



Universidade Federal de Itajubá
Equipe Uai!rrior de Robótica

Trabalho de Conclusão
de Bicho

Nícolas Obara e Matheus Henrique

Resumo

Nesse artigo foram abordadas as principais falhas eletrônicas em um circuito de corrente contínua (circuito DC), como inversão de polaridade, sobretensão, sobrecorrente e corrente de inrush, bem como alguns circuitos e componentes que podem ser implementados no sistema para impedir e/ou amenizar essas falhas, protegendo e prolongando a vida-útil da eletrônica. Também foi abordado o e-Fuse, um circuito integrado com diversas funções de proteção, que se mostrou, na teoria, ser bem versátil e capaz de proteger o circuito contra a maioria das falhas mencionadas. Além dele, foi apresentado um circuito simples de soft start, que tem como principal função reduzir a corrente de inrush e que pode ser alterado e dimensionado de outras formas, sendo customizável para diversas aplicações. No final de cada seção das falhas foi feita uma conclusão, comparando os circuitos e componentes, apresentando seus prós e contras e limitações e ao final do documento foi feita uma conclusão geral.

SUMÁRIO

1	Introdução	5
2	Inversão de Polaridade	5
2.1	Dimensionamento	7
2.2	Como escolher o MOSFET necessário?	7
2.3	Resistores de pull down	7
2.4	Conclusão	7
3	Sobretensão	8
3.1	Funcionamento do circuito de proteção	8
3.2	Diodo TVS	8
3.2.1	Esquemático	9
3.2.2	Dimensionamento	9
3.3	Diodo Zener	10
3.3.1	Esquemático	11
3.3.2	Dimensionamento	12
3.4	Varistor	13
3.4.1	Esquemático	14
3.4.2	Dimensionamento	15
3.5	Conclusão	15
4	Sobrecorrente	16
4.1	Funcionamento do circuito de proteção	16
4.2	Termistor PTC	16
4.2.1	Esquemático	17
4.2.2	Dimensionamento	18
4.3	e-Fuse	18
4.3.1	Limitador de Corrente	20
4.3.2	Esquemático	20
4.3.3	Dimensionamento	21
4.4	Conclusão	21
5	Corrente de Inrush	22
5.1	O que é Inrush Current?	22
5.2	Funcionamento do circuito	22
5.2.1	Esquemático	23
5.2.2	Dimensionamento	23
5.2.3	Conclusão	24

6	Curto-circuito	25
6.1	O que é	25
6.2	Tipos de Equipamentos de Proteção Contra Curto-Circuito	25
6.3	Fusíveis de Proteção Contra Curto-Circuito	26
6.4	Critérios para a Seleção de Fusíveis de Proteção Contra Curto-Circuito	26
6.5	Esquemático	27
7	Soft Start	27
7.1	Funcionamento	27
7.2	Circuito de Exemplo	28
8	e-Fuse	29
8.1	Funcionalidades	29
8.1.1	Sobretensão	29
8.1.2	Proteção Térmica	29
8.1.3	Soft Start	30
9	Conclusão	31

1 Introdução

Esse artigo tem como objetivo explicar o funcionamento de alguns circuitos de proteção contra falhas eletrônicas, como ocorrem essas falhas, quais suas vantagens, limitações e sua implementação.

A eletrônica moderna exige circuitos confiáveis e duráveis, especialmente em aplicações industriais, automotivas e de sistemas embarcados. No entanto, diversos fatores podem comprometer o funcionamento adequado de dispositivos eletrônicos, como inversão de polaridade, sobretensão, sobrecorrente, corrente de inrush e curto-circuito. Esses eventos podem causar danos irreversíveis a componentes sensíveis, reduzir a vida útil do sistema e gerar falhas.

Diante desse cenário, é de extrema importância que os circuitos possuam um circuito de proteção. Contudo, cada placa eletrônica pode exigir um circuito de proteção específico, e a escolha correta depende das características do sistema e das possíveis falhas que ele pode enfrentar. Por isso, é fundamental conhecer cada um desses circuitos para determinar qual deles é mais adequado para uma determinada aplicação.

Para compreender melhor como funcionam esses circuitos de proteção, é essencial analisar como ocorrem cada tipo de falha e de que maneira podem afetar o sistema. A seguir, serão abordados essas falhas e seus respectivos circuitos de proteção. Será apresentado também seus esquemas elétricos, vantagens e limitações.

2 Inversão de Polaridade

Um circuito contra inversão de polaridade se trata de um dispositivo que impede danos causados pela conexão indevida na alimentação, ou seja, invertendo positivo com negativo.

Circuito simples usando um diodo retificador

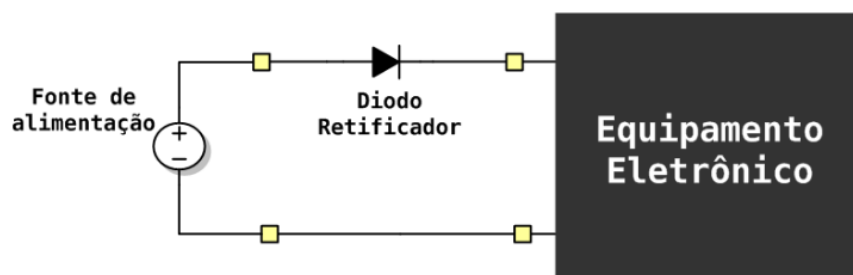


Figura 1: Circuito de proteção com diodo

Quando se usa um diodo retificador convencional para proteção contra inversão de polaridade, o diodo é conectado em série com a alimentação do circuito. Se a alimentação for conectada corretamente (com a polaridade certa), o diodo permitirá que a corrente passe normalmente. Porém, se a polaridade for invertida, o diodo bloqueará a passagem de corrente devido à sua característica unidirecional.

O principal problema do diodo retificador tradicional em circuitos embarcados, como mencionado antes, é que ele possui uma queda de tensão significativa (cerca de 0,7V para diodos de silício), o que pode ser um problema em sistemas de baixa tensão (como 3,3V ou 5V). Isso pode resultar em uma perda de energia ou até em um funcionamento incorreto do circuito.

Circuito usando um diodo Schottky:

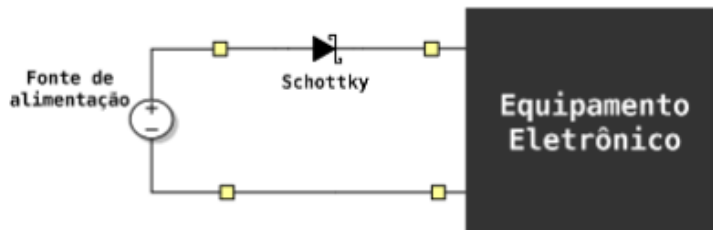


Figura 2: Circuito de proteção com diodo

O diodo Schottky pode ser uma opção melhor para proteção contra inversão de polaridade, especialmente em sistemas embarcados com tensões baixas, como 3,3V ou 5V.

Ele tem uma queda de tensão muito menor, geralmente entre 0,2V e 0,45V. Isso significa que ele causa menos perda de energia e permite que o circuito funcione de forma mais eficiente, mesmo quando conectado em polaridade correta.

No caso de inversão de polaridade, o funcionamento seria semelhante: o diodo Schottky bloqueia a passagem de corrente quando a polaridade é invertida, mas a perda de tensão é muito menor do que com um diodo retificador convencional, tornando-o mais adequado para circuitos de baixa tensão.

Em circuitos que possuem uma alta quantidade de corrente é recomendado utilizar MOSFETs para fazer esse tipo de proteção. Na Equipe Uairrioir de Robótica foi implementado um circuito de proteção recomendado por um patrocinador, a TRACTIAN. O circuito abaixo foi implementado na placa Kitsune V2.

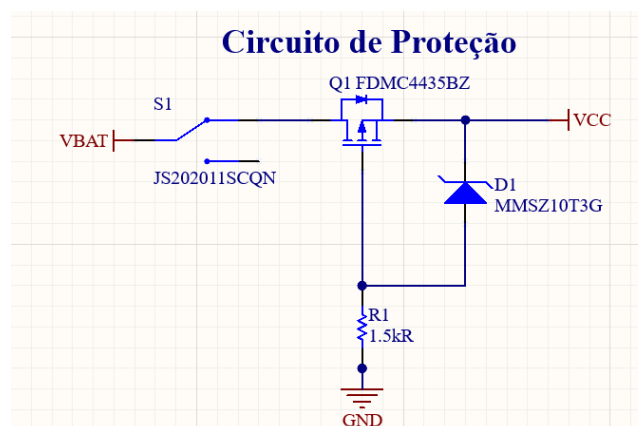


Figura 3: Circuito de proteção com diodo

No circuito de proteção, foi implementado um MOSFET P-Channel que atua como um switch conforme a tensão aplicada ao gate. O drain está conectado à bateria (VBAT) e o

source à saída (VCC). O MOSFET conduz quando a tensão no gate é menor que a do source e bloqueia a passagem de corrente quando não há diferença de potencial.

