

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Fontes de Energia para a Soldagem a Arco

Prof. Paulo J. Modenesi

Janeiro de 2009

Fontes de Energia para a Soldagem a Arco

1. Introdução:

A soldagem a arco exige um equipamento (fonte de energia ou máquina de soldagem) especialmente projetado para esta aplicação e capaz de fornecer tensões e corrente cujos valores se situam, em geral, entre 10 e 40V e entre 10 e 1200A, respectivamente. Desde as últimas décadas do século passado, tem ocorrido um vigoroso desenvolvimento (ou mesmo uma revolução) no projeto e construção de fontes para soldagem associados com a introdução de sistemas eletrônicos para o controle nestes equipamentos. Atualmente, pode-se separar as fontes em duas classes básicas: (a) máquinas convencionais, cuja tecnologia básica vem das décadas de 1950 e 60 (ou antes), e (b) máquinas "eletrônicas", ou modernas, de desenvolvimento mais recente (décadas de 1970, 80, 90 e 2000). No Brasil, ainda a grande maioria das fontes fabricadas são convencionais. Em países do primeiro mundo, a situação é bastante diferente. No Japão por exemplo, desde o século passado, as fontes fabricadas para os processos GTAW e GMAW são, na grande maioria, eletrônicas (figura 1). Nos Estados Unidos, mais da metade das fontes comercializadas para o processo GMAW são eletrônicas.

2. Requisitos Básicos das Fontes:

Existem três requisitos básicos que uma fonte de energia para soldagem a arco deve atender:

- produzir saídas de corrente e tensão nos valores desejados e com características adequadas para o processo de soldagem;
- permitir o ajuste destes valores de corrente e/ou tensão para aplicações específicas;
- variar a corrente e tensão durante a operação de acordo com os requerimentos do processo de soldagem e aplicação.

Adicionalmente, o projeto da fonte precisa atender outros requisitos tais como:

- estar em conformidade com exigências de normas e códigos relacionados com a segurança e funcionalidade;

- apresentar resistência e durabilidade em ambientes fabris, com instalação e operação simples e segura.;
- possuir controles/interface do usuário de fácil compreensão e uso;
- quando necessário, ter interface ou saída para sistemas de automação.

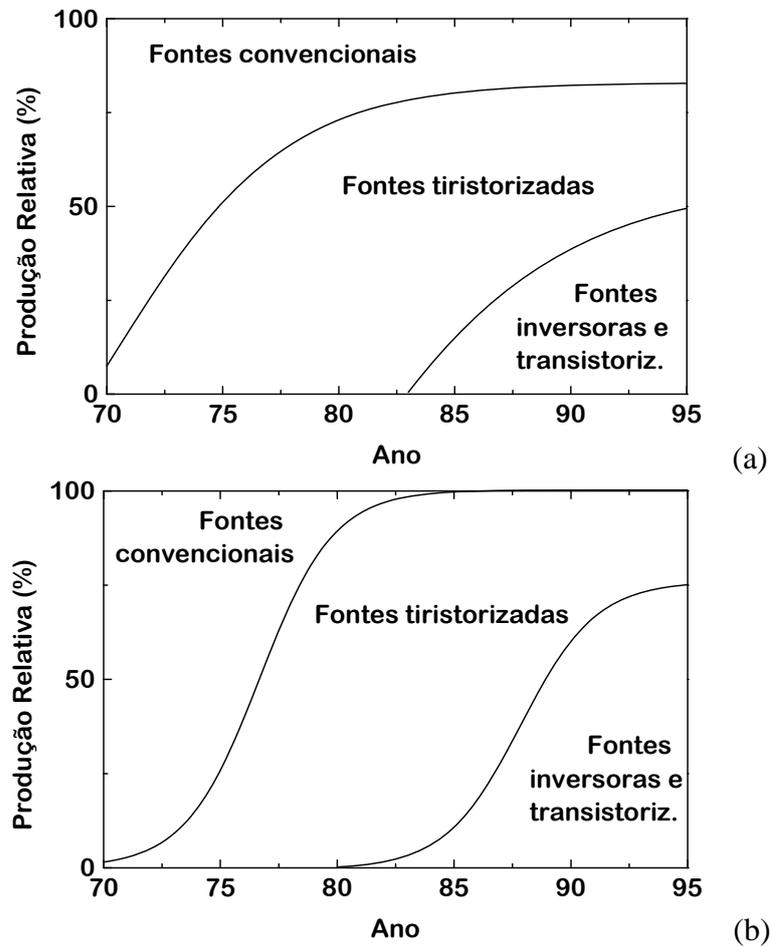


Figura 1 - Produção relativa de diferentes tipos de fontes no Japão. (a) Processo GMAW e (b) processo GTAW¹.

¹ Ushio, M. et al., *Trans. of the JWRI*, 23(1), 1994.

3. Fontes Convencionais:

Fontes de soldagem podem usar a energia elétrica fornecida pela rede de alimentação para produzir uma saída adequada para a soldagem ou converter alguma outra forma de energia para gerar a energia elétrica para a soldagem.

No primeiro caso, para produzir níveis de saída adequados para a maioria dos processos de soldagem a arco, a energia elétrica da rede precisa ser convertida de sua forma original (tensão relativamente elevada e alternada) para a forma adequada para a soldagem, o que significa menores valores de tensão (o que é também mais seguro para o soldador ou operador), na forma de corrente contínua, alternada, pulsada ou outra qualquer de acordo com o desejado. A redução do valor da tensão é feita, em geral, por um transformador comum e, nas máquinas convencionais, se corrente contínua é necessária, um banco de retificadores é colocado na saída do transformador. No segundo caso, a energia disponível (em geral na forma de combustíveis) é transformada em energia mecânica por um motor que aciona um gerador de energia elétrica.

As fontes de energia para soldagem apresentam uma série de características importantes para o seu funcionamento e para a seleção daquela mais adequada para uma dada aplicação. Algumas destas características serão discutidas abaixo.

3.1 Características Estáticas:

O funcionamento de uma fonte de energia depende fundamentalmente de suas características estáticas e dinâmicas. Ambas afetam a aplicabilidade do fonte para um dado processo de soldagem e a sua estabilidade, mas de uma forma diferente. Características estáticas se relacionam aos valores médios de corrente e tensão de saída da fonte determinados, em geral, pela aplicação de uma carga resistiva.

Para a fonte regulada em uma dada condição, as suas características estáticas podem ser representadas na forma de uma *curva característica estática* obtida através de testes com diferentes cargas resistivas. Alterando-se a regulagem da fonte alteram uma nova curva característica pode ser obtida. Exemplos destas curvas são, algumas vezes, publicados pelo fabricante no manual de sua fonte.

Com base na forma de suas curvas características, uma fonte convencional pode ser classificada como de corrente constante (**CI**) ou de tensão constante (**CV**). A figura 2 ilustra, de forma esquemática, estes dois tipos de curva característica. Nesta figura, estão sobrepostas às curvas da fonte, curvas características do arco elétrico. Estas figuras mostram, ainda, o ponto de operação do processo, dado pela interseção das duas curvas.

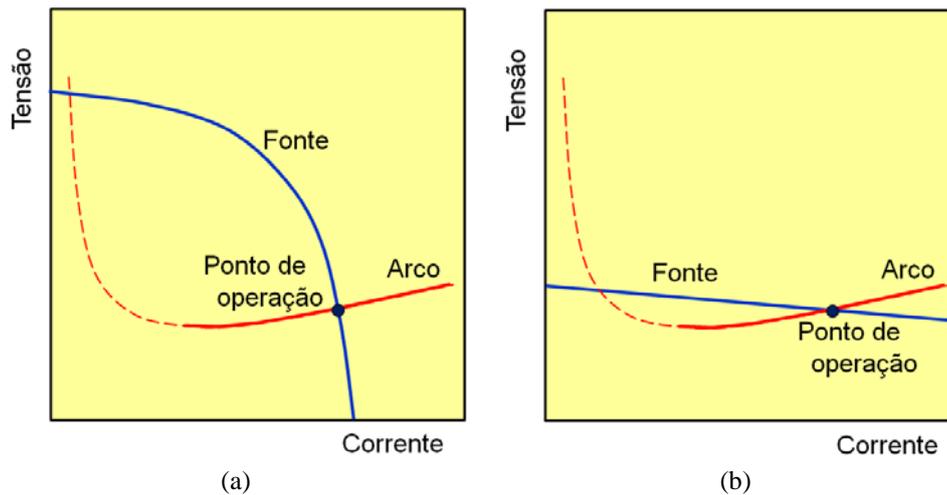


Figura 2 - Curvas características de fontes (a) CI e (b) CV.

A figura 3 mostra alguns aspectos importantes das curvas características. A tensão em vazio (U_0) é o valor fornecido pela fonte na ausência de qualquer carga (isto é, sem passagem de corrente). Um valor mais elevado de U_0 tende a facilitar o início do processo (abertura do arco), mas pode representar um maior risco para a segurança do soldador. A corrente de curto-circuito (I_{CC}) é o valor desta no caso de um curto. Em fontes de corrente constante, esta tende a ser apenas um pouco maior que a corrente média de operação enquanto que, em fontes de tensão constante, esta tende a atingir valores elevados (figura 2). Finalmente, o termo “slope” é comumente usado para designar a inclinação da curva característica, particularmente no trecho correspondente às condições operacionais.

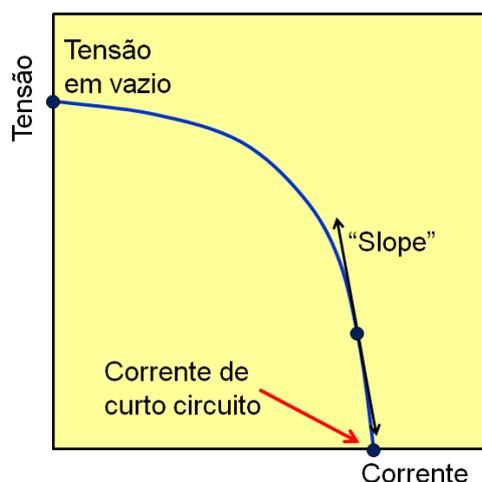


Figura 3 – Aspecto da curva característica.

As fontes de corrente constante (figura 2a) apresentam, em geral, uma tensão em vazio relativamente elevada (entre cerca de 55 e 85V). Na presença de uma carga, U_0 cai rapidamente e, no caso de um curto circuito, a corrente atinge um valor não muito elevado, a corrente de curto circuito (figura 3). A inclinação ou "slope" da curva característica tende a variar ao longo da curva, mas, na região de operação do arco, situa-se entre cerca de 0,2 e 1,0 V/A para fontes convencionais de CI. Máquinas modernas com saída de corrente constante podem ter, por outro lado, uma inclinação quase infinita, isto é, uma saída quase vertical na faixa de tensões de trabalho (ver item 4).

Máquinas de corrente constante permitem que, durante a soldagem, o comprimento do arco varie sem que a corrente de soldagem sofra grandes alterações (figura 4a). Eventuais curtos-circuitos entre o eletrodo e o metal de base não causam, também, uma elevação importante da corrente. Este tipo de equipamento é empregado em processos de soldagem manual, onde o soldador controla manualmente o comprimento do arco (SMAW, PAW e GTAW), em processos mecanizados de soldagem com eletrodo não consumível (PAW e GTAW) e, em alguns casos, em processos semi-automáticos, mecanizados ou automáticos com eletrodo contínuo consumível, quando o equipamento apresenta algum mecanismo especial de controle do comprimento do arco.

Fontes de tensão (figura 2b) constante fornecem basicamente a mesma tensão em toda a sua faixa de operação. O "slope" deste tipo de fonte situa-se entre cerca de 0,01 e 0,04V/A,

os maiores valores sendo mais adequados para a soldagem GMAW com transferência por curto circuito. Fontes CV permitem grandes variações de corrente em resposta a mudanças do comprimento do arco durante a soldagem (figura 4b). Este comportamento permite o controle do comprimento do arco por variações da corrente de soldagem (e, portanto, da taxa de fusão do arame) em processos de soldagem nos quais o arame é alimentado com uma velocidade constante, por exemplo, nos processos GMAW e SAW (ver seção 5.1). Adicionalmente, a grande elevação de corrente durante um curto-circuito do eletrodo com o metal de base, facilita a fusão e a transferência do metal fundido do eletrodo para a poça de fusão na soldagem com transferência por curto-circuito.

