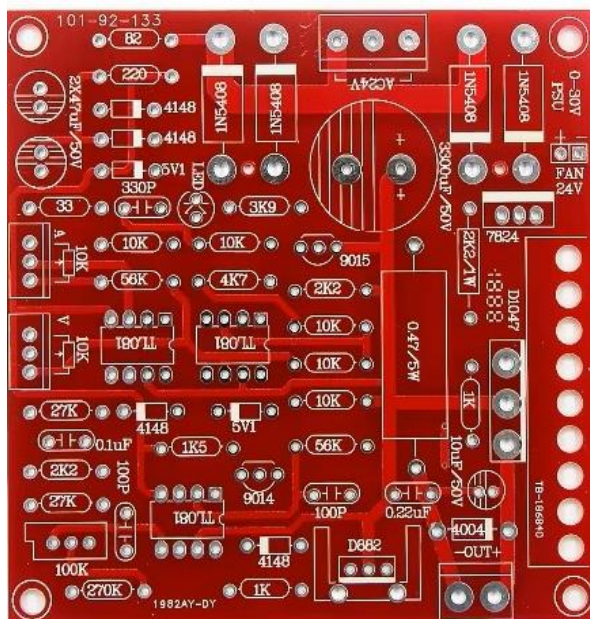
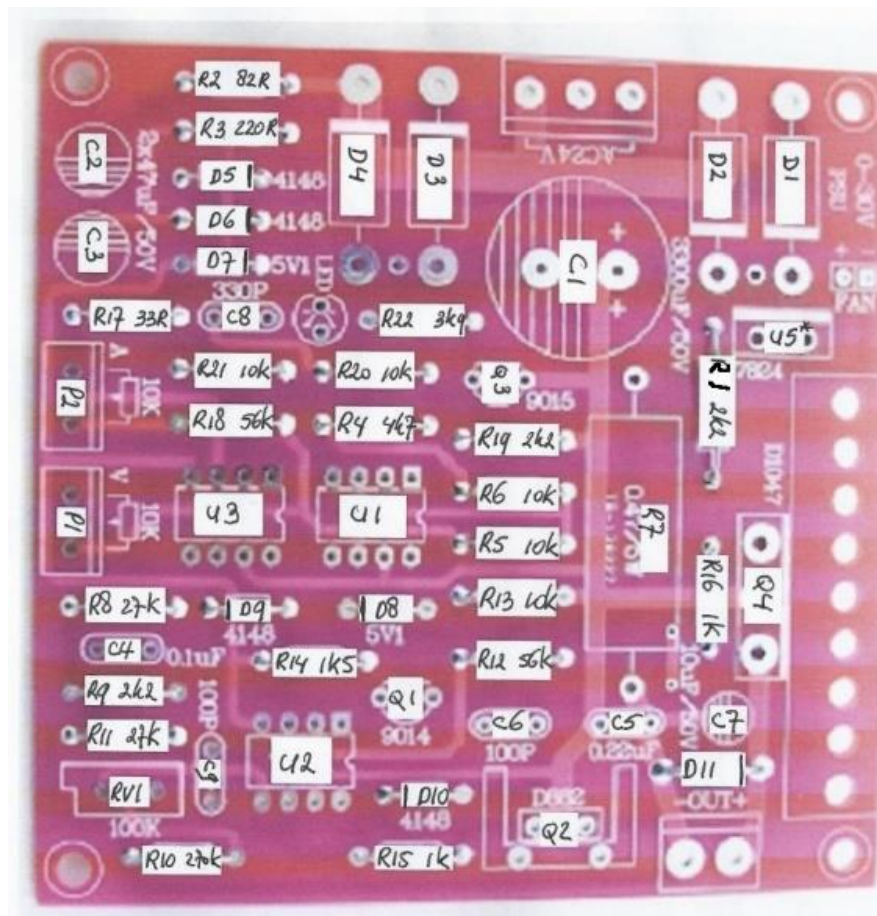
O ajuste de tensão é implementado através do potenciômetro P2 (10K) em conjunto com RV1 (100K) para ajuste fino. O sistema de realimentação negativa mantém a regulação de tensão com precisão de 0,01%, compensando variações de carga e flutuações na entrada.