Além disso, um diodo Zener foi adicionado para proteção contra sobretensão, garantindo uma tensão adequada no gate do MOSFET, e um resistor pull-down de $1,5k\Omega$ garante a diferença de potencial necessária para a operação do MOSFET.

2.1 Dimensionamento

2.2 Como escolher o MOSFET necessário?

O MOSFET desempenha um papel essencial no funcionamento do circuito, atuando como uma chave eletrônica. Para garantir a operação segura e eficiente do sistema, é fundamental selecionar um componente que suporte uma tensão de dreno-fonte superior à tensão de alimentação do circuito. Recomenda-se que essa tensão seja, no mínimo, 20% maior do que a tensão da bateria, a fim de proporcionar uma margem de segurança contra picos de tensão e variações inesperadas.

Além disso, o MOSFET deve possuir uma corrente de dreno nominal superior à corrente máxima consumida pelo circuito, evitando sobrecarga e garantindo a integridade do componente. Em aplicações que operam em alta frequência, como conversores chaveados, é imprescindível considerar também os tempos de chaveamento e as capacitâncias parasitas, pois esses fatores influenciam diretamente na eficiência e nas perdas por comutação do sistema.

2.3 Resistores de pull down

Os valores típicos para resistores de pull-up e pull-down variam entre $1k\Omega$ e $10k\Omega$, sendo $10k\Omega$ o mais comum. Um resistor muito baixo pode permitir uma corrente excessiva, enquanto um resistor muito alto pode resultar em tempos de resposta lentos devido à capacitância da entrada

(ROBÓTICA, s.d)

As principais funções do resistor de pull-down são:

- Assegurar o desligamento do MOSFET quando a chave de controle não estiver ativada.
- Evitar que o Gate fique em estado flutuante, prevenindo acionamentos indesejados.
- Definir a constante de tempo de descarga da capacitância de Gate, influenciando a velocidade de comutação do MOSFET.

2.4 Conclusão

Circuitos de proteção contra inversão de polaridade são fundamentais para evitar danos causados por conexões incorretas na alimentação, um erro que pode ocorrer por descuido, cansaço ou falta de atenção. Implementar essa proteção em projetos eletrônicos aumenta a

confiabilidade e a durabilidade do sistema, prevenindo falhas que poderiam comprometer seu funcionamento. Métodos como diodos em série, diodos em paralelo com fusíveis e MOSFETs de canal P ou N são algumas das soluções eficazes para garantir a segurança do circuito sem comprometer a eficiência energética

3 Sobretenção

Na eletrônica, "esta (a sobretensão), se caracteriza pela elevação do valor eficaz da tensão, por um período de tempo" (SILVEIRA; MAZEGA, 2013). No cenário da robótica, a sobretensão ocorre principalmente por conta do efeito de indução. O efeito de indução ocorre quando os motores sofrem uma força repentina, tanto contra como a favor de seu movimento. Pelo fato dos motores serem indutores, um campo magnético é gerado, e ao ser travado, uma mudança súbita na direção do campo magnético flui no motor, gerando uma sobretensão, que por sua vez, passa para o restante do circuito (MATAN, 2023).

3.1 Funcionamento do circuito de proteção

O circuito de proteção contra sobretensão atua quando detecta alguma variação abrupta da tensão do sistema. Quando isso ocorre, ele corta a ligação entre a fonte de energia e o restante do circuito e fecha curto com o terra. Todo esse processo ocorre em frações de segundos, então a alta tensão não é capaz de causar grandes danos aos componentes.

Na elétrica, normalmente são utilizados os DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos). Contudo, na eletrônica, por conta dos sistemas serem mais compactos, não seria possível utilizá-los, então são integrados diodos e varistores.

3.2 Diodo TVS

Como mencionado, os diodos são componentes muito utilizados contra falhas de sobretensão. Há dois principais tipos que cumprem essa função: o diodo TVS e o diodo Zener. Primeiramente será abordado o diodo TVS.

O diodo TVS (Transient Voltage Suppression) é um tipo de diodo muito conhecido pelo seu tempo de atuação extremamente veloz, que está na casa dos nanosegundos. Seu princípio de funcionamento é bem simples, quando a tensão no circuito é menor que sua tensão de ruptura V_{BR} , ele atua como um circuito aberto (ZACHARIAH, 2022). Porém, quando a tensão ultrapassa esse limite, sua resistência cai drasticamente, desviando parte a corrente excedente (COMPONENTS, s.d).

Existem dois tipo de diodo TVS, o bidirecional e o unidirecional, sendo o bidirecional capaz de conduzir em ambos os sentidos e o unidirecional em apenas um.

3.2.1 Esquemático

Em um esquemático, o diodo TVS pode ser simbolizado de diversas formas, mas em geral, é o símbolo de um diodo com uma barra na perpendicular com a ponta do triângulo e com suas pontas inclinadas. Essa simbologia é análoga tanto para o uni quanto para o bidirecional. As figuras 4 e 5 representam o diodo bidirecional e unidirecional, respectivamente.

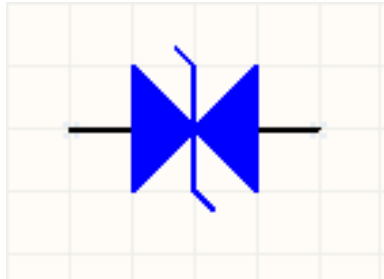


Figura 4: Diodo TVS Bidirecional

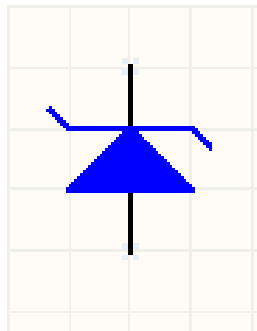


Figura 5: Diodo TVS Unidirecional

Para inseri-lo em um circuito, basta conectá-lo entre a alimentação (V_{cc}/V_{bat}) e antes do restante dos componentes, assim como o exemplo da figura 6.

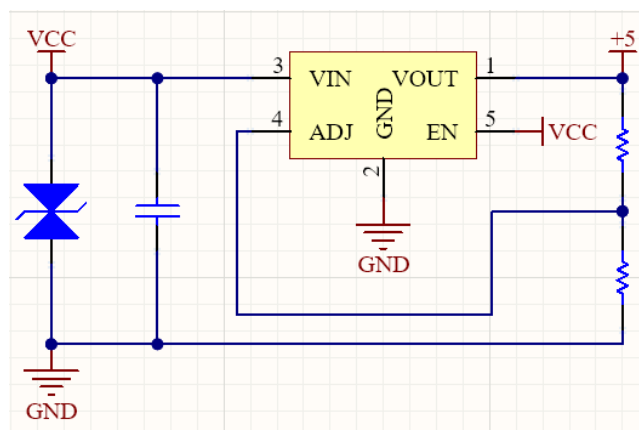


Figura 6: Exemplo do uso do Diodo TVS

3.2.2 Dimensionamento

Apesar do funcionamento ser simples, deve-se ter atenção na hora de escolher um diodo TVS para o circuito. É necessário analisar cuidadosamente seus parâmetros e se é mais adequado

adotar o unidirecional ou o bidirecional.

Primeiramente, é importante compreender a diferença entre o diodo TVS uni e bidirecional. Segundo Negi (NEGI, 2024), o unidirecional conduz apenas em um sentido, então em caso de sobretensão ele direciona parte da tensão para o terra. Em circuitos de corrente contínua em que não é possível haver corrente reversa, esse tipo de diodo é o suficiente.

Por outro lado, o bidirecional é capaz de dissipar nos dois sentidos, da alimentação para o terra e do terra para a alimentação. Graças a essa característica, ele é amplamente utilizado em circuitos de corrente alternada. Contudo, também pode ser adotado em circuitos de corrente contínua, em que há possibilidade de haver corrente reversa, como em casos de um sistema que controla motores. Ao serem forçados no sentido opostos, os motores geram uma corrente reversa, que é transmitida para o restante dos componentes.

Sabendo diferenciar os dois tipos de diodo TVS e suas aplicações, outro aspecto que deve ser abordado são seus parâmetros.

1. V_{BR} : É a tensão de ruptura, o ponto em que o diodo passará a conduzir e sua resistência diminui. O recomendado é escolher um diodo que tenha seu V_{BR} um pouco superior ao da fonte de alimentação, por exemplo, um circuito que funcione com 12V, deve-se optar por um diodo TVS com um V_{BR} de 15V.
2. V_{WM} : Tensão de trabalho, está diretamente relacionado ao V_{BR} . Representa o limite de tensão até o diodo se romper. Usando o exemplo do item anterior, o V_{WM} seria de $\approx 15V$.
3. I_{PP} : Corrente máxima. Como o próprio nome sugere, é a máxima corrente nominal suportada pelo diodo. Uma corrente superior a essa por um período longo pode danificá-lo.
4. P_{PP} : Potência máxima. Representa a potência máxima que o diodo é capaz de dissipar, expressa em W (Watts).
5. V_C : Tensão máxima. Possivelmente o parâmetro que mais se deve prestar atenção, ele indica qual a máxima tensão que o diodo deixará passar para o restante do circuito. Idealmente, o diodo TVS deveria agir como um curto-circuito perfeito, porém ele ainda possui alguma resistência interna. Então ele nada mais é do que um divisor de tensão no momento que começa a conduzir, dissipando parte da sobretensão para o terra, o restante continua para o sistema. O V_C indica essa tensão que "escapa", e deve ser menor do que a tensão máxima dos componentes do circuito. Quanto menor essa tensão melhor e mais adequado é o diodo TVS.