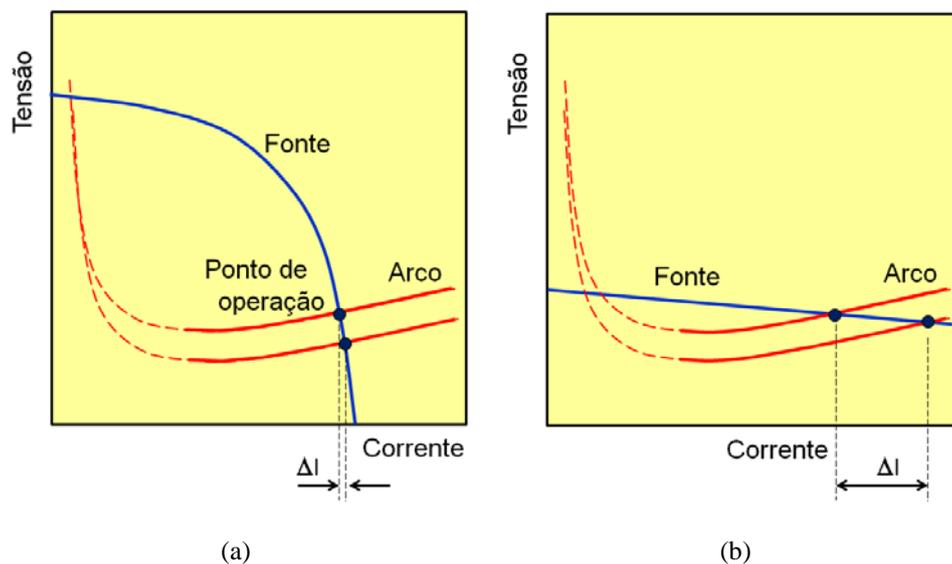


Figura 4 – Efeito da variação do comprimento do arco na corrente de soldagem com fontes de (a) corrente constante e de (b) tensão constante.

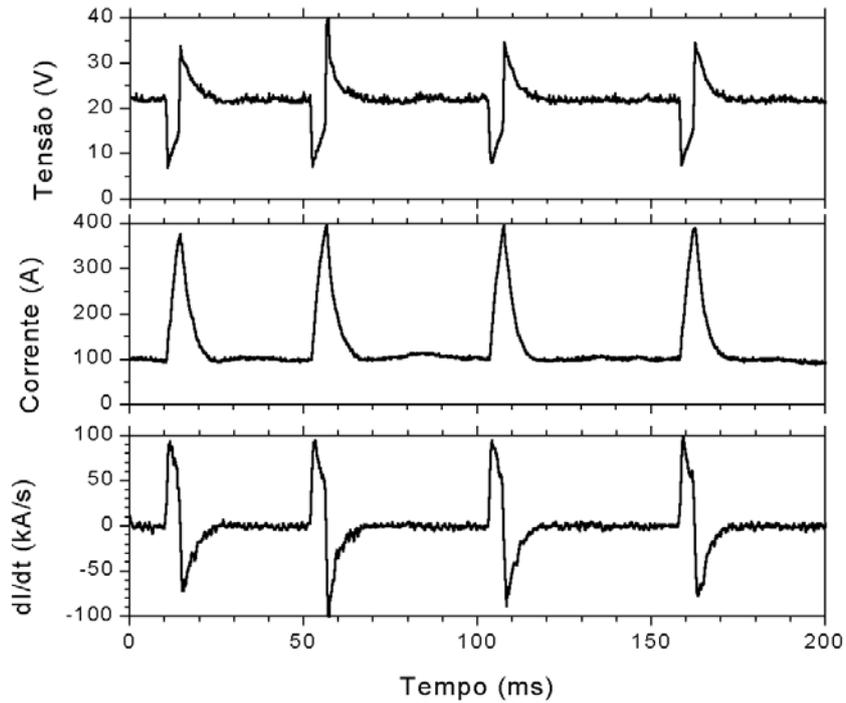
3.2 Características Dinâmicas:

Características dinâmicas de uma fonte envolvem as variações transientes de corrente e tensão associadas com as diversas mudanças que ocorrer durante o processo de soldagem. Estas variações podem envolver intervalos de tempo muito curtos, por exemplo da ordem de 10^{-3} s, sendo, portanto, de caracterização mais difícil do que as características estáticas. As características dinâmicas são importantes, em particular, (1) na abertura do arco, (2) durante mudanças rápidas de comprimento do arco, (3) durante a transferência de metal através do arco e (4), no caso de soldagem com corrente alternada, durante a extinção e

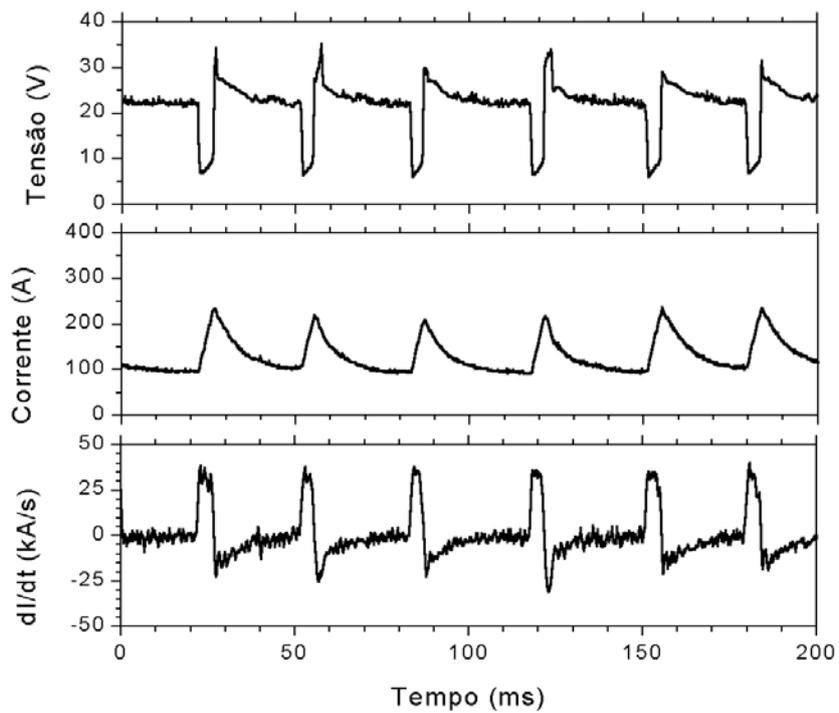
reabertura do arco a cada meio ciclo de corrente. As características dinâmicas das fontes são, em geral, afetadas por (1) dispositivos para armazenamento temporário de energia como bancos de capacitores ou bobinas de indutância, (2) controles retroalimentados em sistemas regulados automaticamente e (3) mudanças dinâmicas no formato e na frequência de saída da fonte. As duas últimas formas de controle das características dinâmicas não são usadas em fontes convencionais, sendo típicas de fontes com controle eletrônico.

Um controle relacionado com as características dinâmicas do processo e importante em fontes para a soldagem GMAW é o da *indutância* da fonte (ver o texto sobre transferência de metal no processo GMAW no texto “Introdução à Física do Arco Elétrico”). Na soldagem com transferência por curto-circuito, este controle permite ajustar as velocidades de subida da corrente elétrica durante o curto circuito e de sua redução ao término deste. Estas velocidades afetam de forma importante as condições de transferência e a estabilidade do processo. A figura 5 ilustra a influência destas velocidades (mostradas como gráficos da derivada da corrente em função do tempo, dI/dt) para testes de soldagem realizados com as demais regulagens do equipamento idênticas. Observa a maior frequência de curtos-circuitos para o teste realizado com maior indutância (isto é, com menor velocidade de variação da corrente de soldagem).

Alguns processos de soldagem a arco, particularmente a soldagem a arco submerso, podem utilizar mais de um arame. Nesta situação, os arames podem receber energia elétrica da mesma fonte ou de fontes separadas. Quando se trabalha com corrente alternada, uma diferente fase pode ser usada para cada arame. Estas situações não serão discutidas aqui. Para maiores informações, consultar, por exemplo, os capítulos 1 e 6 do *Welding Handbook*, Vol.2, 8ª Edição (editado pela American Welding Society).



(a)



(b)

Figura 5 – Oscilogramas com (a) baixa e (b) alta indutância. Arame AWS E70S6, 1,2mm com alimentação de 4m/min. Gás: Ar-4% CO₂.

3.3. Ciclo de Trabalho:

Os componentes internos de uma fonte se aquecem pela passagem da corrente elétrica durante a soldagem enquanto o arco estiver aceso. Por outro lado, quando o arco não

estiver operando, por exemplo, durante a troca de eletrodos, a remoção de escória ou durante a movimentação do cabeçote de um ponto de soldagem para outro, o equipamento pode se resfriar, particularmente quando este tiver ventiladores internos. Se a temperatura interna da fonte se tornar muito elevada por um certo período de tempo, esta poderá ser danificada pela queima de algum componente ou pela ruptura do isolamento do transformador ou poderá ter sua vida útil grandemente reduzida. A figura 6 ilustra esquematicamente os conceitos expostos acima. Observe que os ciclos de aquecimento e resfriamento devem ser alternados e com durações adequadas de forma que a temperatura interna da fonte não ultrapasse a sua temperatura crítica.

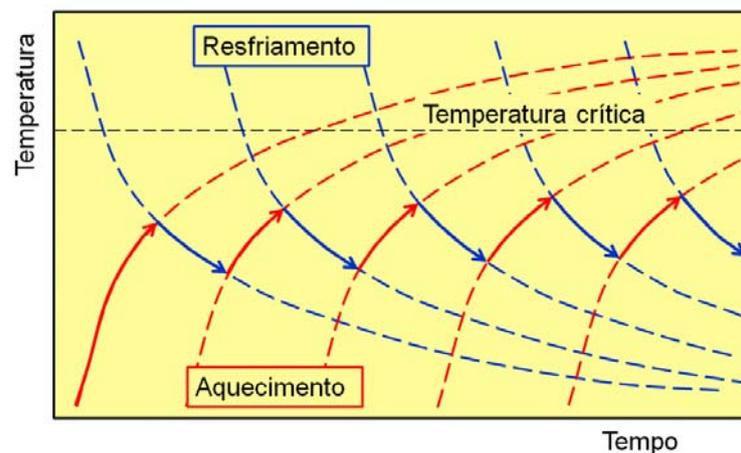


Figura 6 - Ciclos de aquecimento e resfriamento interno durante a operação de uma fonte.

O ciclo de trabalho (ou fator de trabalho) é definido como a relação entre o tempo de operação permitido durante um intervalo de teste *específico* (em geral, relativamente curto como, por exemplo, 10 minutos), isto é:

$$Ct = \frac{t_{ARCO}}{t_{TESTE}} \times 100$$

Assim, uma fonte com $Ct = 60\%$ pode operar por até 6 minutos em cada intervalo de 10 minutos (observação: o tempo de teste é padronizado, podendo variar de acordo com a norma considerada).

Para uma dada fonte, o valor do ciclo de trabalho vem geralmente especificado para um ou mais níveis de corrente de trabalho. É importante não utilizar uma fonte acima de seu ciclo

de trabalho de forma a evitar o aquecimento de seus transformador e outros componentes a temperaturas que podem levar à sua falha. O ciclo de trabalho deve ser selecionado de acordo com o tipo de serviço para o qual se pretende utilizar a fonte. Unidades para uso na indústria para soldagem manual são, em geral, especificadas com Ct de 60% na corrente de trabalho. Para processos semi-automáticos ou mecanizados, um Ct de 100% é mais adequado. Fontes de pequena capacidade, de uso esporádico doméstico ou em pequenas oficinas, podem ter um baixo ciclo de trabalho, por exemplo de 20%, .