A dissipação térmica é gerenciada através de dissipador dimensionado para o transistor Q4, considerando a potência máxima dissipada na operação linear. O projeto prevê conexão para ventilação forçada através de saída auxiliar de 24V, permitindo operação contínua em condições de carga máxima.

Os diodos D5-D6 (1N4148) e D7-D8 (Zener 5.1V) implementam proteção contra transientes e estabelecem tensões de referência precisas. Os resistores R8-R22 definem os ganhos dos amplificadores operacionais e as correntes de polarização dos transistores. Os capacitores C4-C9 realizam compensação em frequência e filtragem localizada.

A implementação completa resulta em uma fonte regulada com especificações técnicas: regulação de linha $<0,01\%$, regulação de carga $<0,01\%$, ripple $<0,01\%$,

precisão da tensão de saída $\pm 0,1\%$, precisão da corrente $\pm 1\%$, resposta a transientes $< 50\mu s$.



2.1 Análise

A placa de circuito impresso apresenta layout em dupla face com dimensões 84x84mm. O projeto incorpora segregação de planos de terra e isolamento estratégica entre circuitos de potência e sinal. A distribuição dos componentes segue organização funcional específica, permitindo otimização térmica e minimização de interferências.

O setor de entrada incorpora terminais dimensionados para corrente nominal de 3A, com disposição dos diodos retificadores 1N5408 (D1-D4) em configuração ponte completa. A área de cobre associada foi maximizada para dissipação térmica eficiente. O capacitor principal de filtro C1 (3300 μ F/50V) localiza-se adjacente à ponte retificadora, minimizando indutâncias parasitas.

A seção de controle agrupa os amplificadores operacionais TL081 (U1-U3) com seus componentes periféricos associados. As trilhas de realimentação receberam tratamento especial contra interferência através de blindagem e minimização de comprimento. Os resistores de precisão e capacitores de compensação foram posicionados com prioridade para minimização de loops de corrente.

O estágio de potência centraliza-se no transistor Q4 (2SD1047), estrategicamente posicionado na borda da PCB para acoplamento direto do dissipador. A área de cobre foi maximizada nesta região, incorporando planos térmicos dedicados. O resistor shunt R7 (0.47 Ω /5W) recebeu dimensionamento específico das trilhas para suportar corrente máxima de 3A.

Os potenciômetros de controle P1 e P2 (10K) foram dispostos com acesso frontal otimizado. O LED indicador de limitação de corrente localiza-se em posição de alta visibilidade. O conector para ventilação forçada foi posicionado próximo ao transistor de potência, permitindo resfriamento direcionado.

O layout contempla isolamento galvânica entre estágios através de roteamento específico das trilhas e planos de terra segregados. As trilhas críticas receberam dimensionamento conforme normas IPC-2221A, considerando densidade de corrente e elevação de temperatura. Os terminais de entrada e saída apresentam espaçamento adequado para tensões operacionais até 50V.

A disposição dos componentes na PCB prioriza minimização de loops de corrente nos circuitos críticos, como malhas de realimentação e sensoriamento. O

posicionamento dos capacitores de desacoplamento C2-C9 segue recomendações para minimização de indutância série equivalente.

O projeto implementa proteção contra interferência eletromagnética através de planos de terra, blindagem de trilhas críticas e posicionamento estratégico de componentes. A PCB incorpora furos de fixação nas extremidades, permitindo montagem mecânica robusta.

Esta topologia demonstra considerações específicas quanto à dissipação térmica, isolamento entre circuitos de potência/sinal e proteção contra interferências eletromagnéticas, fatores essenciais para operação estável da fonte em aplicações laboratoriais.