3.3 Diodo Zener

Abordado o diodo TVS, agora será explicado sobre o diodo Zener. Seu funcionamento é semelhante ao TVS, ele limita a tensão do circuito em caso de sobretensão.

Ao ser ligado de forma convencional, com o anodo no positivo e catodo no negativo, ele precisa de 0,7V para conduzir, assim como um diodo de silício. Porém, ao conectá-lo de forma

inversa, ele depende do V_Z (um de seus parâmetros, que ainda serão abordados) para conduzir. A Figura 7 exemplifica essa explicação com um gráfico, em que a zona verde é quando o diodo está conectado de forma direta, com o anodo no positivo e o catodo no negativo, ou seja, após $V_0 > 0,7V$. Já a região em vermelho, denominada "Região de corte" é a região em que a tensão é menor que a tensão necessária para ultrapassar o V_Z , ou seja, nesse cenário o diodo está conectado de forma inversa. Por fim, a região em amarelo representa o momento quando a tensão é maior que o V_Z e o diodo começa a conduzir (MATTEDE, s.da).

Curva característica do diodo Zener



Figura 7: Gráfico da Curva Característica do Diodo Zener

Diferente do diodo TVS, que é utilizado contra picos de tensão, o diodo Zener é mais adequado para sobretensões que possuem um tempo de duração maior e constante, já que seu tempo de ativação não é tão rápido quanto o TVS. Por conta dessa característica, ele é muito utilizado para proteção de microcontroladores, em que a tensão de alimentação precisa ser estável e constante (MAGNETISM, s.d).

3.3.1 Esquemático

Existem formas diferentes de representar o diodo Zener em um esquemático, contudo, a forma que ele será apresentada nesse documento é a apresentada pela Figura 8 abaixo. Mas também pode ser encontrado sendo representado com um traço fazendo um ângulo de 90° com as pontas, lembrando a letra "Z".

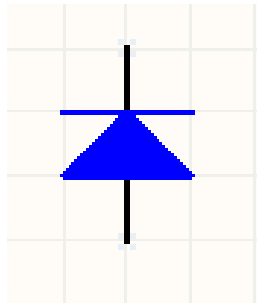


Figura 8: Diodo Zener

Um exemplo desse diodo sendo utilizado em um circuito é o apresentado pela Figura 9, em que ele é inserido em paralelo entre a alimentação e o terra e antes do restante do circuito, que no caso está sendo representado pelo resistor R_L . Caso a tensão varie para um valor superior ao V_Z , o diodo Zener começa a conduzir, e caso contrário, ele atua como um circuito aberto. O diodo zener é utilizando como um divisor de tensão variável devida a sua capacidade de manter tensão em seus terminais estável.

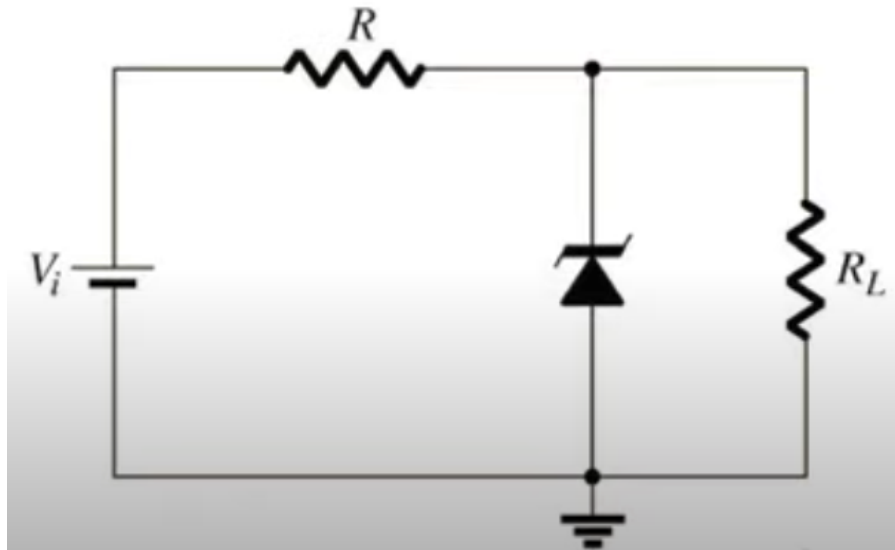


Figura 9: Exemplo do uso do Diodo Zener

3.3.2 Dimensionamento

Utilizando o circuito da Figura 9, retirado de um vídeo do YouTube com o título "Regulador de Tensão com Diodo Zener - Carga Resistiva Fixa", do canal "João Victor Carvalho Tereza", será explicado como dimensionar o diodo correto para o circuito e quais parâmetros devem ser levados em consideração.

Primeiramente, sabendo o V_i , tensão de alimentação, e o V_Z , tensão zener, é possível saber a queda de tensão no resistor R , resistor limitador, com a conta:

$$V_R = V_i - V_Z$$

O próximo passo é saber a corrente total do circuito. Para fazer isso, é necessário saber a corrente do circuito, R_L (que pode ser obtido a partir de testes ou pelo Datasheet do componente), o I_{ZM} , corrente máxima suportada pelo diodo e o I_{ZK} , corrente mínima necessária para que o diodo zener seja capaz de regular de maneira estável.

Por fim, para calcular a variação de R_L permitida para que a tensão se mantenha regulada, são utilizadas as equações:

$$R_{min} = \frac{V_R}{(I_{ZM} + I_{RL})}$$

$$R_{max} = \frac{V_R}{I_{ZK} + I_{RL}}$$

Portanto, qualquer resistência que estiver entre esse intervalo não influenciará de maneira significativa a tensão regulada.

Abaixo segue uma lista dos parâmetros abordados no dimensionamento:

1. V_Z : Tensão Zener. Ela indica a partir de qual tensão o diodo Zener começa a conduzir de forma inversa.
2. I_{ZK} : Corrente Mínima. É a corrente mínima necessária para que o diodo estabilize a tensão.
3. I_{ZM} : Corrente de Ruptura Máxima. Caso a corrente supere esse valor especificado pela fabricante o diodo pode queimar e se manter como um curto-circuito.
4. P_Z : Potência Máxima Zener. Ela indica qual a potência máxima que o diodo é capaz de dissipar, expressa pela equação:

$$P_Z = V_Z \times I_Z$$

3.4 Varistor

Os varistores são outro tipo de componente muito adotado em circuitos de proteção contra sobretensão. Assim como o diodo TVS e Zener, também atuam como um circuito aberto quando a tensão está estável, mas ao detectar alguma variação incomum ele fecha e cria um curto, drenando grande parte da tensão excedente. O varistor [...] é um tipo de resistor que varia a sua resistência de acordo com a diferença de potencial aplicada entre os seus terminais ([ALVES, s.d](#)). A Figura 10 exemplifica com um gráfico a diferença entre um resistor comum e um varistor.

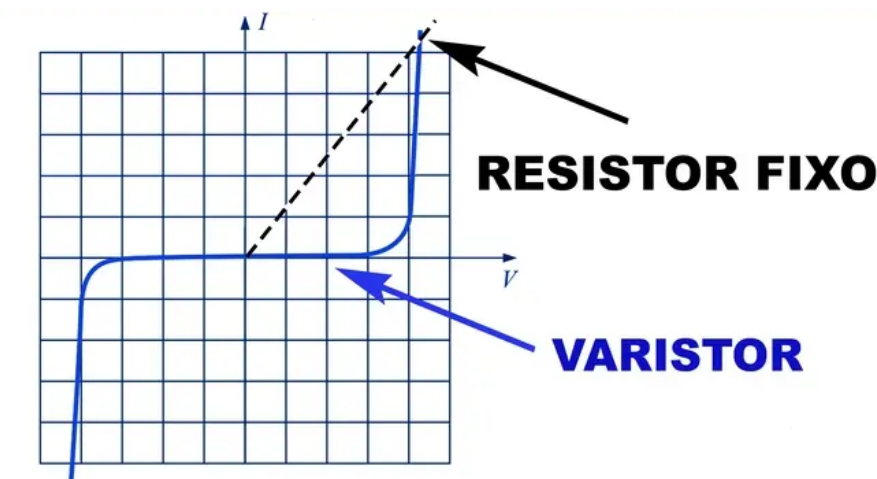


Figura 10: Gráfico Resistência X Tensão

Esse gráfico lembra muito o gráfico da curva característica do diodo Zener, apresentado na seção 3.3. Contudo, o comportamento do varistor é "simétrico", ou seja, a tensão nominal do varistor (V_{DC}) é a mesma independente da polaridade. Isso quer dizer que o varistor é apolar.