Para se estimar o fator de trabalho de uma fonte para correntes de soldagem diferentes das especificadas pelo fabricante pode-se utilizar a fórmula abaixo:

$$Ct_1 \cdot I_1^2 = Ct_2 I_2^2$$

onde os Ct's e I's são os ciclos trabalho e as correntes nas condições 1 e 2. Por exemplo, para se usar uma fonte de 250 A/60% com uma corrente de 300 A (supondo que ele permita ajustar este nível de corrente), o ciclo de trabalho estimado será de:

$$Ct_2 = Ct_1 \frac{I_1^2}{I_2^2} \approx 40\%$$

Isto é, não se deve deixar a fonte operar por mais de 4 minutos em cada período de 10 minutos.

3.4. Tipos de fontes convencionais:

As fontes de energia convencionais para soldagem podem ser classificadas de diversas maneiras. A figura 7 mostra uma classificação destas fontes baseada em uma apresentada por Cary. A energia elétrica para soldagem pode ser gerada pela própria fonte no local de soldagem (fontes geradoras) ou obtida de uma rede de distribuição e transformada pela fonte (fontes conversoras). Em ambos os casos, a energia elétrica pode ser fornecida para soldagem na forma de corrente alternada (CA) ou contínua (CC).

Outra forma de classificação é pela sua curva característica de saída: fontes de corrente constante (CI) e fontes de tensão constante (CV). Fontes, ainda, podem ser classificadas de acordo com a suas características construtivas ou operacionais como, por exemplo, máquinas rotativas ou unidades moto-geradoras, máquinas estáticas, transformadores,

transformadores-retificadores, fontes para um operador, fontes para vários operadores, etc. Aspectos adicionais importantes para a classificação e seleção de fontes de energia são a sua capacidade ou corrente nominal e o seu ciclo de trabalho (item 3.3).

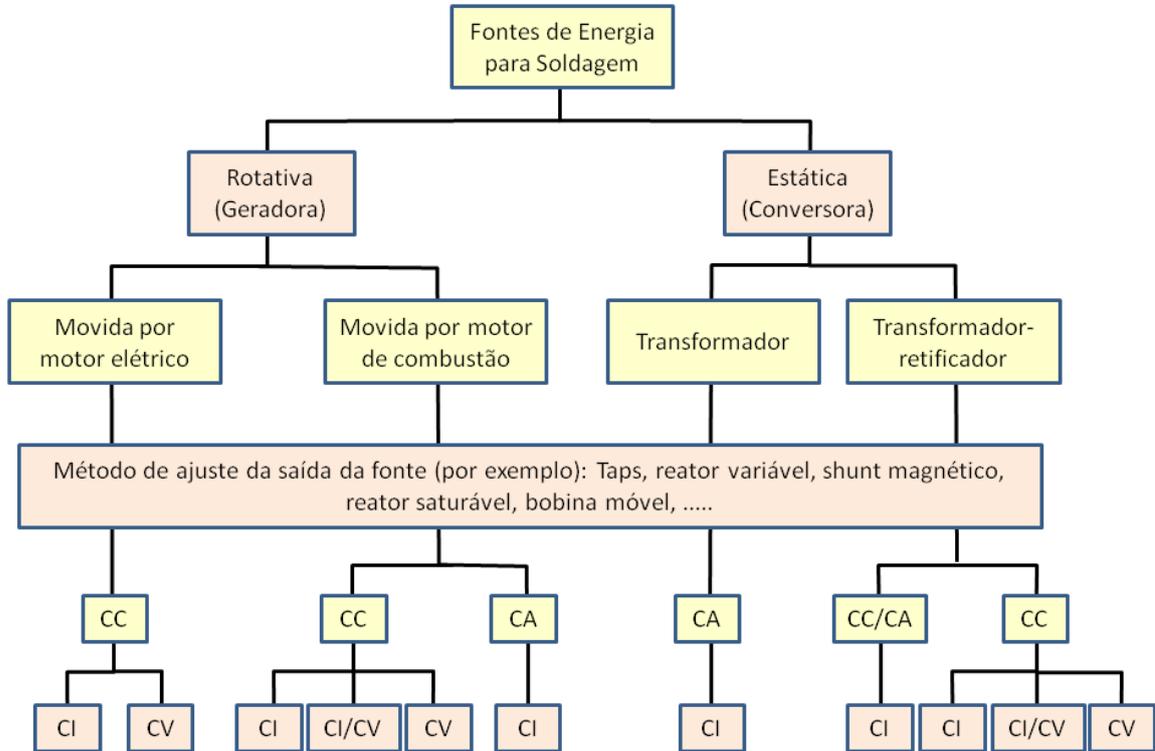


Figura 7 - Classificação de fontes de energia convencionais para soldagem

3.5. Construção e Métodos de Controle de Fontes Convencionais Estáticas:

Fontes convencionais que utilizam diretamente a energia elétrica da rede são formadas basicamente de um transformador, um dispositivo de controle da saída da fonte e um banco de retificadores (em equipamentos de corrente contínua), figura 8.

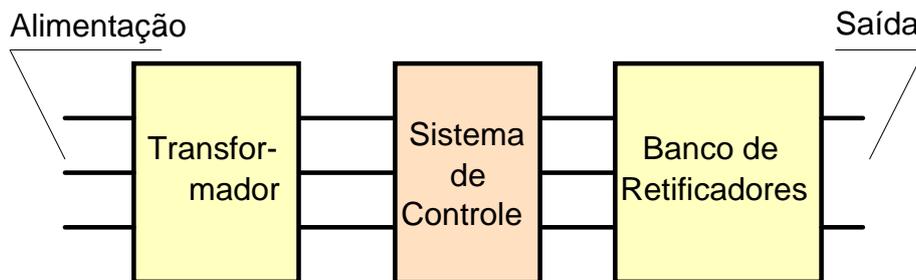


Figura 8 - Diagrama de bloco de uma fonte convencional.

O transformador é um dispositivo que transfere energia elétrica de um circuito de corrente alternada para outro através de um campo magnético sem modificar a frequência, mas, dependendo de sua construção, levando a um aumento ou redução da tensão. Em linhas gerais, um transformador é composto de um núcleo de chapas de aço sobrepostas e enrolado por dois conjuntos de fio que formam os enrolamentos primário (de entrada) e secundário (de saída). Desprezando-se as perdas de energia e de eficiência do transformador (que podem ser consideráveis quando este está ligado a uma carga), a relação entre as suas tensões de entrada e saída (V_1 e V_2) é diretamente proporcional à relação entre os números de espiras dos enrolamentos (N_1 e N_2):

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Em máquinas para soldagem, os transformadores em geral reduzem a tensão da rede (por exemplo de 240 ou 380 V) para valores menores adequados para a soldagem.

Os retificadores (símbolo: ) são dispositivos eletrônicos que apresentam valores de resistência elétrica diferentes dependendo do sentido de fluxo da corrente, isto é, a resistência é baixa em um sentido e muito elevada em outro. O uso deste dispositivo em um circuito de corrente alternada permite bloquear o fluxo de corrente em um sentido e, desta forma, retificar a corrente. Este processo é mais eficiente quando um número de retificadores são colocados em arranjos especiais (pontes). A figura 9 mostra exemplos típicos de pontes para circuito CA monofásicos e trifásicos. A corrente contínua resultante apresenta flutuações remanescentes mais fortes em sistemas monofásicos. Estas flutuações são, em geral, reduzidas pelo uso de capacitores ou indutores que atuam como filtros da corrente.

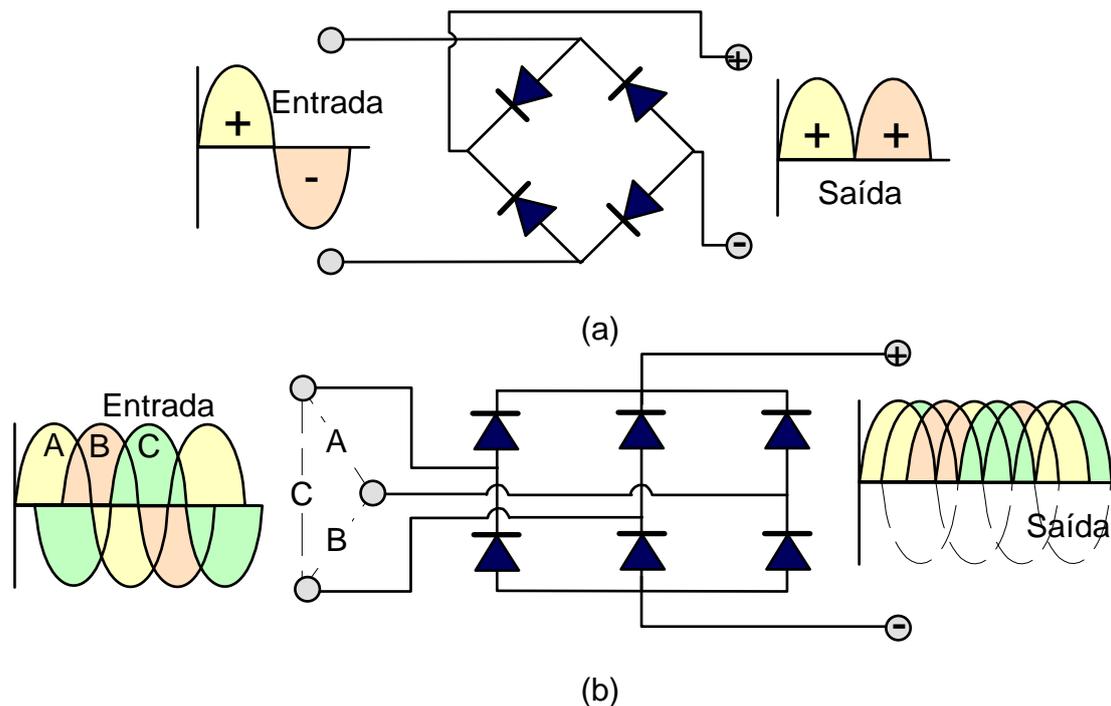


Figura 9 – Exemplos de pontes retificadoras para circuitos (a) monofásicos e (b) trifásicos.

Nos equipamentos convencionais, o sistema que permite o ajuste da saída da fonte é, em geral, de acionamento mecânico ou elétrico. As formas mais comuns de ajuste empregadas são:

- Transformadores com "tap";
- Bobina móvel;
- Núcleo de ferro móvel;
- Reator de núcleo móvel;
- Amplificador magnético.

Transformadores com vários taps (localizados no seu primário ou no seu secundário), permitem um ajuste descontínuo das condições de soldagem pela variação da relação entre os números de espiras no primário e secundário do transformador (figuras 10 e 11). Fontes mais simples apresentam, em seu painel, vários bornes e as condições de soldagem são selecionadas pela conexão do cabo ao borne adequado (figura 11b). Em sistemas um pouco mais sofisticados, a seleção da condição de soldagem pode ser feita através de uma chave de várias posições. Esta forma de controle é mais usada em sistemas pequenos e de baixo custo e não permite controle remoto ou ajuste contínuo. Em máquinas para soldagem GMAW ou SAW de tensão constante, um sistema de controle similar, mas mais versátil,

utiliza sapatas deslizantes móveis colocadas no secundário da transformador para uma variação contínua da relação de espiras.

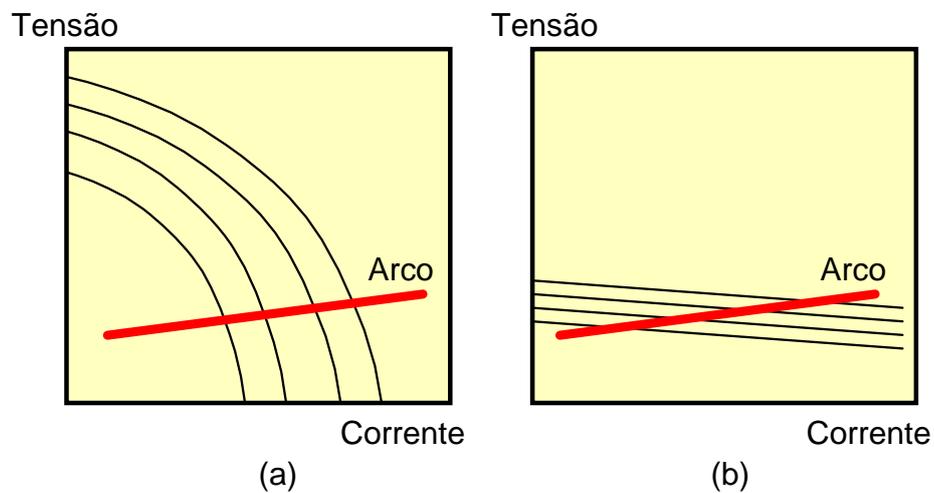


Figura 10 - Ajuste das condições de soldagem por taps (a) fonte de corrente constante, (b) fonte de tensão constante.