1 FUNCIONAMENTO

1.1 Componentes

Resistores do Circuito de Potência e Precisão: R1 ($2.2\text{K}\Omega/2\text{W}$) e R2 ($82\Omega/1\text{W}$) são resistores de filme metálico com maior dissipação térmica, essenciais para o estágio de entrada onde ocorre maior dissipação de potência. R1 requer montagem elevada da PCB para melhor dissipação. R7 ($0.47\Omega/5\text{W}$) é um resistor shunt de precisão crítico, construído com liga metálica específica para sensoriamento de corrente, mantendo baixa variação térmica para garantir precisão na medição até 3A.

Resistores de Polarização e Controle: R5, R6, R13, R20 e R21 compartilham o valor de $10\text{K}\Omega$, sendo do tipo filme de carbono padrão com tolerância de 5%, adequados para a rede de polarização dos amplificadores operacionais. R18, originalmente especificado como $56\text{K}\Omega$, requer recálculo específico dependendo da corrente máxima desejada: $72.5\text{K}\Omega$ para 3.0A, $169\text{K}\Omega$ para 1.5A ou $259\text{K}\Omega$ para 1.0A. R10 foi modificado de $270\text{K}\Omega$ para $1\text{K}\Omega$ para adequação ao novo circuito de referência.

Capacitores e Sistema de Filtragem: O sistema utiliza C1 ($3300\mu\text{F}/50\text{V}$) como capacitor principal de filtro, com baixa ESR e alta capacidade de ripple, posicionado estrategicamente próximo à ponte retificadora. C2 e C3 ($47\mu\text{F}/50\text{V}$) são críticos para filtragem secundária. A rede de desacoplamento e compensação dos amplificadores operacionais é formada por C4 ($0.1\mu\text{F}/104$), C5 ($0.22\mu\text{F}/224$) e C6-C9 ($100\text{pF}/101$), utilizando capacitores cerâmicos multicamada para filtragem de alta frequência.

Semicondutores e Elementos Ativos: A retificação utiliza diodos 1N5408 (D1-D4) específicos para correntes de 3A com tensão reversa de 1000V. Os diodos zener originais D7-D8 (1N4733A 5.1V/1W) foram substituídos por BZX55C5V6 ou BZX79C5V6 para redução da corrente de polarização de 49mA para 5mA, otimizando a eficiência. Os diodos D5, D6, D9 e D10 (1N4148) são diodos de sinal de chaveamento rápido para proteção e controle.

Estágio de Potência e Controle: Q4 (2SD1047) é o transistor de potência principal Darlington NPN com encapsulamento TO-247, selecionado por sua capacidade de corrente (8A) e tensão (VCEO 100V), exigindo dissipador térmico dimensionado e isolamento galvânica. Q2 (2SD882) opera como driver de média potência, enquanto Q1 (9014) e Q3 (9015) são transistores complementares para estágios de controle. Os

amplificadores operacionais TL081 (U1-U3), com entrada JFET, foram escolhidos por sua baixa corrente de polarização e boa largura de banda.