Apesar de sua similaridade com o diodo TVS, o varistor possui suas próprias peculiaridades e aplicações. São utilizados em circuitos mais potentes e que exigem mais tensão, por conta de sua capacidade de energia ser elevada, então suporta altos picos de tensão; seu tempo de ativação é na casa dos milissegundos, o que é bem rápido, mas se no circuito houver algum componente sensível esse tempo pode ser o bastante para danificá-lo; sua vida útil é reduzida quando comparada com o diodo TVS.

3.4.1 Esquemático

Em um esquemático é comum encontrar dois tipos de simbologia para o varistor, assim como mostra a Figura 11.

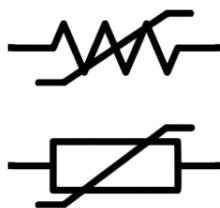


Figura 11: Simbologias do Varistor

Sua forma de implementação em um circuito é muito parecida com a do diodo TVS. Basta colocá-lo em paralelo entre a fonte de alimentação e o terra e antes do restante do sistema, assim como mostra a Figura 12. Vale ressaltar a importância de uma proteção contra curto-circuito, no caso do exemplo, um fusível. Pois o varistor cria um curto-circuito controlado.

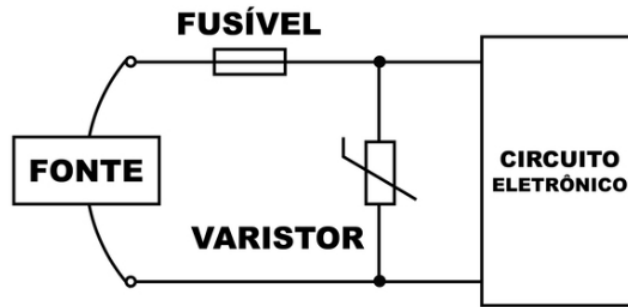


Figura 12: Exemplo de Aplicação do Varistor

3.4.2 Dimensionamento

Abordando agora os parâmetros do varistor para saber dimensioná-lo adequadamente para cada circuito.

1. V_{DC} : Tensão de operação. A tensão que o varistor começa a reduzir sua resistência e a conduzir.
2. V_{Max} : Tensão máxima suportada pelo varistor até que queime ou danifique.
3. I_{Max} : Corrente máxima suportada pelo varistor até que queime ou danifique.
4. P_{Max} : Potência máxima dissipada pelo varistor até que queime ou danifique.

3.5 Conclusão

Agora que foram apresentados os três componentes utilizados nos circuitos de proteção contra sobretensão, é possível analisar seus pontos fortes e limitações.

1. Diodo TVS: É um ótimo componente para surtos rápidos e que demandam baixa energia. Contudo, quando o surto é mais forte e o pico de tensão é muito alto ou por um período maior, o diodo TVS não consegue dissipar toda a energia e pode acabar queimando.
2. Diodo Zener: Cumpre muito bem a função de estabilizar a tensão, então é adequado para circuitos mais sensíveis, como microcontroladores e sensores. Contudo, seu tempo de ativação é mais demorado, então se a sobretensão for elevada, mesmo ativando, pode não ser rápido o bastante para proteger o sistema.
3. Varistor: Apesar de ser muito eficiente com sobretensão prolongada e de alta potência, ele não é eficiente quando a sobretensão é constante. Também possui um tempo de resposta lento, apresentam maior corrente de fuga¹ e possui uma alta capacitância parasita, o que pode levar à alguma distorção em sinais de alta frequência.

¹Corrente de fuga é uma pequena corrente que flui por uma parte do circuito onde não deveria, podendo causar interferências ou até danificando algum componente.

Com a análise dos três componentes, nota-se que todos são úteis em suas respectivas aplicações, mas possuem suas limitações. Então cada sistema terá seu circuito de proteção mais adequado, ou até mesmo mais de um, assim havendo uma redundância e protegendo ainda mais.

4 Sobrecorrente

Similar à sobretensão, a sobrecorrente ocorre quando uma corrente superior a que é suportada pelo sistema passa pelo circuito (RODERICK, 2021). Há uma diferença entre pico de corrente e sobrecorrente. O pico de corrente dura por um período extremamente curto de tempo, milésimos ou centésimos de segundos (MATTEDE, s.db), e está atrelado a corrente de partida ou *inrush current* dos motores, que também será abordado nesse documento. A sobrecorrente, por outro lado, se mantém por um tempo maior, gerando um calor excessivo (efeito Joule), podendo derreter o isolamento dos fios, o que aumentam muito as chances de um curto-circuito (também será abordado com mais detalhes nas próximas seções). Além do aumento da temperatura, essa falha também danifica os componentes.

4.1 Funcionamento do circuito de proteção

Como explicado, a falha de sobrecorrente é muito perigosa, tanto para o circuito, pois danifica seriamente os componentes, como para as pessoas, visto que a sobrecorrente gera um calor excessivo no sistema, podendo causar incêndio, que por sua vez, acaba liberando fumaça tóxica. Portanto é de extrema importância que o sistema possua algum circuito capaz de impedir que essa catástrofe ocorra. Nas próximas seções serão abordados esses circuitos, dando exemplos de suas aplicações, como funcionam e como dimensioná-los, como por exemplo o termistor PTC e o e-Fuse.

4.2 Termistor PTC

De acordo com a EE Power, em (POWER, s.d) o termistor PTC é um tipo de resistor que varia sua resistência de acordo com a temperatura. Existem dois grupos de termistor, o composto por silistores (seu material semicondutor usado é o silicone) e o termistor chaveado. De forma simples, o primeiro funciona de forma linear, ou seja, sua resistência aumenta gradualmente conforme a temperatura. Já o segundo mantém uma resistência relativamente constante, mas ao alcançar uma determinada temperatura, sua resistência aumenta muito, assim como mostra a Figura 13 abaixo.

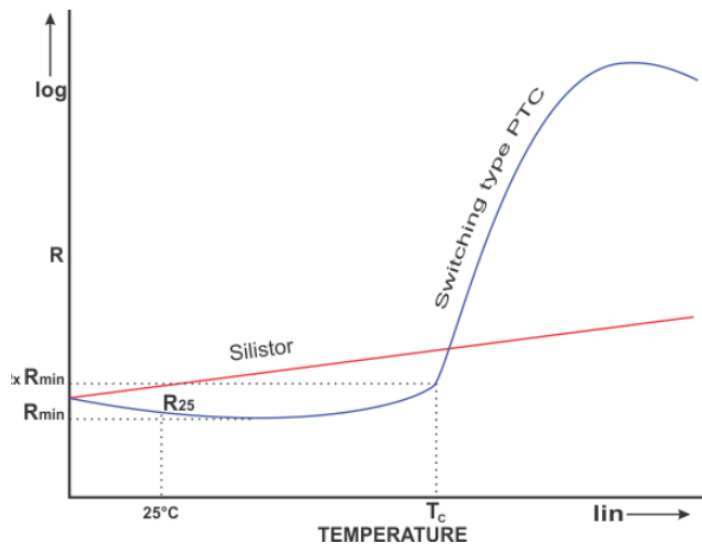


Figura 13: Gráfico de Comparação dos Dois Tipos de Termistor

4.2.1 Esquemático

O termistor PTC pode ter duas formas de representação em um esquemático. Elas estão representadas pelas Figuras 14 e 15.

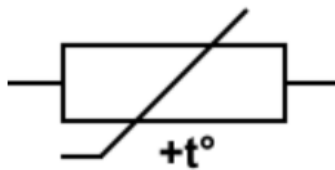


Figura 14: Simbologia do Termistor - A

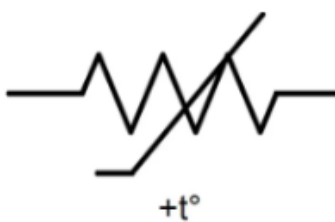


Figura 15: Simbologia do Termistor - B

Pelo seu funcionamento ser bem simples, sua forma de aplicação também é bem simples, assim como mostra a Figura 16. Basta utilizá-lo em um divisor de tensão.

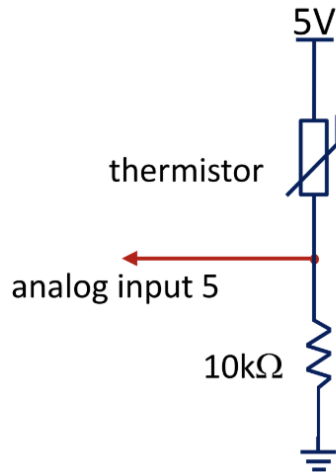


Figura 16: Exemplo de Circuito com o Termistor

4.2.2 Dimensionamento

Falando agora dos parâmetros que o termistor possui. São poucos e relativamente simples de entender:

1. R_{25} : Resistência a 25°C. Esse parâmetro indica qual a resistência o termistor terá quando estiver operando em temperatura ambiente, sendo 25°C a temperatura adotada como padrão.
2. V_{Max} : Tensão máxima. É a máxima tensão que o termistor suporta sem ser danificado.
3. T_{Op} : Temperatura de operação. Essa é a máxima e mínima temperatura que o termistor pode operar sem nenhuma falha.
4. R_{Ref} : Resistência de referência: Valor de resistência em que a resistência começa a aumentar drasticamente.
5. T_{Ref} : Temperatura de referência: Temperatura em que a resistência começa a aumentar drasticamente.