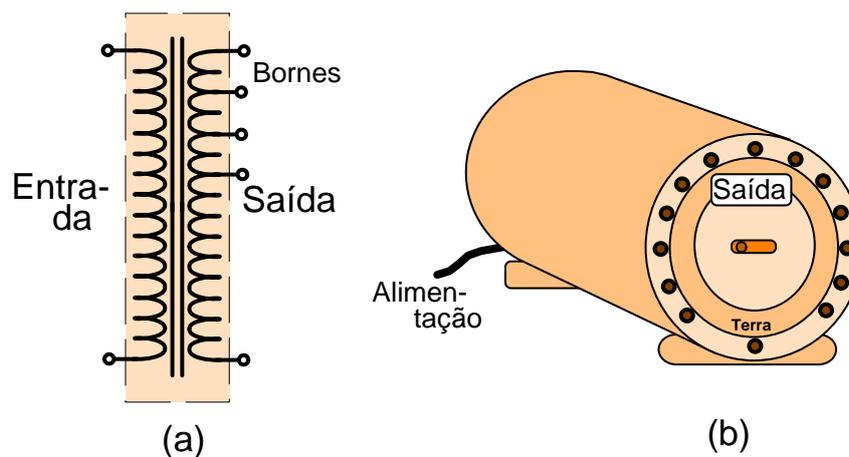


Figura 11 – (a) Diagrama de uma fonte tipo transformador com ajuste de saída por taps. (b) Desenho esquemático de uma fonte deste tipo.

O controle por bobina móvel é essencialmente mecânico e consiste no uso de um transformador de núcleo alongado que permite o movimento de uma bobina (normalmente o primário) em relação à outra. A distância entre as bobinas determina a eficiência do acoplamento magnético entre estas. Assim, quanto mais afastadas as bobinas, menor tende a ser a saída da fonte, isto é, mais inclinada fica a sua curva característica (figura 12).

Em fontes com controle por núcleo móvel, as bobinas são mantidas em posição fixa e a saída da fonte é controlada pela posição de um shunt do mesmo material do núcleo da

transformador colocado entre as bobinas do primário e do secundário. Quando a posição do shunt entre as bobinas muda, uma maior ou menor parte do fluxo magnético no transformador passa através do shunt, diminuindo ou aumentando a saída da fonte de forma similar à mostrada na figura 13.

Um reator variável pode controlar a saída de uma fonte, por exemplo, através do deslocamento de uma parte de seu núcleo metálico. Quando esta parte móvel é afastada do restante do núcleo do reator, a permeabilidade magnética é reduzida e a menor reatância indutiva permite a passagem de corrente maiores. Com a parte móvel colocada junto do restante do núcleo, a permeabilidade é aumentada e a corrente de saída é reduzida. Alternativamente, o número de espiras do reator pode ser variável (figura 14).

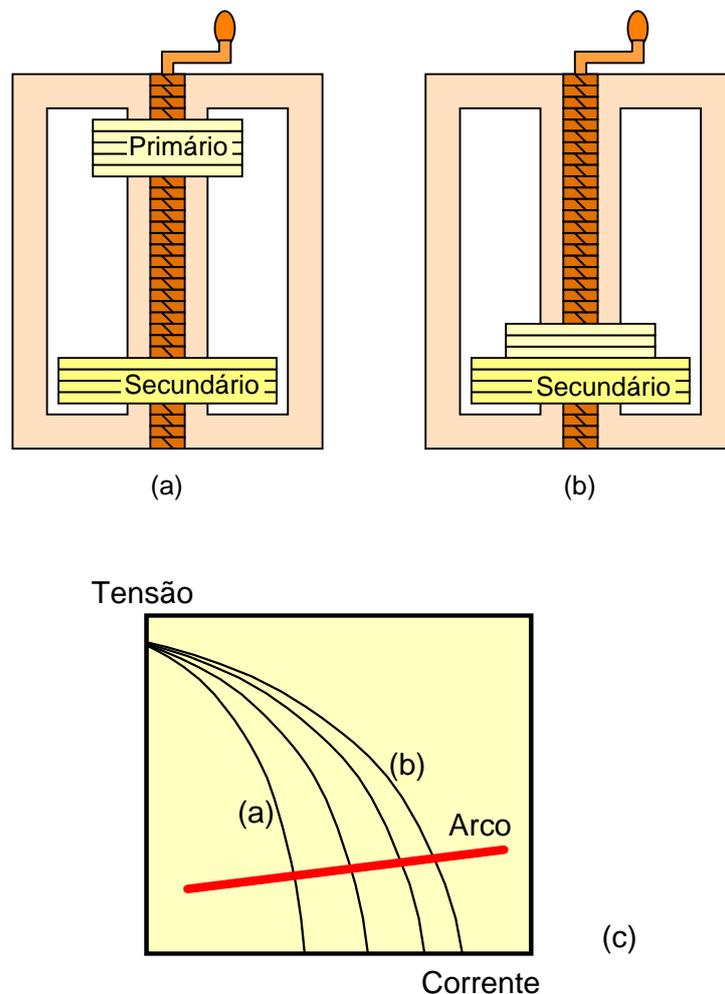


Figura 12 – Ajuste de uma fonte tipo transformador de bobina móvel para saída de corrente (a) mínima e (b) máxima. (c) Curvas características resultantes.

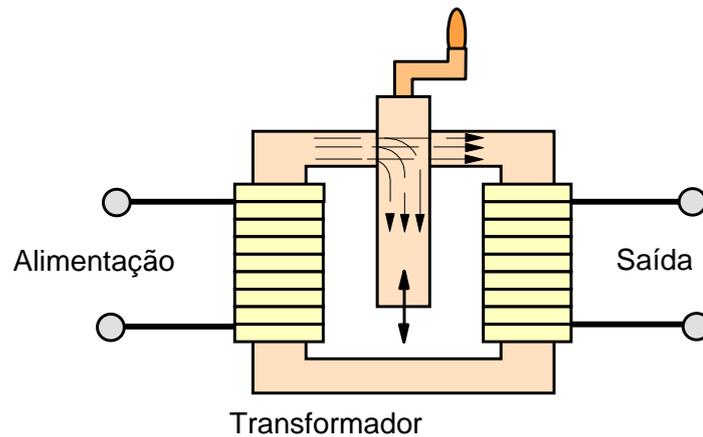


Figura 13 – Fonte (transformador) com controle por núcleo móvel.

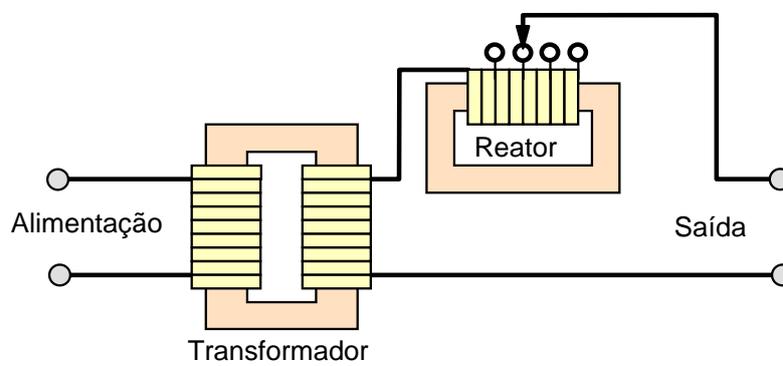


Figura 14 – Fonte (transformador) com controle por reator variável.

Para o controle por amplificador magnético ou reator saturável, uma bobina percorrida por uma corrente contínua variável (corrente de controle) é enrolada em um núcleo metálico junto com outra por onde a saída do transformador de soldagem passa. Um aumento da corrente de controle tende a aumentar a saturação do reator, isto é, diminui a sua eficiência, permitindo, assim, a passagem de uma maior corrente de soldagem. Esta técnica permite uma variação contínua da saída da fonte (figura 15) e pode ser facilmente utilizada em controle remoto. Contudo, o valor relativamente elevado da corrente de controle (da ordem de 1 a 10A) e a velocidade de resposta relativamente pequena deste sistema dificultam a sua utilização junto com sistemas de controle digitais. Amplificadores magnéticos são comumente utilizados em fontes convencionais GTAW.

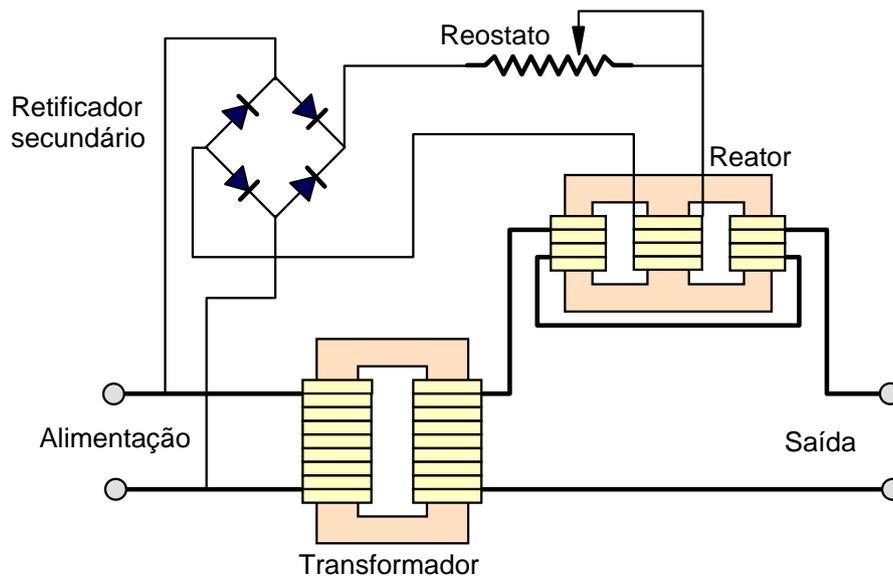


Figura 15 – Fonte (transformador) com controle por reator saturável.

3.5. Fontes Tipo Gerador:

O gerador de soldagem (ou motor-gerador) é um dos tipos mais antigos de fonte de energia para soldagem a arco e é, ainda hoje, uma das fontes mais versáteis. Podem ser projetados para gerar qualquer tipo de curva característica e, embora geralmente produzam corrente contínua, existem equipamentos de corrente alternada, a qual pode ter uma frequência diferente de 50 ou 60Hz (valores usuais em redes de alimentação).

Fontes deste tipo são constituídas de um motor que gera energia mecânica a qual é transmitida através de um eixo ou por um sistema de correia e polias ao gerador de energia elétrica (figura 16). O motor pode ser elétrico ou de combustão interna, tendo, como combustível, gasolina, óleo diesel, gás natural, etc. Este tipo de equipamento é mais comumente utilizado na soldagem com eletrodo revestido no campo, particularmente em locais onde o acesso à rede de distribuição de eletricidade é complicado. Por outro lado, tendem a ser equipamentos mais pesados, barulhentos e de manutenção mais complicada do que as fontes estáticas convencionais.

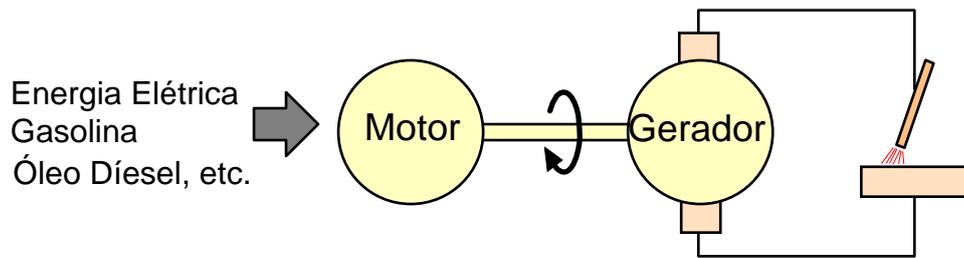


Figura 16 - Diagrama esquemático de um motor-gerador.