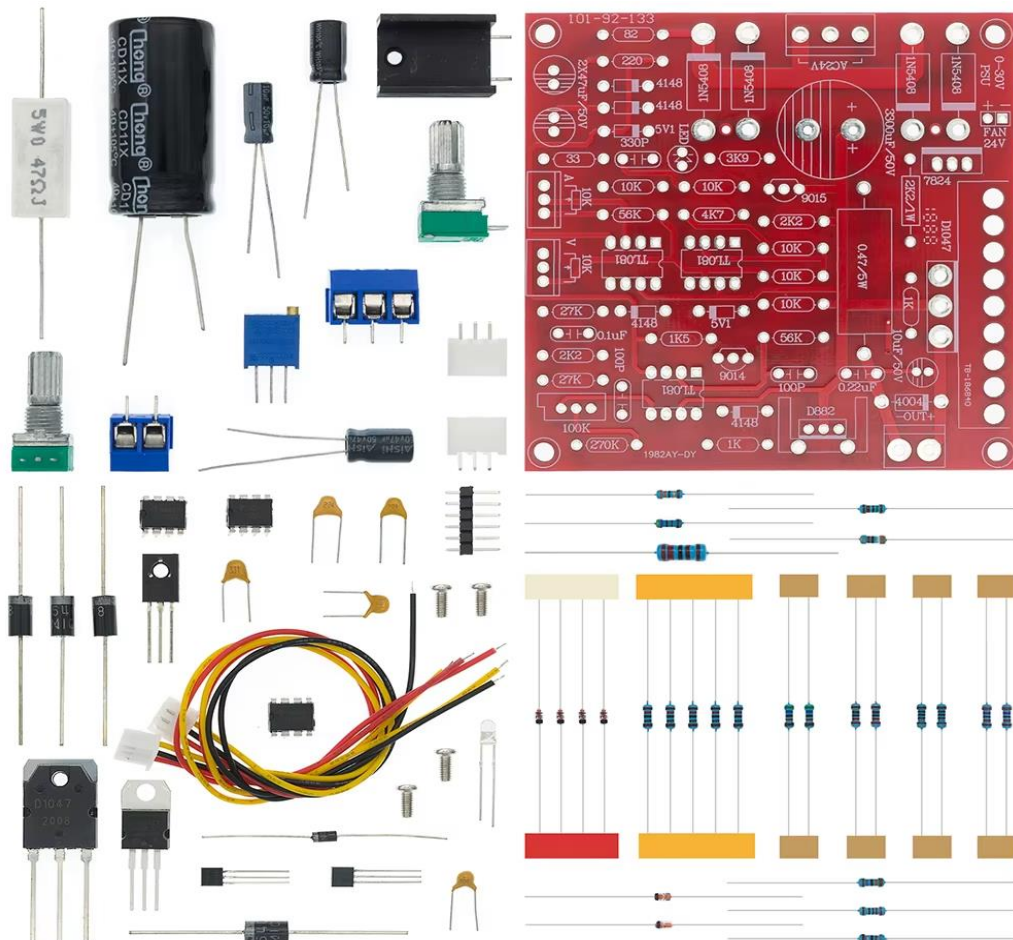
Elementos de Ajuste e Proteção: P1 e P2 (10K Ω) são potenciômetros lineares tipo B com eixo plástico de 6mm, sendo P1 substituível por versão multivoltas para ajuste mais preciso. RV1 (100K Ω) modelo 3296W é um trimpot multivoltas de precisão com 25 voltas para calibração precisa da tensão mínima de saída. O LED D12 indica o modo de corrente constante. A proteção térmica inclui dissipador dimensionado em Q4 e provisão para ventilação forçada através de saída auxiliar de 24V.

Lista de componentes:

| Componente | Valor/Tipo | Especificação | Função |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------|
| R1 | 2.2K Ω | 2W filme metálico | Resistor estágio entrada |
| R2 | 82 Ω | 1W filme metálico | Limitação corrente |
| R3 | 220 Ω | Substituído por LM337 | Regulador negativo |
| R4 | 1K Ω | 1/4W | Polarização referência |
| R5, R6, R13, R20, R21 | 10K Ω | 1/4W filme carbono | Rede polarização |
| R7 | 0.47 Ω | 5W shunt | Sensor corrente |
| R8, R11 | 27K Ω | 1/4W | Divisor tensão |
| R9, R19 | 2.2K Ω | 1/4W | Polarização |
| R10 | 1K Ω | Modificado de 270K Ω | Circuito referência |
| R12, R18 | 56K Ω | 1/4W (R18 ajustável) | Controle corrente |
| R14 | 1.5K Ω | 1/4W | Polarização |
| R15, R16 | 1K Ω | 1/4W | Driver transistor |
| R17 | 33 Ω | 1/4W | Limitação driver |
| R22 | 3.9K Ω | 1/4W | Polarização |
| C1 | 3300 μ F | 50V eletrolítico | Filtro principal |
| C2, C3 | 47 μ F | 50V eletrolítico | Filtro secundário |
| C4 | 0.1 μ F (104) | Cerâmico | Desacoplamento |
| C5 | 0.22 μ F (224) | Cerâmico | Compensação |
| C6, C9 | 100pF (101) | Cerâmico | Compensação |
| C7 | 10 μ F | 50V eletrolítico | Filtro saída |