Algumas siglas para os parâmetros variam dependendo do Datasheet, e foram apontados apenas esses cinco, mas há diversos outros. Portanto, fica a recomendação da leitura completa do Datasheet do componente que será utilizado para melhor compreensão de seu funcionamento.

4.3 e-Fuse

O e-Fuse é um CI² que tem diversas aplicações, mas nessa seção será abordada sua capacidade de proteção contra sobrecorrente. Por existirem diversos e-Fuses, com várias configurações diferentes, nesse documento foi utilizado o STEF05L como exemplo. Portanto as imagens, nome

²Circuito Integrado. Pode conter em seu circuito interno componentes como MOSFETs, transistores, outros circuitos lógicos, resistores, entre outros.

dos pinos e parâmetros são referentes a ele e de acordo com o Datasheet. Abaixo seguem as Figuras 17 e 18, que representam o diagrama de blocos e configuração dos pinos, respectivamente.

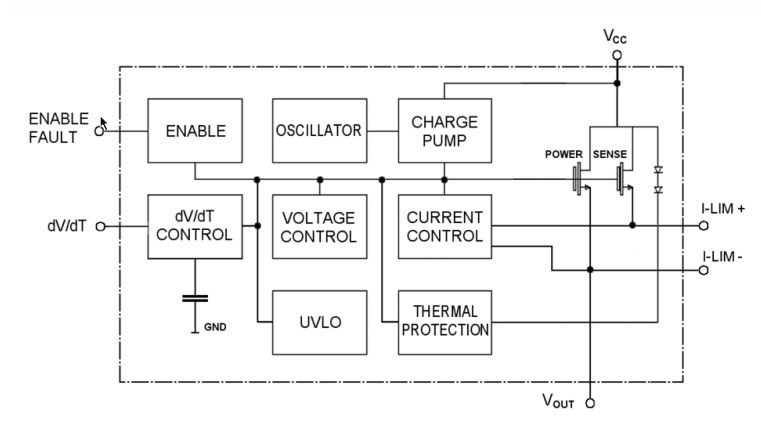


Figura 17: Diagrama de Blocos

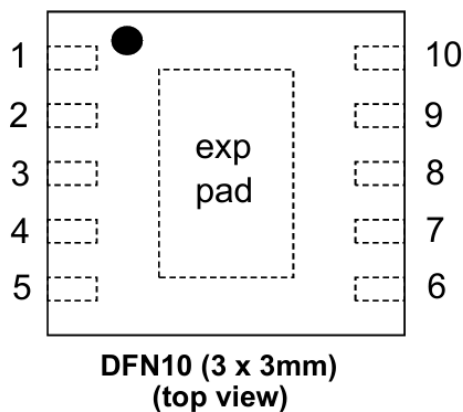


Figura 18: Configuração de Pinos

Com base na Figura 18, agora será explicado os pinos e suas funções.

- 1,2,3,4 e 5 são os pinos de saída de tensão, ou seja, são eles que alimentarão o restante do sistema.
- 6 e 7 são o *I-limit -* e o *I-limit +*, respectivamente. Entre eles é colocado um resistor que limita a corrente máxima.
- 8 é o En/Fault. Ele é responsável por ativar e desativar as saídas. Em um funcionamento normal, esse pino não precisa ser ligado a nada, mas caso haja a necessidade de desativar as saídas, basta conectá-lo ao terra. Ele também faz a função de indicar a falha por sobreaquecimento, mandando tensão.
- 9 é o dv/dt. Ele faz a função de atrasar a tensão liberada nas saídas. O CI, por natureza, tem um atraso de 1,4ms, mas caso seja necessário aumentar esse atraso basta colocar um capacitor nesse pino.

- 10 é o GND (terra) do CI.
- exp pad é o pad de alimentação (VCC).

Todos os parâmetros e pinos possuem seus dimensionamentos e limites de tensão e corrente. Por isso, deve-se atentar com as especificações no Datasheet do modelo utilizado.

4.3.1 Limitador de Corrente

Tratando da função de limitar a corrente do e-Fuse. Ela é definida escolhendo o resistor R_{Limit} , que fica entre o $I\text{-}limit\text{-}$ e o $I\text{-}limit\text{+}$. Vale ressaltar também que a limitação da corrente varia de modelo para modelo.

Quando ocorre um evento de sobrecarga, o circuito de limitação de corrente reduz a condutividade do MOSFET de potência para limitar a corrente de saída ao valor selecionado externamente por meio do resistor de limitação R_{Limit} .

4.3.2 Esquemático

A forma como os CI's são representados, em geral, são bem simples. Normalmente são representados como um retângulo e com seus pinos saindo pelas laterais, assim como mostra a Figura 19 abaixo.

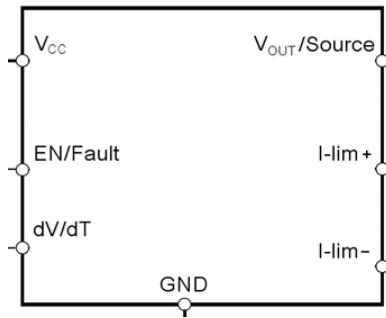


Figura 19: Esquemático do e-Fuse

Um exemplo do e-Fuse sendo aplicado em um circuito pode ser observado na Figura 20 abaixo.

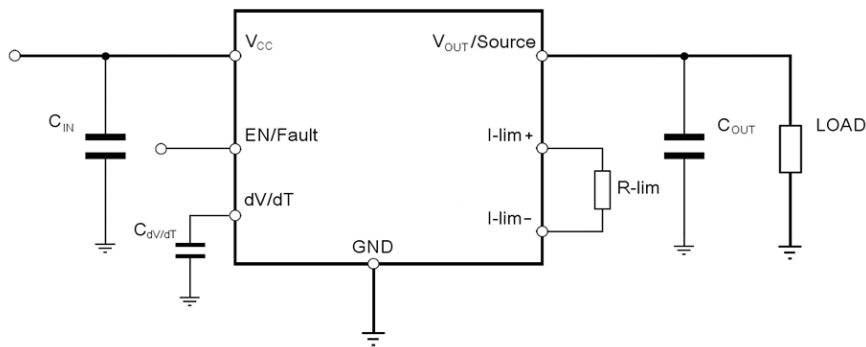


Figura 20: Circuito de exemplo do e-Fuse

4.3.3 Dimensionamento

Como mencionado, nessa seção será abordado apenas a capacidade de proteção contra sobre-corrente do e-Fuse. Portanto, será apresentado apenas o dimensionamento do R_{Limit} , resistor responsável por dimensionar a corrente limite do circuito.

Primeiramente deve ser explicado os dois tipos de limitação que o e-Fuse possui: O I_{Short} e o I_{Limit} . O primeiro identifica um aumento na corrente imposto quando há uma queda abrupta de tensão na saída, como no caso de um curto-circuito. Já o segundo é o ponto em que o dispositivo identifica uma condição de sobre-corrente. Ao atingir esse nível, o e-Fuse entra em modo de limitação de corrente, e restringe a corrente para o valor do I_{Short} , que geralmente é menor que o I_{Limit} .

O valor do resistor necessário para alcançar a limitação de corrente desejada pode ser estimado utilizando o gráfico "Current limit vs RLimit (IOUT ramp)", apresenta na Figura 21.

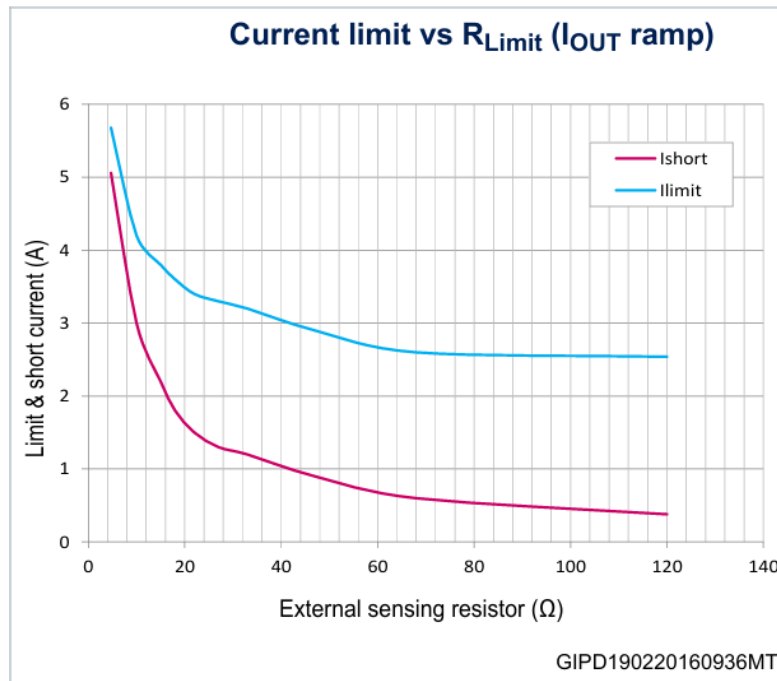


Figura 21: Current limit vs RLimit (IOUT ramp)

4.4 Conclusão

Comparando os circuitos de proteção contra sobre-corrente, nota-se que cada um tem sua aplicação, sendo o termistor muito útil para sistemas em que o aumento da temperatura proveniente de uma sobre-corrente é um problema. Já o e-Fuse é mais adequado para circuitos sensíveis, como sensores e microcontroladores, devida a sua rápida velocidade de detecção, quando comparada com o termistor.