4. Fontes com Controle Eletrônico:

Fontes convencionais estáticas (transformadores e transformadores-retificadores) dependem de sistemas mecânicos ou elétricos para o controle e ajuste de sua saída. Estas fontes pouco mudaram nos últimos quarenta ou cinquenta anos. Estes equipamentos têm, em geral, um formato fixo de sua curva característica, velocidade de resposta baixa (da ordem de 10^{-1} s), insuficiente para controlar diversos eventos que ocorrem no arco e na transferência de metal, além de serem de difícil interação com sistemas digitais de controle. A partir da década de 1960 e, de forma importante, nas décadas de 1980 e 1990, novos conceitos foram introduzidos no projeto e fabricação de fontes de energia para soldagem. Estes conceitos têm em comum a introdução de dispositivos eletrônicos, muito mais versáteis e rápidos (figura 17), para o controle da saída da fonte.

Em comparação com as fontes convencionais, as fontes com controle eletrônico são caracterizadas por:

- Desempenho superior, isto é, apresentam resposta dinâmica e reprodutibilidade muito superiores às fontes convencionais.

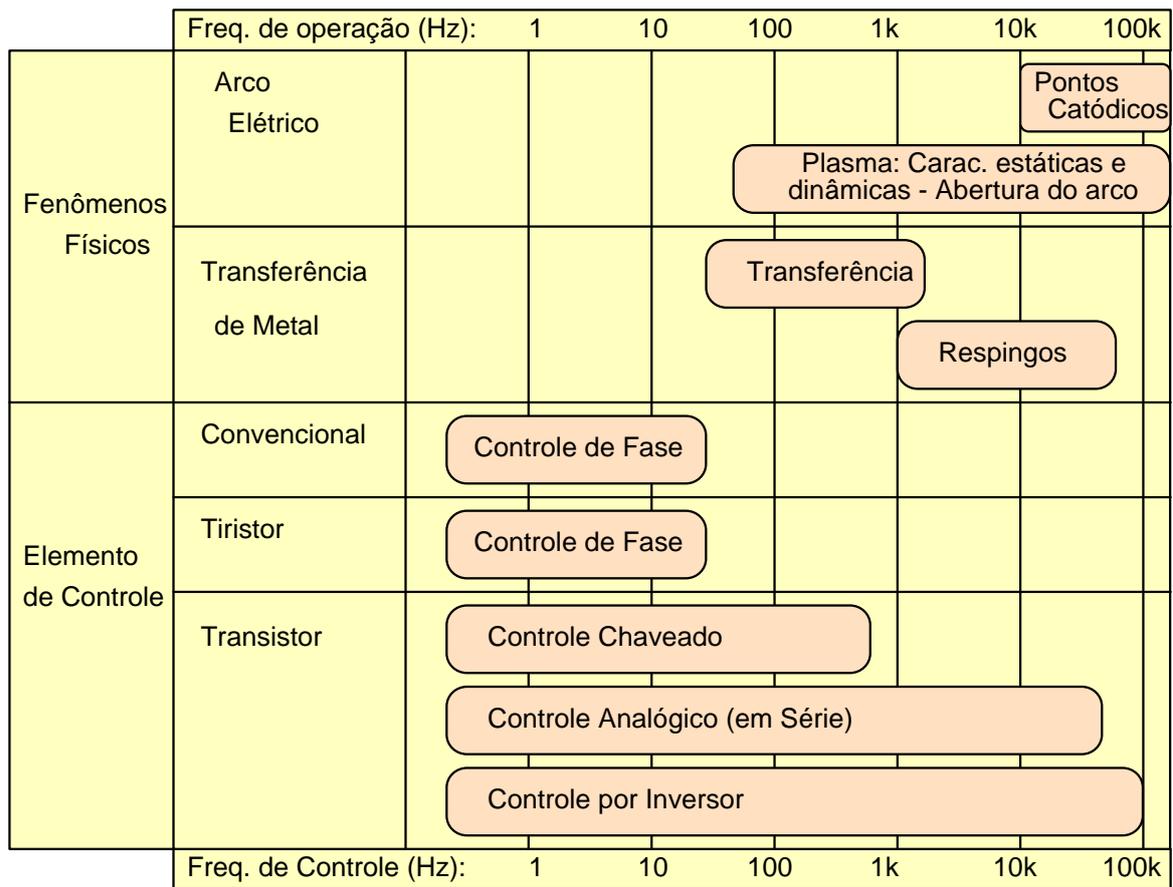


Figura 17 - Relação entre o tempo característico de fenômenos no arco elétrico e a frequência de controle de vários tipos de fontes (Ushio et al.).

- Funções múltiplas: A elevada velocidade de resposta, juntamente com as características de funcionamento dos tipos mais modernos de fonte permitem simular, em uma única fonte, diferentes curvas características. Dependendo de suas características, particularmente de seu sistema de controle, o equipamento pode mudar a sua saída, inclusive o tipo de sua curva característica durante a operação de forma a responder, por exemplo, a eventos que estejam ocorrendo no arco.
- Conexão mais fácil com equipamentos periféricos e capacidade de ser programada: O controle eletrônico permite que a fonte troque sinais com sensores externos, microprocessadores internos, computadores, robôs, etc. Condições de soldagem “otimizadas” ou regras preestabelecidas para a seleção de parâmetros de soldagem podem ser armazenadas em alguma forma de memória eletrônica e usadas para definir a operação do equipamento. Esta capacidade permitiu o desenvolvimento de fontes que podem ser operadas através de um único controle básico, as fontes conhecidas como “one-knob machines”.

- Redução de peso e dimensões: A introdução, na década de 1980, de fontes inversoras (ver abaixo) levou a uma grande redução nas dimensões do transformador devido ao uso de corrente alternada de alta frequência. Como o transformador é a maior parte de uma fonte convencional, isto permitiu uma grande redução no tamanho da fonte.
- Maior custo e manutenção mais complexa.

Existe uma série de diferentes projetos de fontes que podem ser classificadas como eletrônicas. As formas mais conhecidas são:

- Fontes tiristorizadas
- Fontes transistorizadas
 - em série (Series regulators)
 - chaveadas no secundário (Choppers)
 - inversoras (Inverters) ou chaveadas no primário

4.1. Fontes Tiristorizadas:

Tiristores, ou retificadores controlados de silício (SCR), podem ser considerados como diodos chaveados. A condução de corrente no sentido permitido (isto é, aquele de baixa resistência elétrica) do SCR só se inicia quando um pequeno sinal é enviado a uma conexão adicional do dispositivo conhecida como gatilho (em inglês: “gate”). Uma vez disparado, o dispositivo continua a conduzir a corrente até que esta se anule ou o seu sentido se inverta. SCR’s podem ser usados em substituição aos retificadores comuns após o transformador de uma fonte de corrente contínua. Para regular a saída desta fonte, o momento de disparo do gatilho é controlado a cada meio ciclo de corrente (figura 18). Assim, para se obter uma corrente relativamente pequena com este sistema, é necessário retardar bastante o disparo do gatilho, o que pode tornar a saída da fonte muito distorcida. Esta problema é minimizado pelo uso de alimentação trifásica e de filtros na forma de capacitores ou indutores. Estes últimos reduzem a velocidade de resposta da fonte.

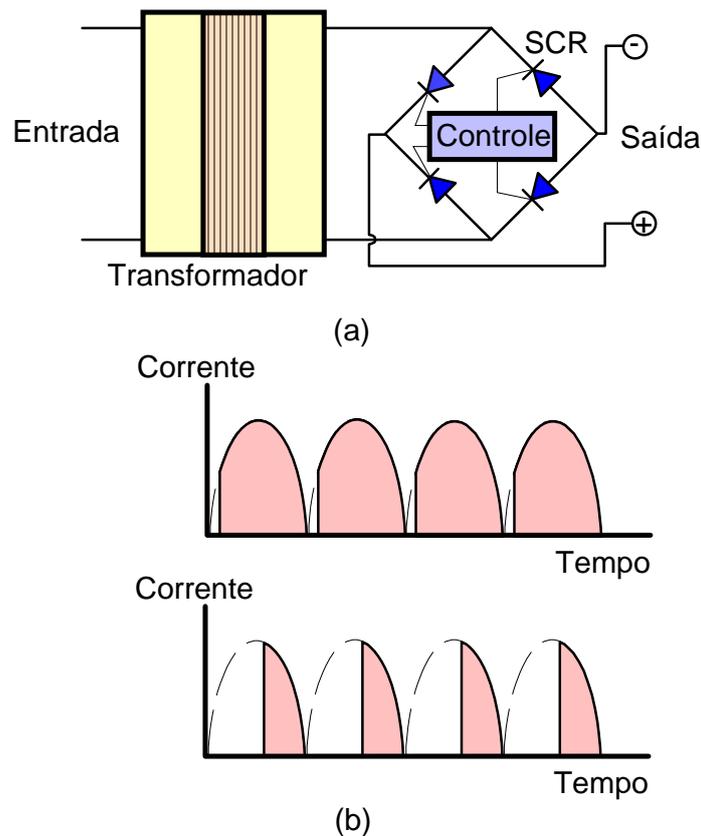


Figura 18 - (a) Diagrama esquemático de uma fonte tiristorizada monofásica. (b) Efeito do tempo de disparo do tiristor na forma de onda da corrente de saída.

As vantagens do controle por SCR são a sua simplicidade, robustez e a possibilidade de controle da saída da fonte com pequenos sinais eletrônicos. A velocidade de resposta do sistema é limitada pela necessidade da corrente se anular antes do gatilho poder ser novamente disparado e para se reiniciar a passagem de corrente. Assim, o menor tempo de resposta que pode ser esperado com este sistema é de cerca de 3 a 9ms. Mesmo com a possibilidade de distorção da saída e a baixa velocidade de resposta, é possível obter fontes tiristorizadas de desempenho muito superior que as convencionais. Em particular, é possível compensar a saída da fonte contra possíveis variações na rede através do uso de retroalimentação. Controle tiristorizado tem sido utilizado em fonte para soldagem SMAW com corrente contínua, GMAW, GTAW pulsado ou com corrente alternada quadrada e para soldagem SAW.

4.2. Fontes transistorizadas analógicas (Series regulators):

O transistor é um dispositivo eletrônico cuja saída é controlada através do ajuste de uma pequena corrente passando através de uma de suas conexões (a “base”). O seu funcionamento pode ser explicado através de um sistema hidráulico análogo no qual a passagem de água no duto principal é controlada por uma válvula acionada por uma pequena vazão de água em um duto secundário (a base), figura 19.

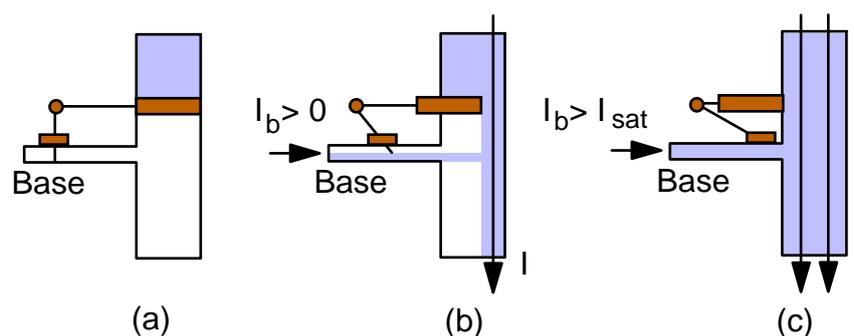


Figura 19 - Sistema hidráulico de funcionamento análogo a um transistor de potência. (a) Corrente da base (I_b) nula, circuito principal interrompido. (b) Corrente da base pequena, corrente principal (I) proporcional a I_b . (c) I_b acima de seu valor de saturação I_{sat} , corrente principal passa livremente.