| | | | |
|-----------------|-----------|----------------------|------------------------|
| C8 | 330pF | Cerâmico | Compensação |
| D1-D4 | 1N5408 | 3A/1000V | Ponte retificadora |
| D5, D6, D9, D10 | 1N4148 | Sinal rápido | Proteção |
| D7, D8 | BZX55C5V6 | Zener 5.6V | Referência tensão |
| D11 | 1N4004 | 1A/400V | Proteção |
| D12 | LED | Vermelho | Indicador corrente |
| Q1 | 9014 | NPN | Driver baixa potência |
| Q2 | 2SD882 | NPN | Driver média potência |
| Q3 | 9015 | PNP | Driver complementar |
| Q4 | 2SD1047 | NPN Darlington | Regulador série |
| U1, U2, U3 | TL081 | JFET Op-Amp | Controle/Monitoramento |
| P1, P2 | 10KΩ | Potenciômetro linear | Ajuste V/I |
| RV1 | 100KΩ | Trimpot 3296W | Calibração |



1.2 Entrada(CA)

O circuito de entrada da fonte é projetado para operar com transformador de 24V AC, sendo aceitas duas configurações: transformador com saída única de 24V ou transformador com tap central (12V-0-12V). A especificação de potência do transformador é determinada pela demanda máxima do circuito, sendo necessário transformador com potência superior a 90W para operação em carga máxima (30V/3A).

A entrada é dimensionada para corrente máxima de 3A AC, com os condutores e trilhas da PCB projetados conforme esta especificação. O circuito opera exclusivamente com alimentação CA, sendo expressamente proibida a conexão direta em fonte CC, devido à topologia do circuito de retificação e filtragem.

O projeto considera a tensão de pico na entrada, que pode atingir aproximadamente 34V ($24V\ AC \times \sqrt{2}$) sem carga. Esta tensão de pico é crítica para o dimensionamento dos componentes subsequentes, especialmente os capacitores de filtro e semicondutores de potência.

O transformador deve apresentar isolamento galvânica adequada entre primário e secundário, sendo um elemento crítico para a segurança operacional do equipamento. A conexão do secundário é realizada através de terminais dedicados na PCB, dimensionados para suportar a corrente nominal com margem de segurança adequada.

O projeto original prevê ainda derivação de tensão AC para alimentação de ventilador auxiliar quando necessário, demonstrando consideração com aspectos térmicos do projeto em condições de carga elevada.

1.3 Retificação(CC)

O estágio de retificação implementa uma topologia de ponte completa utilizando quatro diodos 1N5408, configuração que proporciona retificação de onda completa para maior eficiência na conversão CA-CC. Estes diodos são especificamente dimensionados com características de 3A nominal e tensão reversa de 1000V, proporcionando significativa margem de segurança considerando a tensão de operação do circuito.

O processo converte a tensão alternada de 24V RMS em pulsos de corrente contínua com amplitude de pico teórica de aproximadamente 34V ($24V \times \sqrt{2}$). A ponte retificadora conduz durante ambos os semiciclos da tensão alternada, resultando em frequência de ripple de 100/120 Hz no barramento CC - dobro da frequência da rede elétrica. Esta característica é fundamental para o dimensionamento dos estágios subsequentes de filtragem.