5 Corrente de Inrush

A corrente de Inrush, como já adiantado na seção anterior, ocorre no momento em que o circuito é energizado, devido à baixa impedância do circuito (baixa impedância, alta corrente). Está presente em quase todos os circuitos que não possuem uma proteção contra isso, contudo, é mais prejudicial em sistemas em que a tensão de alimentação é elevada. No contexto da guerra de robôs, observou-se que a partir de 4S (16.8V), essa corrente é mais elevada e acaba gerando *sparks*³.

5.1 O que é Inrush Current?

A corrente de Inrush é a corrente elétrica de energização de um circuito quando alimentado por uma fonte senoidal de tensão. Trata-se de uma corrente transitória que pode atingir um valor de pico superior a 20 vezes o valor de pico da corrente elétrica nominal, podendo se assemelhar a um curto-circuito no instante da energização.

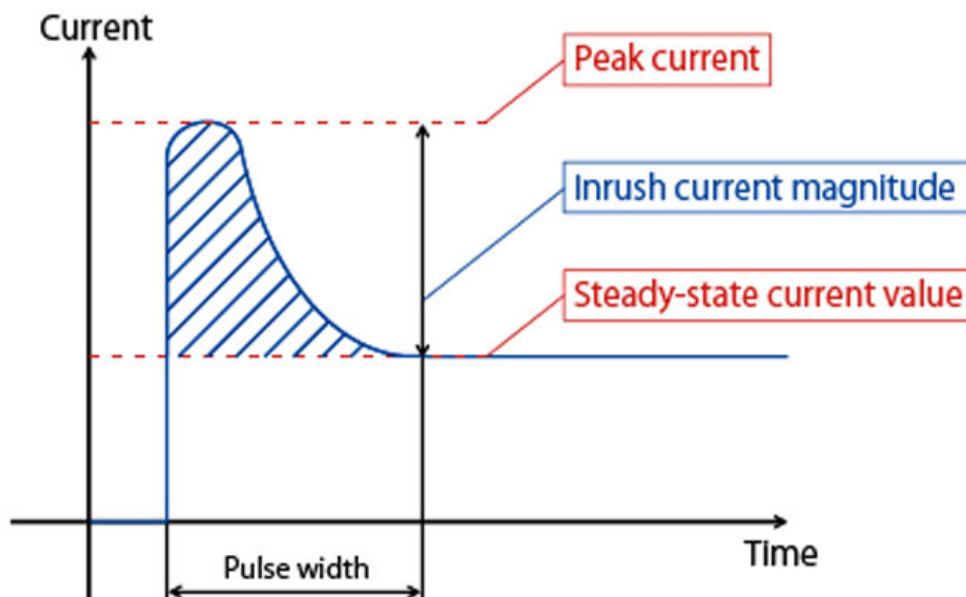


Figura 22: Inrush Current

5.2 Funcionamento do circuito

Esse circuito funciona limitando a corrente inicial para evitar picos elevados no momento da energização. Quando a alimentação é aplicada, a corrente de partida é controlada de forma progressiva, reduzindo o impacto sobre a fonte e os componentes conectados. Isso é feito por meio de MOSFETs que regulam o fluxo de corrente, permitindo que a tensão de saída aumente gradualmente. Após um curto período, o circuito permite o fluxo normal de corrente, garantindo uma operação estável e protegendo contra variações bruscas.

³Termo usado para as faíscas que são geradas no momento em que o robô é ligado. Ocorre tanto na fonte de bancada como ligando-o na bateria e girando a chave-geral.

5.2.1 Esquemático

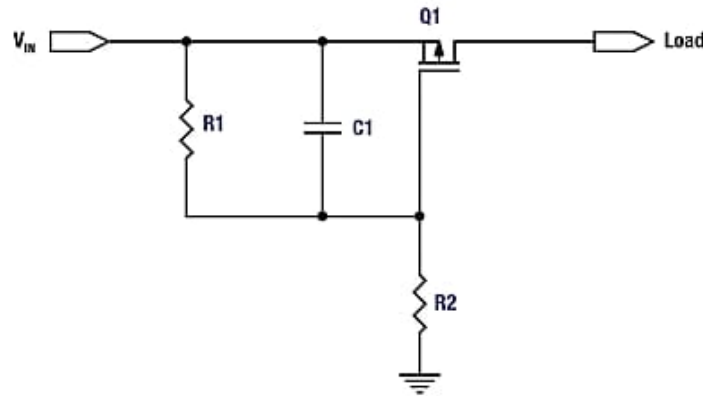


Figura 23: Esquemático de exemplo

O circuito analisado é um limitador de corrente de inrush baseado em um MOSFET de canal P e um circuito RC. Sua principal função é controlar a corrente de partida ao energizar um sistema, evitando picos que poderiam danificar componentes eletrônicos ou causar oscilações indesejadas.

Quando a alimentação V_{in} é aplicada, o capacitor $C1$ encontra-se inicialmente descarregado e começa a carregar através do resistor $R2$. Durante esse período, a tensão no gate do MOSFET V_{gs} aumenta progressivamente. No instante inicial, V_{gs} está próximo de V_{in} , o que faz com que o MOSFET opere na região linear. Nesse estado, o componente apresenta um comportamento resistivo, limitando a corrente que flui para a carga. À medida que o $C1$ continua carregando, o V_{gs} sobe e, conseqüentemente, a diferença de potencial entre gate e source diminui. Quando o V_{gs} atinge o limiar de condução do MOSFET V_{th} , o transistor começa a entrar na saturação. Nesse regime, a resistência entre drain e source reduz-se significativamente, permitindo a condução total da corrente. Como resultado, a ativação da carga ocorre de maneira gradual e exponencial, garantindo um soft-start eficiente e prevenindo picos de corrente.

5.2.2 Dimensionamento

Para a escolha do MOSFET no circuito de limitação de corrente de inrush, é essencial considerar alguns parâmetros básicos. O componente deve ser um MOSFET de canal P, adequado para a configuração do circuito.

A tensão máxima do MOSFET deve ser maior que a tensão de entrada para evitar falhas elétricas. Além disso, a corrente de dreno deve ser suficiente para suportar a carga sem risco de superaquecimento.

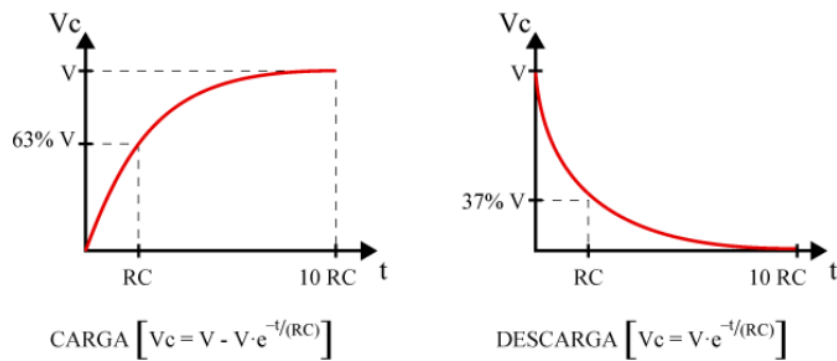


Figura 24: Carga e Descarga

(FERNANDES, s.d) A constante de tempo RC representa o tempo necessário para que a tensão em um capacitor, em um circuito série com um resistor, atinja aproximadamente 63.2% do valor da tensão de alimentação. Esse tempo é determinado pela equação $T=R \times C$, onde R é a resistência em ohms e C a capacitância em farads.

O processo de carregamento ocorre de forma exponencial, com o capacitor acumulando carga de maneira progressiva. A cada constante de tempo, ele se aproxima mais da tensão final, atingindo cerca de 99.24% após cinco constantes de tempo, sendo considerado totalmente carregado para efeitos práticos. Da mesma forma, durante a descarga, o capacitor perde 63.2% da tensão restante, seguindo um comportamento simétrico ao carregamento.

Na prática, o carregamento nunca é instantâneo devido à resistência dos próprios componentes do circuito, como a resistência interna da fonte de alimentação e dos condutores. Esse conceito é fundamental para o entendimento de circuitos eletrônicos, incluindo filtros, temporizadores e sistemas de proteção.