Dependendo do valor da corrente na base e da forma de sua variação, o transistor pode operar de uma forma análoga a uma resistência variável ou a uma chave liga-desliga. O primeiro caso ocorre quando I_b é mantida entre zero e I_{sat} , figura 19b. O segundo caso ocorre quando somente dois valores de I_b são usados (0 e I_{sat}), figura 19a e c.

Em uma fonte de energia analógica, um banco de transistores operando em série com um transformador-retificador controla continuamente a saída da fonte através de uma corrente de base menor que o seu valor de saturação. Normalmente, um sistema de controle por retroalimentação é incorporado para garantir a estabilização da saída (figura 20).

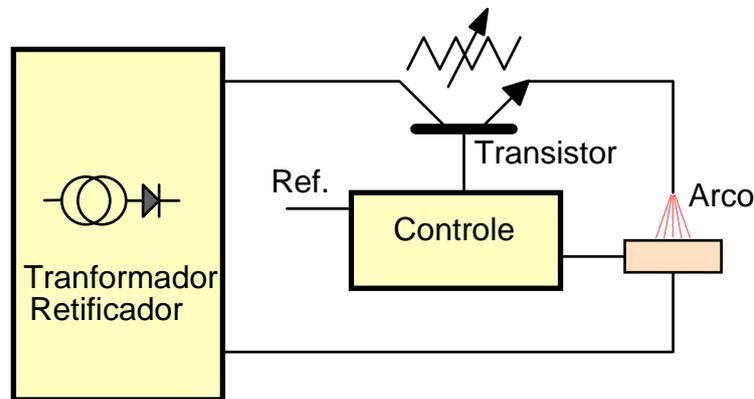


Figura 20 - Princípio de funcionamento de uma fonte transistorizada analógica.

As características marcantes das fontes analógicas são a sua capacidade de reagir de forma muito rápida (tempos de resposta da ordem de microssegundos) e a sua saída praticamente isenta de ruídos. As maiores desvantagens destas fontes são a sua baixa eficiência e elevado custo. A baixa eficiência resulta do modo de funcionamento do transistor, similar a uma resistência variável. Assim, uma fração razoável da energia consumida pela fonte é dissipada nos transistores que, portanto, necessitam, na maioria das aplicações, de sistemas de resfriamento com água. O alto custo do equipamento resulta do número de transistores usados, da necessidade destes serem balanceados e da necessidade de um sistema de resfriamento. As características deste tipo de fonte são mais adequadas para pequenas fontes de alta precisão para fontes a serem usadas em laboratório e centros de desenvolvimento e pesquisa.

4.2. Fontes transistorizadas chaveadas (Chopper):

Nas fontes chaveadas, os transistores trabalham como chaves (figura 19c) que são abertas e fechadas a uma elevada velocidade. Desta forma, a saída da fonte é controlada pela razão dos tempos em que os transistores permanecem abertos ou fechados (figura 21).

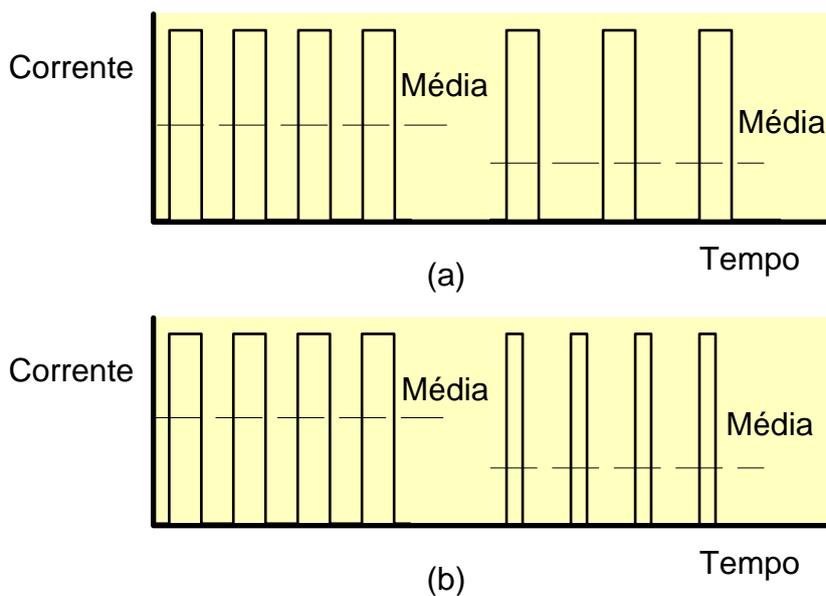


Figura 21 - Técnicas de modulação para controle da saída. (a) Modulação da frequência (b) Controle da largura do pulso.

Embora o circuito básico destas fontes seja muito similar ao das anteriores (figura 22), a utilização dos transistores no modo chaveado permite um grande aumento na eficiência da fonte e, assim, a utilização de resfriamento ao ar. A maior eficiência permite também uma construção mais simples, com menor número de transistores, o que reduz o preço da fonte. O processo de chaveamento gera um ruído na saída do equipamento, mas, se a frequência de chaveamento for suficientemente elevada, esse ruído não tem nenhum efeito negativo no processo. Frequências de chaveamento de 5 a 200 kHz podem ser usadas.

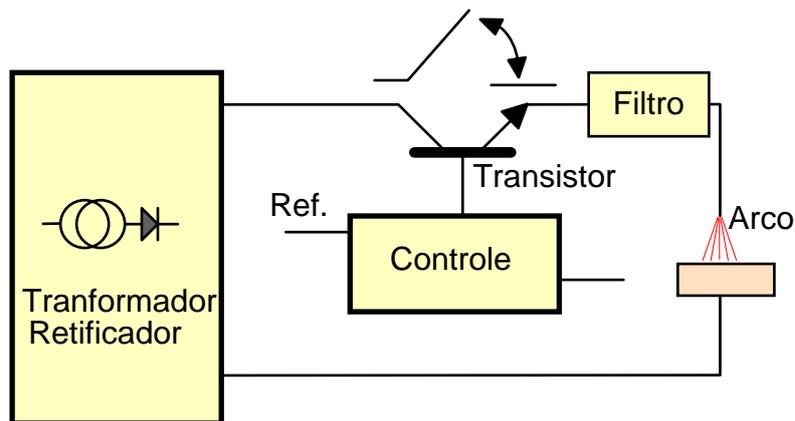


Figura 22 - Princípio de funcionamento de uma fonte transistorizada chaveada.

A velocidade de resposta da fonte também depende da frequência de chaveamento. Fontes com alta velocidade de chaveamento são capazes de responder em poucos microsegundos, sendo significativamente mais rápidas do que as fontes convencionais.

4.3. Fontes inversoras:

Os tipos de fontes apresentados acima usam um transformador convencional para reduzir a tensão da rede até o valor requerido para a soldagem. Este transformador opera na mesma frequência da rede (50/60 Hz). As fontes inversoras trabalham com um transformador muito menor, o que é possível quando a frequência da corrente alternada é grandemente elevada, melhorando, assim, a eficiência do transformador (figura 23). A figura 24 ilustra o funcionamento básico de uma fonte inversora.

Numa fonte inversora, a corrente alternada da rede é retificada diretamente e a corrente contínua de tensão elevada é convertida corrente alternada de alta frequência (5000 a 200.000 Hz) através de um sistema de transistores, o inversor, colocado antes do transformador (isto é, no circuito primário). Devido à sua elevada frequência, um transformador de pequenas dimensões pode ser usado eficientemente para reduzir a tensão. A saída da fonte é controlada atuando-se no inversor. A velocidade de resposta é bastante elevada, dependendo, dentre outros fatores, da frequência de operação do inversor. A saída do transformador é novamente retificada para a obtenção da corrente de soldagem

contínua. Reatores ou capacitores são usados para reduzir o nível de ruídos da fonte. A figura 25 compara a velocidade de subida da corrente durante a abertura do arco com uma fonte tiristorizada e com uma fonte inversora e ilustra a maior velocidade de resposta das fontes transistorizadas.

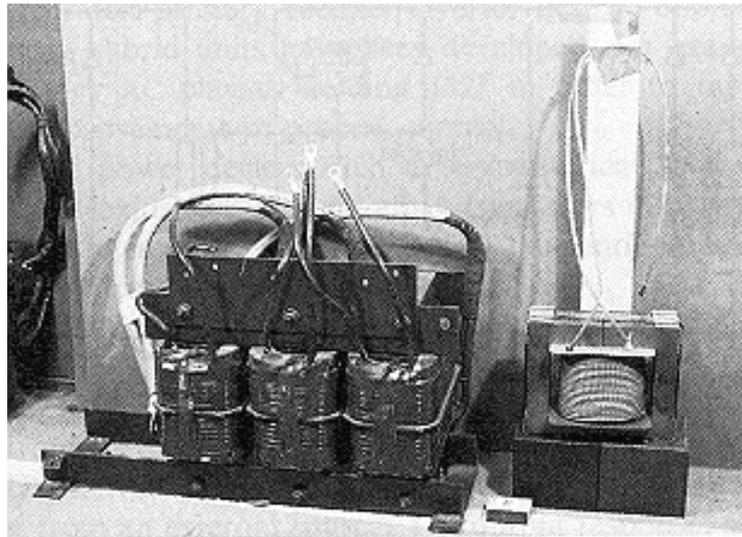


Figura 23 - Comparação entre o transformador de uma fonte inversora (direita) e de uma fonte convencional (esquerda) de mesma capacidade.

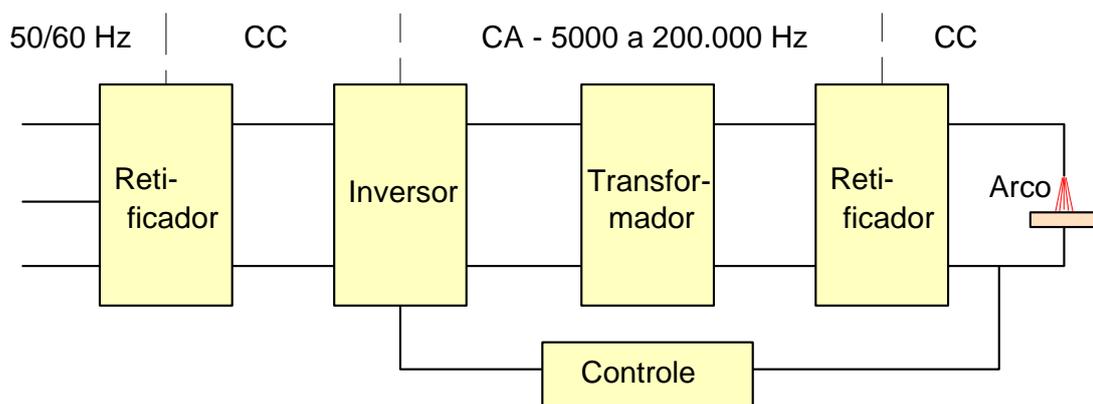


Figura 24 - Princípio de funcionamento de uma fonte inversora

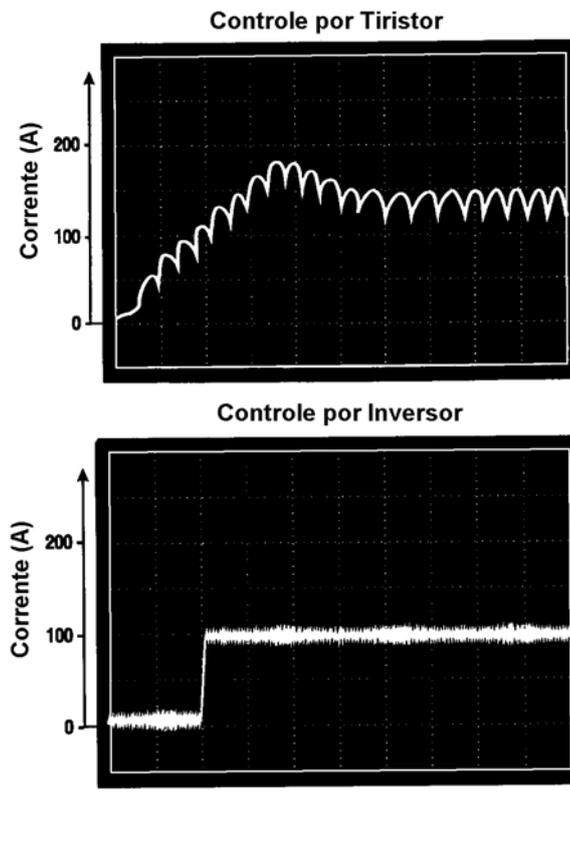


Figura 25 - Comparação da velocidade de subida da corrente na abertura do arco para (a) uma fonte tiristorizada e (b) uma fonte inversora. Intervalo entre traços: 10ms².