A implementação física da ponte retificadora requer considerações específicas de layout, onde os diodos são posicionados estrategicamente próximos aos terminais de entrada CA e aos capacitores de filtro principais. As trilhas são dimensionadas para suportar a corrente de pico que pode exceder significativamente a corrente nominal RMS, especialmente durante o carregamento inicial dos capacitores de filtro.

O circuito incorpora proteção natural contra correntes de inrush através da impedância própria do transformador e da resistência direta dos diodos retificadores. A queda de tensão típica em cada diodo (aproximadamente 0,7V a 1V sob carga nominal) contribui para a dissipação térmica total do circuito. Em carga máxima, a ponte retificadora pode dissipar potência superior a 6W, justificando atenção especial ao aspecto térmico neste estágio.

A interação entre o estágio de retificação e o capacitor principal de filtro C1 (3300 μ F/50V) é crítica para o desempenho do sistema. O dimensionamento adequado deste conjunto determina a tensão média no barramento CC e o ripple residual que será processado pelos estágios subsequentes de regulação.

1.4 Filtragem(CC)

O sistema de filtragem é implementado através de uma configuração em cascata cuidadosamente dimensionada. O capacitor principal C1 de 3300 μ F/50V realiza a filtragem primária da tensão retificada, reduzindo significativamente a ondulação residual. Seu posicionamento estratégico, próximo à ponte retificadora, minimiza indutâncias parasitas e melhora a eficiência da filtragem.

Os capacitores C2 e C3 de 47 μ F/50V constituem um segundo estágio de filtragem, sendo responsáveis pela atenuação de componentes de alta frequência. Esta configuração em cascata proporciona uma redução progressiva do ripple, com os capacitores secundários complementando a ação do capacitor principal. O dimensionamento dos capacitores foi calculado para manter o ripple inferior a 0,01% na saída regulada.

Uma característica importante do projeto é a adição do capacitor C12 (3300 μ F/50V) em paralelo com C1, proporcionando maior estabilidade ao barramento CC e redução adicional do ripple em condições de corrente elevada. Os capacitores C4-C9 realizam funções específicas de compensação em frequência e filtragem localizada para os circuitos de controle.

A eficácia do sistema de filtragem é fundamental para o desempenho global da fonte, pois afeta diretamente a qualidade da tensão que será processada pelo estágio regulador. O projeto considera não apenas a capacidade de filtragem, mas também aspectos como ESR (Resistência Série Equivalente) dos capacitores e sua capacidade de suportar as correntes de ripple envolvidas.

O dimensionamento térmico e elétrico dos componentes de filtragem garante operação segura mesmo em condições de carga máxima, onde as correntes de ripple podem ser significativas. A distribuição física dos componentes na PCB foi otimizada para maximizar a eficiência da filtragem e minimizar interferências eletromagnéticas.

1.5 Saída(CC)

O estágio de saída é estruturado em torno de um sistema de regulação linear série de alta precisão. O elemento principal é o transistor Q4 (2SD1047) que atua como regulador série, sendo controlado por uma rede de amplificadores operacionais (U1, U2 e U3) que implementam as funções de controle de tensão e corrente. Este arranjo possibilita uma regulação precisa com baixo ruído na saída.

O controle de tensão utiliza o potenciômetro P2 (10K Ω) em conjunto com RV1 (100K Ω) para ajuste fino, permitindo uma regulação contínua de 0 a 30V. O sistema de realimentação negativa, implementado através de U1 e U2, mantém a regulação de tensão com precisão de 0,01%, compensando automaticamente variações de carga e flutuações na entrada. A malha de realimentação monitora continuamente a tensão de saída, comparando-a com uma referência estabelecida pelos diodos zener.