Os valores dos capacitores e resistores no circuito devem ser ajustados de acordo com o tempo de subida desejado. O tempo de subida é determinado pela constante de tempo do circuito RC , influenciando a velocidade com que a tensão atinge seu valor final.

Um aumento na capacitância ou na resistência resulta em um tempo de subida maior, proporcionando uma ativação mais suave do circuito. Por outro lado, valores menores desses componentes reduzem o tempo de subida, tornando a ativação mais rápida. Dessa forma, o dimensionamento adequado garante um controle eficiente da corrente de inrush.

Os valores dos capacitores e resistores no circuito devem ser ajustados de acordo com o tempo de subida desejado. O tempo de subida é determinado pela constante de tempo do circuito RC , influenciando a velocidade com que a tensão atinge seu valor final. (BRAGA, s.db)

5.2.3 Conclusão

A aplicação desse circuito é vantajosa em sistemas que contêm componentes sensíveis, como microcontroladores, reguladores de tensão e circuitos capacitivos de alta capacidade, onde o controle da corrente de partida é essencial para a preservação da integridade dos dispositivos.

6 Curto-circuito

6.1 O que é

(BRAGA, s.da)

Dentre todas as falhas apresentadas até agora, o curto-circuito é, sem dúvida, o mais conhecido. Curto-circuito nem sempre é uma falha ou problema no sistema, esse termo é utilizado quando alguma ligação está diretamente conectada, sem resistência ou impedância dificultando a ligação. No caso de uma ligação entre o positivo (VCC) e o negativo (GND), esse curto é direto, e um curto desse tipo possui uma resistência muito próxima de 0Ω , fazendo com que a corrente tenda ao infinito. Quando esse problema ocorre entre os *pads* de, por exemplo, um microcontrolador, driver, atuador, sensor, ou outros componentes mais sensíveis e que a tensão de operação é baixa, apenas esse componente que entrou em curto será danificado. Porém, se esse curto ocorrer entre os fios da bateria ou qualquer outro meio que está alimentando o sistema, causará um curto-circuito mais grave, gerando muito calor e possivelmente fogo. Esse problema se agrava ainda mais no âmbito da robótica, em que são utilizadas, principalmente baterias de LiPo, que não possui um sistema de proteção contra curtos e liberam toda a sua carga de uma vez, tornando o curto ainda mais perigoso.

6.2 Tipos de Equipamentos de Proteção Contra Curto-Circuito

(GARBIN, s.d)

Nessa seção serão apresentados alguns componentes capazes de proteger o sistema contra o curto-circuito, seu funcionamento e construção.

- **Fusíveis:** Os fusíveis são dispositivos de proteção que consistem em um filamento ou lâmina de metal que se funde quando a corrente elétrica excede um determinado valor. Eles são instalados em série com o circuito elétrico e, quando ocorre um curto-circuito, o filamento se rompe, interrompendo o fluxo de corrente.
- **Disjuntores:** Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos que desempenham a mesma função dos fusíveis, mas com a vantagem de poderem ser rearmados após a interrupção do fluxo de corrente. Eles são compostos por um interruptor eletromagnético e um dispositivo de disparo térmico, que atua em caso de sobrecarga ou curto-circuito.
- **Relés de Proteção:** Os relés de proteção são dispositivos eletrônicos que monitoram constantemente o fluxo de corrente elétrica em um circuito e atuam para interrompê-lo em caso de curto-circuito. Eles são amplamente utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica e oferecem uma proteção mais precisa e sensível em comparação com fusíveis e disjuntores.

6.3 Fusíveis de Proteção Contra Curto-Circuito

Os fusíveis são dispositivos essenciais para a proteção de sistemas elétricos, garantindo a segurança operacional e prevenindo danos decorrentes de sobrecorrentes. Em situações de curto-circuito, a corrente elétrica pode aumentar abruptamente, resultando em aquecimento excessivo, riscos de incêndio e danos a componentes eletrônicos. Para mitigar esses efeitos, os fusíveis atuam interrompendo o fluxo de corrente ao fundirem um elemento interno, proporcionando assim uma barreira eficaz contra falhas mais severas.

Devido à sua simplicidade, confiabilidade e baixo custo, os fusíveis são amplamente empregados em diferentes contextos, incluindo instalações residenciais, industriais e comerciais. Dentre as diversas categorias disponíveis, os fusíveis do tipo elo destacam-se pela robustez e eficiência na proteção contra curtos-circuitos.

6.4 Critérios para a Seleção de Fusíveis de Proteção Contra Curto-Circuito

A escolha adequada de um fusível de proteção contra curto-circuito deve considerar parâmetros técnicos fundamentais, como a corrente nominal do circuito, a tensão de operação e a capacidade de interrupção.

A corrente nominal do fusível deve ser selecionada de forma que seja igual ou ligeiramente superior à corrente máxima prevista no circuito, evitando disparos indesejados e garantindo proteção eficaz. Além disso, a escolha entre fusíveis de ação rápida ou retardada deve estar alinhada à aplicação específica: fusíveis rápidos são indicados para a proteção de componentes eletrônicos sensíveis, enquanto fusíveis retardados são mais adequados para circuitos sujeitos a picos momentâneos de corrente, como aqueles que alimentam motores elétricos.

Por fim, é essencial que o fusível selecionado seja compatível com o soquete ou suporte utilizado no sistema, garantindo a correta instalação e funcionamento dentro dos parâmetros de segurança estabelecidos pelas normas técnicas vigentes.

6.5 Esquemático

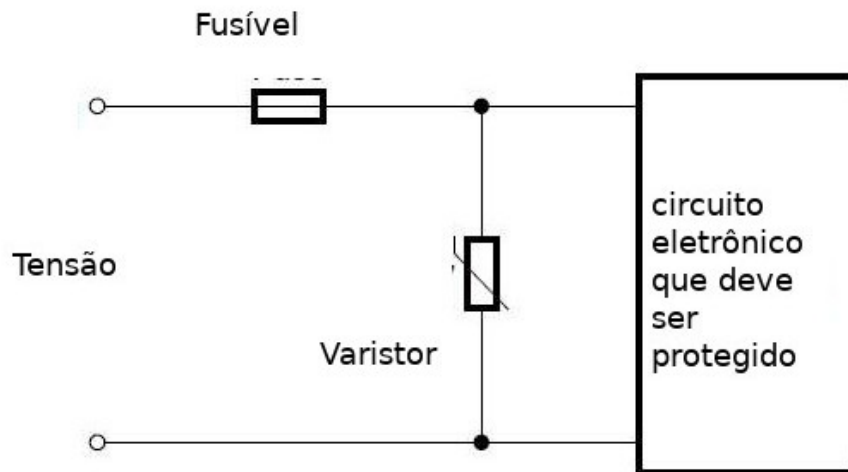


Figura 25: Circuito Exemplo

(MATAN, s.d) No circuito proposto, o fusível rearmável PTC (Positive Temperature Coefficient) desempenha um papel crucial na proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos. Quando ocorre um aumento na corrente elétrica, o PTC aquece devido ao fluxo excessivo de corrente. Esse aquecimento faz com que a resistência do PTC aumente consideravelmente, o que limita a passagem de corrente no circuito, prevenindo danos aos componentes eletrônicos. Esse comportamento protege o circuito de maneira eficiente, reduzindo o risco de falhas graves.

Uma característica importante do fusível PTC é sua capacidade de retornar ao funcionamento normal após a falha ser resolvida. Quando a corrente diminui para níveis seguros, o PTC esfria e sua resistência retorna ao valor inicial, permitindo que a corrente flua novamente de forma normal. Esse processo elimina a necessidade de substituição manual de fusíveis, tornando o sistema mais prático e de manutenção mínima, ao mesmo tempo em que mantém a proteção contínua do circuito. Essa abordagem proporciona uma solução eficiente para circuitos que podem ser submetidos a falhas esporádicas, sem a necessidade de intervenção constante.

7 Soft Start

Soft Start é um outro tipo de circuito de proteção, que tem como principal função reduzir a corrente de Inrush, já explicada anteriormente na seção 5.

7.1 Funcionamento

Ele atua controlando a tensão que chegará no circuito de forma gradual, podendo ser de forma eletrônica, no caso dos *Soft Starters*, utilizados para controlar a corrente de Inrush de motores trifásicos, ou utilizando resistores, capacitores e mosfets e criando um circuito para essa função de forma livre.

7.2 Circuito de Exemplo

Nessa seção será apresentado um circuito simples de Soft Start que pode ser customizado dependendo da carga, tensão e corrente que vai ser submetido.