A elevada frequência da corrente no transformador permite, nas fontes inversoras, um grande potencial de redução do consumo de energia elétrica. Byrd³ indica reduções de até 80%. O controle da fonte no primário permite também uma grande redução na dissipação de energia quando a fonte está operando em vazio. Byrd mediu perdas em vazio entre 0,07 e 0,71kW para fontes inversoras em comparação com 0,99 a 4,81kW para fontes convencionais.

4.4. Fontes híbridas:

Uma tendência recente tem sido a combinação dos tipos de fonte acima descritos de modo a aumentar o desempenho das fontes de energia a um menor custo. Cita-se, por exemplo, a

² Byrd, T. **Welding Journal**, 72(1), 1993.

utilização de controle por transistores tanto no primário como no secundário de forma a se obter características operacionais especiais.

Uma outra tendência muito importante observada nas fontes transistorizadas é a substituição progressivo de sistemas físicos (“hardware”) de controle por sistemas baseados em programação (“software”). Esta tendência, já observada em diversos outros tipos de equipamento, permite uma crescente flexibilidade ao equipamento e uma grande capacidade de atuar no processo de soldagem, particularmente na transferência de metal.

A tabela I compara as características gerais das fontes convencionais estáticas e das fontes com controle eletrônico.

Tabela I - Características de fontes convencionais e eletrônicas.

Tipo de Fonte	Saída	Eficiência Elétrica	Características Físicas	Custo Relativo	Aplicações
Convencionais	Fixada pelo projeto, resposta lenta, sem estabilização da rede	Razoável	Grande, pesada, robusta, e resistente.	1	SMAW manual, GTAW. Uso geral.
Tiristorizada	Resposta variável, mas relat. lenta. Estabilização da rede, ruído elevado.	Razoável	Mais compacta do que fontes convencionais equivalentes.	3	GMAW/GTAW manual e mecanizada, SMAW manual. Qualidade média a alta.
Analógica	Resposta muito rápida, flexibilidade, precisa, ausência de ruído, alta reprodutibilidade.	Pobre	Relat. Grande, necessita refrigeração de água.	6	GTAW/GMAW de alta qualidade, Saída pulsada, pesquisa e desenvolvimento.
Chaveada ou Híbridas	Resposta rápida, saída variável e reprodutível, estabilidade.	Muito boa	Tamanho médio, refrigeração pelo ar.	4	Qualidade média a alta, multiprocessos.
Inversora	Resposta rápida, saída variável e reprodutível, estabilidade.	Muito boa	Compacta, projeto complexo.	4	Qualidade média a alta, multiprocessos.

5. Modos de Aplicação e Métodos de Controle

O resultado de uma operação de soldagem em geral, particularmente com os processos GMAW e FCAW, depende criticamente da seleção das diversas variáveis do processo e de sua evolução durante a operação. Discutem-se, a seguir, alguns modos de aplicação de

processos de soldagem e técnicas de controle que estão se tornando comuns em associação com as fontes modernas, principalmente com o processo GMAW. Deve-se ter em mente que diversas outras técnicas existem ou estão sendo desenvolvidas por grupos de pesquisa em universidades e empresas para diversos dos processos de soldagem a arco.

5.1. Controle do Comprimento do Arco com Fontes Convencionais:

Para que um processo de soldagem a arco com eletrodo consumível opere de uma forma estável, dois requisitos básicos devem ser satisfeitos:

- a velocidade de alimentação do arame (f) deve ser igual à velocidade *media* de fusão do mesmo (w), isto é: $f = w$;
- o metal fundido formado na ponta do arame deve ser transferido para a poça de fusão sem causar fortes perturbações ao processo.

Quando o primeiro requisito não é obedecido, o comprimento do arco varia, aumentado quando $f < w$ e diminuindo quando $f > w$. Na soldagem com transferência por curto-circuito, o comprimento do arco varia continuamente durante cada ciclo de curto-circuito/arco. Espera-se, contudo, que o comprimento do arco se mantenha aproximadamente constante durante a soldagem para manter as condições de curto-circuito. Na soldagem com arco aberto, particularmente com transferência spray, espera-se que o comprimento do arco varie muito pouco para se manter o processo estável.

Esta seção discute um aspecto importante para a manutenção do comprimento do arco na soldagem GMAW com fontes convencionais (e, também, em geral, com fontes modernas) que é a relação entre a curva característica estática da fonte, a corrente de soldagem e o comprimento do arco (l_a). A próxima seção discute alguns aspectos da fonte relacionados com a transferência de metal na soldagem GMAW com fontes convencionais e modernas. A seguinte apresenta algumas técnicas usadas em fontes modernas para o controle dos requisitos indicados anteriormente na soldagem GMAW.

Processos de soldagem com eletrodo não consumível (GTAW e PAW) ou com eletrodo consumível cuja velocidade de fusão seja relativamente baixa (SMAW) são usados com fontes de corrente constante. Nestes, como as variações de comprimento do arco *causadas por mudanças na geometria ou no comprimento do eletrodo* ocorrem de forma lenta, a

distância da tocha à peça e o l_a podem, em princípio, ser controlados diretamente (isto é, manualmente) pelo soldador. Em sistemas automatizados com o processo GTAW, por exemplo, a posição da tocha e l_a podem ser controlados através de um sistema (AVC – Automatic Voltage Control) que compara a tensão de soldagem com um valor de referência definido pelo usuário (V_R). Se a tensão de soldagem for, por exemplo, superior a V_R , o que seria esperado para l_a maior do que o desejado, um motor é acionado para aproximar a tocha da peça (reduzindo l_a) até que a tensão seja igualada a V_R . (figura 26).

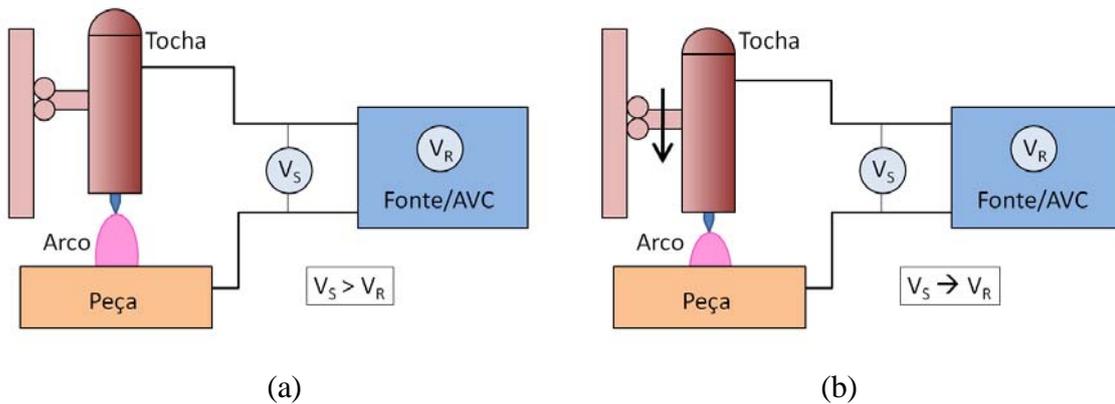


Figura 26 – Controle automático do comprimento do arco na soldagem GTAW. (a) Comprimento do maior do que o desejado ($V_S > V_R$). (b) Redução da distância da tocha à peça (e do comprimento do arco) para igualar V_S a V_R . V_S – Tensão de soldagem e V_R – Tensão de referência.

Um sistema similar pode ser utilizado para mecanizar a alimentação do eletrodo na soldagem SMAW. Neste caso, o consumo do eletrodo revestido é compensado aproximando-se o porta eletrodo da peça usando-se a tensão de soldagem para controlar o mergulho deste em direção à poça de fusão. Pelo que se conhece, este tipo de sistema é usado apenas em laboratórios de pesquisa.

Os processos de soldagem SAW, GMAW e FCAW podem ser, em princípio, utilizados com fontes de corrente constante. Nestes casos, um sistema similar ao descrito acima (AVC) pode ser usado para controlar a velocidade de alimentação do arame e, desta forma o comprimento do arco. Por exemplo, se a tensão de soldagem estiver acima de V_R , indicando um comprimento do arco superior ao desejado, a velocidade de alimentação do arame é aumentada de forma a forçar uma redução de l_a . Como este controle depende de variações na velocidade do motor do alimentador de arame, ele tende a ser menos efetivo em situações em

que se trabalha com velocidade de alimentação elevada (por exemplo, na soldagem GMAW com arames de pequeno diâmetro). Neste caso, o sistema pode apresentar um tempo de resposta inadequadamente longo (devido à maior inércia do motor) para compensar as mudanças que ocorrem no processo e, assim, controlar efetivamente comprimento do arco. Entretanto, em condições em que a velocidade de alimentação não é muito elevada (por exemplo, na soldagem SAW com arames de grande diâmetro), este sistema funciona de modo adequado e é comumente utilizado. Naturalmente, o desenvolvimento de motores ou dispositivos alternativos capazes de alterar mais rapidamente a velocidade de alimentação do arame tendem a reduzir esta deficiência deste tipo de equipamento.

Na soldagem GMAW ou FCAW convencional é mais usual se trabalhar com uma fonte de tensão constante em conjunto com um alimentador de arame de velocidade constante. Neste tipo de sistema, a velocidade de alimentação do arame é ajustada para um valor que é mantido constante durante a soldagem e, com o uso da fonte de tensão constante, um valor da tensão de soldagem relativamente fixo também é imposto. Por outro lado, os valores de corrente e os comprimentos do eletrodo e do arco resultam do ajuste dos parâmetros anteriores e de fatores como a distância do bico de contato à peça e o diâmetro do eletrodo. Como o comprimento do arco depende fortemente da tensão e esta é mantida relativamente constante (fonte CV), o valor médio desse também permanece relativamente constante durante a soldagem. Por outro lado, o comprimento do eletrodo e principalmente a corrente variam de forma a responder a perturbações no processo.

A figura 27 ilustra esta situação: Suponha que o processo esteja operando de uma forma estável na condição correspondente à corrente I_0 e tensão V_0 (isto é, nesta condição, tem-se $w = f$). Se, em um dado momento, o processo sofre uma perturbação de modo que o comprimento de arco aumente de $(l_a)_0$ para $(l_a)_1$, a curva característica do arco será deslocada para maiores valores de tensão e a corrente tenderá a cair de I_0 para I_1 (figura 27a). Como w depende fortemente da corrente, o seu valor será reduzido e ficará, portanto, menor que f . Com $w < f$, o comprimento de arco tenderá a diminuir até o sistema retornar para a sua condição inicial (I_0 , V_0 e $(l_a)_0$) ou, pelo menos, para uma condição próxima desta. Eventos similares ocorrerão se o comprimento de arco for reduzido. Assim, o uso de uma fonte de tensão constante permite, nos processos considerados, um controle “intrínseco” (ou uma auto-regulagem) do comprimento do arco que não necessita da atuação do soldador.