O controle de corrente é implementado através do potenciômetro P1 (10K Ω) para ajuste do limite entre 0-3A, com monitoramento contínuo através do resistor shunt R7 (0.47 Ω /5W). Quando o limite de corrente é atingido, o sistema transita automaticamente para o modo de corrente constante, indicado pelo LED D12. O amplificador operacional U3 mantém a corrente constante através de um loop de realimentação dedicado.

A saída incorpora diversos elementos de proteção, incluindo limitação de corrente, proteção contra curto-circuito e monitoramento térmico. O transistor Q4 é montado em dissipador dimensionado para a potência máxima dissipada na operação linear, com provisão para ventilação forçada através de saída auxiliar de 24V para operação contínua em condições de carga máxima. O projeto também inclui capacitores de desacoplamento na saída para garantir estabilidade em diferentes condições de carga.

O desempenho do estágio de saída é caracterizado por especificações técnicas rigorosas: regulação de linha <0,01%, regulação de carga <0,01%, ripple <0,01%, precisão da tensão de saída $\pm 0,1\%$, precisão da corrente $\pm 1\%$ e resposta a transientes <50 μ s, tornando a fonte adequada para aplicações laboratoriais que exigem alta estabilidade e precisão.

1.6 Funcionamento Geral

O projeto apresentado constitui uma fonte de alimentação linear regulada que converte tensão alternada (CA) de 24V em tensão contínua (CC) ajustável de 0-30V com capacidade de corrente até 3A. O funcionamento geral pode ser compreendido através de múltiplos estágios de processamento, cada um com sua função específica e essencial para o desempenho global do sistema.

A entrada do sistema é realizada através de um transformador que reduz a tensão da rede para 24V CA, proporcionando isolamento galvânica e adequação dos níveis de tensão. Esta tensão é então processada pela ponte retificadora composta por diodos 1N5408, que converte a tensão CA em CC pulsante, aproveitando ambos os semiciclos da tensão alternada. Esta configuração resulta em uma frequência de ripple de 100/120 Hz no barramento CC, que é posteriormente tratada pelo estágio de filtragem.

O sistema de filtragem em cascata, utilizando capacitores de 3300 μ F e 47 μ F, suaviza a tensão retificada, reduzindo significativamente a ondulação residual para menos de 0,01%. Esta etapa é crucial para obter uma tensão CC estável que servirá de base para a regulação precisa. A implementação em cascata permite uma redução progressiva do ripple, com cada estágio contribuindo para a qualidade final da tensão.

O coração do sistema é o circuito de regulação, baseado em três amplificadores operacionais TL081 e um transistor de potência 2SD1047, que proporciona controle preciso da tensão e corrente de saída. Os amplificadores monitoram continuamente as condições de operação e ajustam a condução do transistor série para manter os níveis desejados. O controle de tensão é realizado através do potenciômetro P2 (10K Ω) em conjunto com RV1 (100K Ω), permitindo ajuste fino de 0 a 30V, enquanto o controle de corrente utiliza o potenciômetro P1 (10K Ω) para limitar a corrente entre 0 e 3A.

A fonte incorpora diversos elementos de proteção e monitoramento, incluindo limitação de corrente automática, proteção térmica através de dissipador dimensionado, e monitoramento contínuo das condições de operação. Um LED indicador sinaliza quando o circuito opera em modo de corrente constante, permitindo ao usuário visualizar facilmente o estado de operação do equipamento.

O resultado final é uma fonte de alimentação versátil e precisa, com especificações técnicas que incluem regulação de linha e carga inferior a 0,01%, ripple menor que 0,01%, precisão de tensão de $\pm 0,1\%$ e resposta a transientes inferior a 50 μ s. Estas características, combinadas com a robustez do projeto e seus sistemas de proteção, tornam a fonte adequada para uma ampla gama de aplicações laboratoriais que exigem alimentação CC estável e precisa, desde testes de circuitos sensíveis até alimentação de protótipos em desenvolvimento.