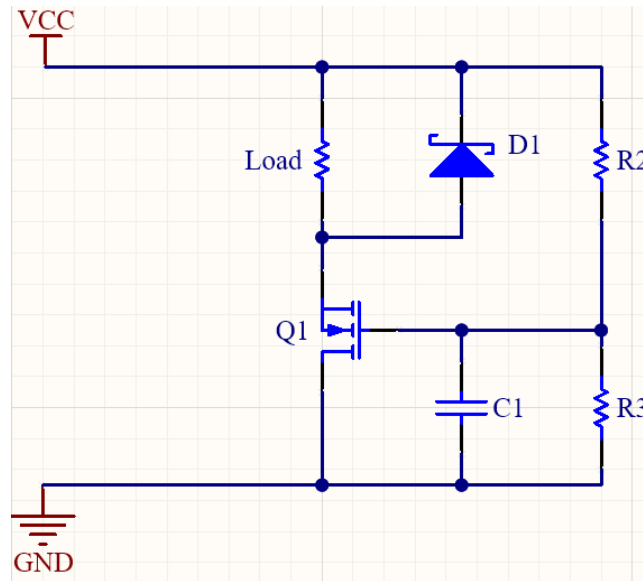


Figura 26: Circuito Exemplo

A Figura acima se refere ao circuito-exemplo. Nele, a fim de simplificar o circuito, o resistor nomeado como "Load" simboliza qualquer carga do sistema, como um motor, led, servo motor ou atuador. Nesse exemplo o D1 é um diodo Schottky, mas também pode ser utilizado um diodo flyback para proteger o sistema⁴. O R2 está ali para limitar a corrente que chegará no Gate do MOSFET. O C1 e o R3 são os componentes que definem o tempo da inicialização, por meio da fórmula:

$$\tau = C \times R$$

Nela, o τ representa o tempo em segundos que leva para o capacitor carregar cerca de 63%. Dessa forma, tendo o conhecimento do VCC e da tensão limiar do MOSFET, é possível calcular os valores do R3 e C1 para determinar o tempo em que ocorrerá o chaveamento.

Por fim, o Q1 é o MOSFET. Ele deve ser dimensionado pensando na corrente máxima que o circuito pode atingir, tensão de alimentação e tensão limiar.

Esse circuito foi retirado de um vídeo do YouTube, do canal Lari Fari. Ao final, é mostrado o funcionamento do circuito e comparado o acionamento de um motor DC com e sem o Soft Starter. [Vídeo](#).

⁴O diodo flyback ou diodo de roda-livre é usado para proteger contra tensão induzidos por cargas indutivas, como motores, solenóides e relés

8 e-Fuse

8.1 Funcionalidades

O e-Fuse já foi mencionado e uma de suas funções explorada na seção 4.3. Nela foi dada uma breve explicação sobre o que é o e-Fuse e como funciona seu limitador de corrente. Contudo, nessa seção será abordado esse CI de forma geral, falando de todas as suas funções.

O e-Fuse possui cinco principais funções de proteção: proteção contra sobrecorrente, sobre-tensão, curto-circuito, proteção térmica, e soft-start. A seguir será detalhado o funcionamento de cada uma dessas proteções, com exceção da sobrecorrente e curto-circuito, que já foram melhor abordadas nas seções anteriores. Vale ressaltar novamente a importância de checar o Datasheet do modelo utilizado, uma vez que, o foco desse documento não é abordar valores e parâmetros específicos dos componentes, e sim explicar seu funcionamento e dimensionamento.

8.1.1 Sobretensão

O mecanismo de proteção contra sobretensão é muito parecido com os já abordados nesse documento. O circuito possui um V_{Clamp} , tensão que o circuito estabiliza a tensão.

8.1.2 Proteção Térmica

Caso o circuito exceda uma temperatura limite, normalmente de 160°C , o CI desconecta o MOSFET, desligando o restante do circuito. O pino EN/Fault possui uma função crucial nesse cenário. Em caso de uma falha por aumento na temperatura, ele envia um sinal intermediário de tensão, no modelo usado de exemplo, a tensão está entre $2,5\text{V}$ e $0,9\text{V}$, aproximadamente, assim como mostra o gráfico na Figura 27

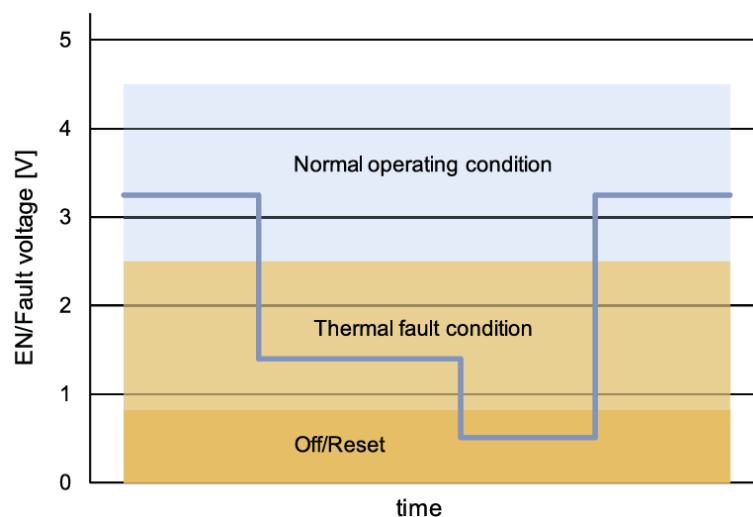


Figura 27: Gráfico de Funcionalidade Lógica do EN/Fault

8.1.3 Soft Start

Tipicamente, o e-Fuse possui um intervalo em que a tensão na saída vai de 10% até 90% de 1,4ms. Mas, caso seja necessário aumentar esse intervalo, é possível adicionar um capacitor em série com esse pino.

9 Conclusão

Com todas as falhas, bem como seus respectivos circuitos de proteção, explicados, foi possível concluir que para a maioria das falhas há sempre uma maneira de dimensionar um circuito capaz de impedi-la ou amenizá-la, podendo ser de forma mais simples, barata e fácil, porém não tão confiável, ou de uma forma mais elaborada e cara, porém mais segura. Não só isso, mas também que os circuitos de proteção podem ser combinados, criando assim um sistema extremamente seguro contra essas falhas, aumentando sua segurança, confiabilidade e conservando seu bom funcionamento e componentes.

Uma sugestão para as próximas pesquisas é o aprofundamento em alguns CIs, como o próprio e-Fuse, buscando outros modelos e especificações. Também podem ser feitas pesquisas sobre circuitos de Hot Swap, seu funcionamento, características e suas aplicações. Além desses, durante as pesquisas para a redação desse artigo foram encontrados muitos outros circuitos de proteção bem complexos, como o circuito de Foldback (proteção contra sobrecorrente) e o Crowbar.

Referências

- ALVES, P. *Varistor – Para que serve e como funciona!* s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.manualdaeletronica.com.br/varistor-para-que-serve-como-funciona/>.
- BRAGA, N. C. *Circuito para proteção de Fontes*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://newtonbraga.com.br/projetos/10410-circuito-para-protecao-de-fontes-art2340.html>.
- BRAGA, N. C. *Constante de Tempo - Circuito RC*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/matematica-na-eletronica/2164-m128.html>.
- COMPONENTS, M. C. *Understanding TVS Diodes: A Comprehensive Guide*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://solutions.mccsemi.com/understanding-tvs-diodes-a-comprehensive-guide>.
- FERNANDES, S. *Circuito RC: Carga e descarga de capacitores*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://embarcados.com.br/circuito-rc-carga-e-descarga-de-capacitores/>.
- GARBIN, V. A. *O que é Equipamentos de Proteção Contra Curto-Circuito*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://poloeletronica.com.br/glossario/o-que-e-equipamento-s-de-protecao-contr-curto-circuito/>.
- MAGNETISM, E. *Regulador de tensão de diodo Zener*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/regulador-de-tensao-de-diodo-zener/>.
- MATAN. *Cargas indutivas*. 2023. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/cargas-indutivas/>.
- MATAN. *Fusível rearmável (PTC)*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/fusivel-rearmavel-ptc/>.
- MATTEDE, H. *Diodo Zener, funcionamento e aplicações!* s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/diodo-zener-funcionamento-e-aplicacoes/>.
- MATTEDE, H. *Picos de energia – O que são e como acontecem?* s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/picos-de-energia-o-que-sao-com-o-acontecem>.
- NEGI, A. *TVS Diode Symbol, Working, Applications and Types*. 2024. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://www.etechnophiles.com/tvs-diode-symbol-working/>.
- POWER, E. *PTC Thermistor*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ptc-thermistor/#>.
- ROBÓTICA, A. *Funcionamento Resistores Pull-Up e Pull-Down*. s.d. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://autocorerobotica.blog.br/resistores-pull-up-e-pull-down-como-funcionam/>.
- RODERICK, A. *What are Overcurrent Protection Devices?* 2021. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://eepower.com/technical-articles/what-are-overcurrent-protection-devices>.

SILVEIRA, C.; MAZEGA, V. Automatização de regulação de tapes em transformador para minimizar efeitos de subtensão e sobretenção. p. 12, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/1107>.

ZACHARIAH, P. *Diretrizes de Design de PCB para Uso de Diodo TVS para Proteção Contra Transientes*. 2022. Acesso em: 01 Mar. 2025. Disponível em: <https://resources.altium.com/pt/p/pcb-design-guidelines-using-tvs-diode-transient-protection>.