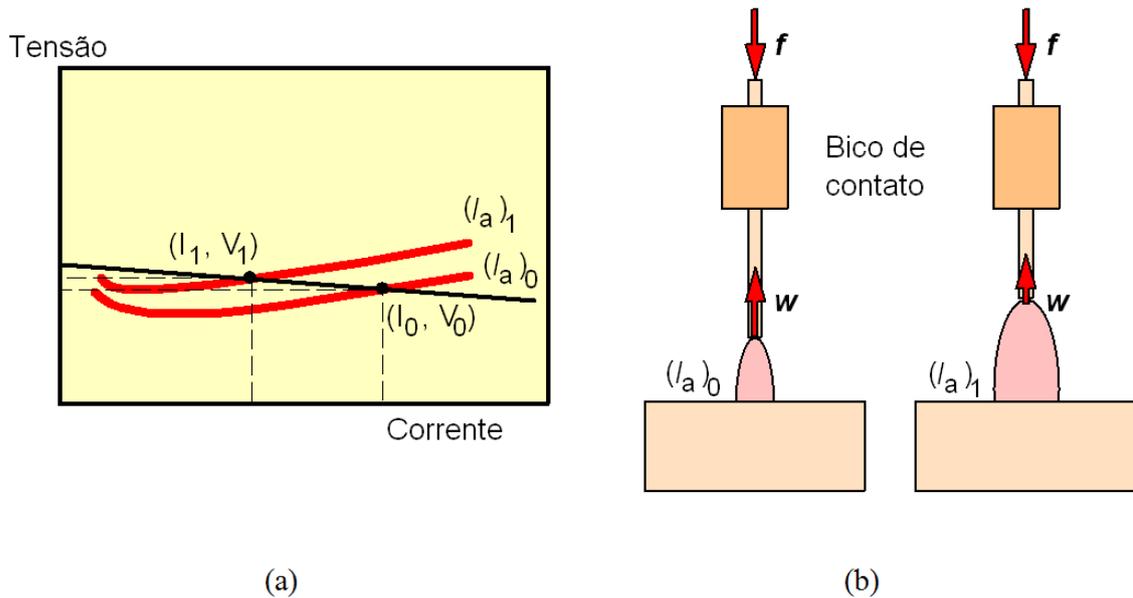


Figura 27 – Controle do comprimento do arco com uma fonte CV. (a) Curvas características e (b) comprimento do arco e velocidades de fusão e alimentação

5.2. Controle do Modo de Transferência:

Na soldagem com transferência por curto-circuito, quando este ocorre, a corrente tende a aumentar devido à queda brusca de tensão. Um aumento muito rápido na corrente pode ocasionar a ruptura explosiva da ponte de metal líquido entre o eletrodo e a poça de fusão e causar a formação de respingos. Por outro lado, se a corrente aumentar de forma muito lenta, esta pode não atingir um valor suficientemente elevado para garantir a interrupção do curto circuito e o arame pode penetrar na poça de fusão e o processo ser interrompido. Em equipamentos convencionais, a taxa de variação da corrente é controlado pela colocação, no circuito de corrente contínua da máquina, de uma bobina variável capaz de controlar a velocidade com que a corrente varia em resposta a uma variação da tensão (“controle de indutância”, figura 28).

Em sistemas com fontes eletrônicas, a velocidade de variação da corrente de soldagem pode ser determinada e controlada pelo sistema de controle da fonte, sendo possível utilizar velocidades diferentes para o aumento e a redução de corrente e ou variáveis de acordo com a condição de operação.

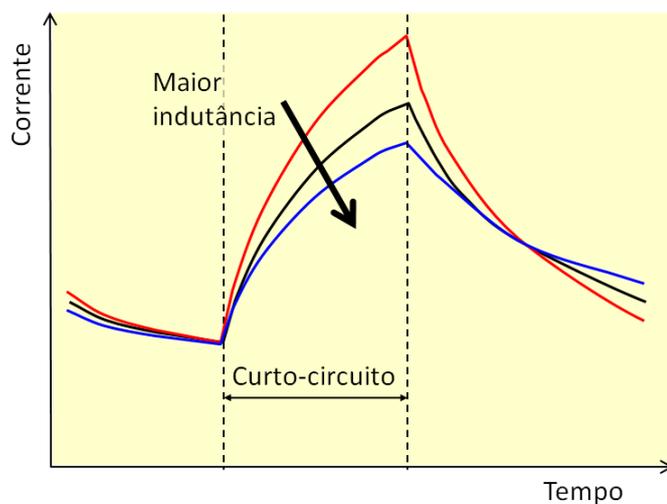


Figura 28– Variação esquemática da corrente na soldagem GMAW com transferência por curto circuito em função da indutância da fonte. Observação: Para simplificar, a duração do curto circuito foi considerada igual nos três casos.

Na soldagem GMAW com corrente pulsada, as condições de transferência de metal dependem fortemente dos parâmetros de pulsação da corrente, particularmente do valor da corrente e da duração do pulso (corrente e tempo de pico). As melhores condições de transferência são conseguidas quando um, e apenas uma, gota de metal de adição é transferida para cada pulso de corrente. Esta condição é conseguida apenas para valores definidos da corrente e do tempo de pico que dependem da composição e diâmetro do eletrodo e da composição do gás de proteção entre outros fatores. Selecionar estes valores e outros parâmetros importantes para uma dada aplicação tende a ser complexo e, em geral, inviável com equipamentos convencionais. O desenvolvimento das fontes controladas eletronicamente permitiu uma revolução nos métodos de controle utilizados na soldagem GMAW pulsada que, em última análise viabilizaram a sua aplicação industrial.

A primeira aplicação prática deste conceito ficou conhecida como *soldagem MIG Sinérgica*. Esta forma de operação da soldagem GMAW foi desenvolvida no **The Welding Institute** (TWI - Inglaterra) na década de 60. O termo inicialmente englobava um grupo de técnicas de controle através das quais o valor e a estrutura da corrente pulsada eram determinados com base no valor da velocidade de alimentação de arame medida com um sensor (figura 29). Para isto, as regras para a seleção das condições de soldagem (“*algoritmo sinérgico*”) ficavam

armazenadas na máquina de soldagem as quais, uma vez estabelecidos o material e diâmetro do eletrodo e o tipo de gás de proteção, determinariam as condições de soldagem com base na velocidade de alimentação do arame. Desta forma, pôde-se conceber um equipamento com ajuste em um controle único ("*one-knob machine*") aliviando o operador da necessidade de especificar as condições de pulsação da corrente.

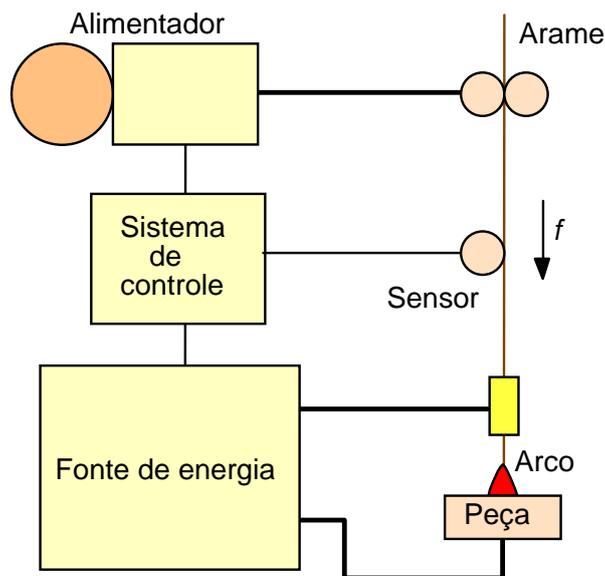


Figura 29 - O controle sinérgico.

O uso do termo "*soldagem MIG sinérgica*" foi estendido e hoje engloba diferentes sistemas baseados na medida de outras variáveis de soldagem além da velocidade de alimentação de arame ou, mesmo, sem a medida de alguma variável (sistema em malha aberta) e, além disso, para outras formas de operação como a soldagem com transferência por curto-circuito. Para esta forma de transferência, fontes eletrônicas com controles adequados podem responder e controlar as diversas etapas da transferência (por exemplo, o início e o término do curto circuito) e, em alguns sistemas, sincronizar estas com alterações na velocidade de alimentação do arame alterando profundamente o processo e permitindo uma operação com esta forma de transferência virtualmente livre de respingos.

A possibilidade de fazer alterações rápidas e controladas nas condições de soldagem pode ser usada não apenas para controlar a transferência de metal na soldagem GMAW, mas também

para atuar em diferentes outros aspectos do processo de soldagem. Um exemplo é o uso de pulsação dupla da corrente. Neste caso, a pulsação de maior frequência (em geral, 10^1 a 10^2 Hz) é usada para controlar a transferência de metal (como discutido acima) enquanto que a de menor frequência (10^0 a 10^1 Hz) é usada para controlar a poça de fusão de forma similar à usada na soldagem GTAW. A figura 30 ilustra esta idéia.

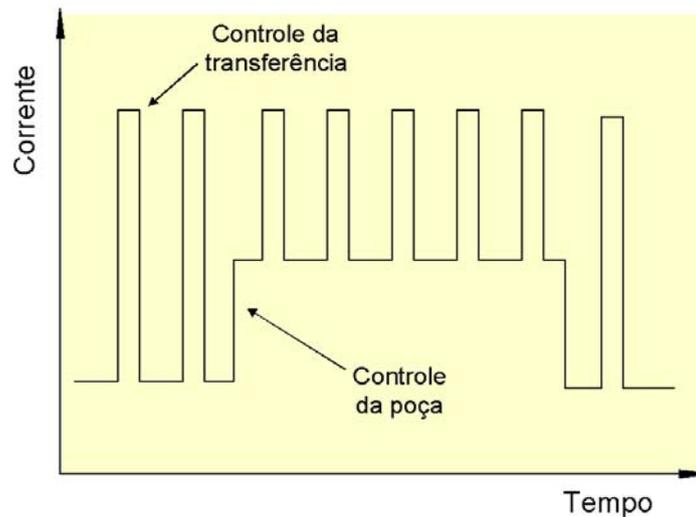


Figura 30 – Variação esquemática da corrente na soldagem GMAW com pulsação dupla.

5.3. Controle Adaptativo:

Este termo é, na realidade, extremamente genérico e engloba diferentes técnicas que envolvem a medição, durante a soldagem, de diferentes sinais, tais como a corrente, tensão, nível de luminosidade ou de ruídos do arco e o perfil ótico ou acústico da poça de fusão. Estes sinais são processados, interpretados em termos de características do processo e enviadas para o sistema de controle. O resultado obtido em um determinado instante é comparado com um resultado esperado e diferenças são corrigidas através de mudanças nos parâmetros de operação baseadas em algum modelo teórico ou empírico. Em princípio, diversas variáveis do processo (comprimento do arco, velocidade de soldagem, orientação da tocha, velocidade do arame, posicionamento ao longo da junta, controle da fusão, enchimento da junta, formação de defeitos, etc.) podem, em princípio, ser ajustadas desta forma. No limite, pode-se cogitar no desenvolvimento de um sistema automático de soldagem capaz de realizar várias das intervenções que um soldador realiza intuitivamente, alterando a velocidade de soldagem e a posição da tocha, para controlar a formação do cordão de solda.

Alguns sistemas já foram sugeridos, nos quais monitoração em tempo real de alguns aspectos do processo pode ser utilizada para o controle das condições de soldagem e o acompanhamento da junta. Entre as técnicas de monitoração utilizadas podem-se citar, por exemplo, a monitoração através de parâmetros do arco, sensores indutivos e o emprego de métodos óticos.

6. Conclusão:

Existem, atualmente, um grande número de opções, em termos de modo de funcionamento e de custo, de fontes de energia para soldagem para uma dada aplicação. Na seleção de uma fonte, itens como tipo de processo de soldagem, nível de corrente e posição de soldagem, ciclo de trabalho, disponibilidade de energia elétrica e tipos de equipamentos auxiliares, particularmente a necessidade de interfaceamento com robôs e outros dispositivos, devem ser considerados. Pontos adicionais que não podem ser esquecidos incluem o custo do equipamento, sua eficiência elétrica, facilidade ou, mesmo, disponibilidade de manutenção adequada para o tipo de fonte considerada e, ainda, a experiência e confiabilidade do seu fabricante e fornecedor.

7. Leitura Complementar:

- **Advanced Welding Processes**, J. Norrish, IOP, cap. 3, 1993.
- **Modern Welding Technology**, 4a edição, H. B. Cary, Prentice Hall, cap. 10, 1998.
- **Welding Handbook**, vol. 1, 9ª edição, AWS, cap. 10, 2001
- **Welding Handbook**, vol. 2, 8ª edição, AWS, cap. 1, 1991.