

Fontes Chaveadas

Ewaldo L. M. Mehl

Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica

Centro Politécnico, Curitiba, Paraná

E-mail: mehl@eletr.ufpr.br

I. APRESENTAÇÃO

Apesar de ficar evidente, desde o desenvolvimento do transistor bipolar em 1948, que esse dispositivo poderia funcionar como um interruptor, os primeiros transistores foram empregados basicamente como amplificadores de baixa potência ou, em eletrônica digital, como interruptores de baixa potência. O mesmo laboratório que desenvolveu o transistor bipolar – o *Bell Laboratories* nos EUA – apresentou em 1956 um novo transistor com quatro camadas semicondutoras a que chamou de *PNPN Triggering Transistor*. O invento foi licenciado à empresa General Electric, que lançou-o comercialmente em 1958 com o nome *Thyristor*. Considera-se que o lançamento comercial do *Thyristor* ou tiristor marca o nascimento de uma nova ciência, chamada **Eletrônica de Potência**.

Todos os circuitos eletrônicos requerem uma fonte de tensão contínua, com determinado grau de estabilização. É claro que, nos equipamentos de pequeno porte tal alimentação pode ser obtida através de pilhas ou baterias mas, no caso mais geral, utiliza-se a energia disponível na rede elétrica local, através de um conversor. Num primeiro momento isso foi obtido através de conversores rotativos, como é o caso do sistema Ward-Leonard, constituído de uma máquina de corrente alternada na qual se obtinha uma corrente contínua. Porém no caso mais geral utiliza-se um conversor *estático* (isso é, *não-rotativo*) denominado **Fonte de Alimentação**.

As fontes de alimentação modernas podem ser classificadas em dois grandes grupos: com **Regulação Linear** ou com **Regulação por Chaveamento**. Desse modo, o que denomina simplesmente de **Fonte Chaveada** é, na verdade, um **Conversor Estático de Corrente Alternada em Corrente Contínua com Regulação por Chaveamento**.

Nesse trabalho são apresentadas, de forma resumida, as Fontes Chaveadas, mostrando suas vantagens e desvantagens frente às fontes com regulação linear. De forma particular, é dada ênfase ao uso das Fontes Chaveadas nos sistemas de telecomunicações. Mostra-se também as perspectivas de evolução das fontes chaveadas, que devem ser observadas nos próximos anos.

II. A CORRENTE ALTERNADA

As primeiras instalações elétricas que se tornaram comercialmente viáveis foram feitas em 1882 por Thomas Alva Edison na cidade de Nova York, e eram

primariamente destinadas à iluminação pública e doméstica, em substituição ao gás. O sucesso do empreendimento demonstrou a possibilidade da exploração comercial da energia elétrica, anunciada na ocasião como elemento de conforto pessoal e maior segurança que os lampiões à gás. Não obstante o impacto causado pela sua instalação, este sistema, tendo sido implantado com dínamos que geravam corrente contínua, fazia com que as quedas de tensão nos fios transmissores obrigasse a se instalarem tais dínamos a uma distância relativamente próximas dos consumidores, fato que limitava a expansão da rede de atendimento. No caso do sistema que Edison instalou em Nova York, os primeiros dínamos ficavam em uma instalação às margens do Rio Hudson. Os dínamos eram acionados por máquinas à vapor, sendo que a instalação às margens do Rio Hudson justificava-se unicamente pela facilidade de transporte do carvão que alimentava as caldeiras. Em contrapartida, Werner von Siemens, em uma exposição industrial realizada em Frankfurt, na Alemanha, em 1891, mostrou a conveniência da associação da geração hidráulica de energia elétrica com sistemas funcionando com corrente alternada. A partir de alternadores instalados no Rio Neckar, foi demonstrada na ocasião a possibilidade de transmissão da energia elétrica a grandes distâncias, já que até o local da exibição eram 176 km de distância. A linha de alta-tensão implementada tinha tensão da ordem de 15 kV, com frequência de 25 Hz, sendo que um transformador reduzia a tensão para 110 V no pavilhão de exposições, onde foram realizadas demonstrações do funcionamento de lâmpadas e motores com a energia proveniente do “distante” rio.

Nos Estados Unidos a proposta de sistemas elétricos em corrente alternada demorou algum tempo para ser adotada, principalmente pela obstinada resistência de Edison ao novo sistema. As objeções de Edison ficaram evidentes na polêmica criada quando da implantação do sistema de metrô em Nova York, onde a empresa de George Westinghouse propunha a instalar trens subterrâneos dotados de motores em corrente alternada. Por trás dessa proposta havia a figura do cientista de origem croata Nikola Tesla, que ao emigrar para os Estados Unidos havia trabalhado inicialmente com Edison e, posteriormente, foi contratado por Westinghouse. Graças à simplicidade e alta eficiência demonstrada pelo motor de indução à corrente alternada, patenteado por Tesla, a corrente alternada surgia como uma alternativa muito interessante para a tração elétrica e futura

substituição de máquinas a vapor em atividades industriais. De posse de um documento que lhe dava exclusividade na cidade de Nova York no fornecimento de iluminação elétrica, Edison conseguiu restringir as instalações de Westinghouse apenas ao acionamento elétrico do metrô. Desse modo, durante alguns anos, dois sistemas elétricos conviveram em Nova York: um, em corrente contínua e operado por Edison, alimentava as lâmpadas nas ruas, lojas e residências; o outro sistema, em corrente alternada e de propriedade de Westinghouse, alimentava os trens do metrô — mas não as lâmpadas das estações. Em 1910, no entanto, o sistema elétrico em corrente alternada trifásico acabou sendo adotado como padrão na América do Norte [1] sendo depois estendido a outros países, principalmente devido às vantagens da transmissão de energia a grandes distâncias em alta tensão.

A análise matemática dos sistemas de corrente alternada, no entanto, era praticamente impossível até os trabalhos de Karl August Rudolf Steinmetz (ou Charles Proteus Steinmetz, nome que adotou após ter emigrado para os Estados Unidos). Ironicamente Steinmetz, assim como Tesla, começou a trabalhar nos Estados Unidos como consultor da empresa General Electric, fundada por Edison. A partir de 1893 [2] e ao longo de 25 anos, Steinmetz propôs e desenvolveu um método de descrição de circuitos em corrente alternada utilizando números complexos, exposto em uma série de artigos e livros. Graças a este método simbólico, foi possível um melhor entendimento dos fenômenos físicos da corrente alternada e, conseqüentemente, sua expansão em todo o mundo.

Na Figura 1 mostra-se de forma gráfica uma tensão alternada que evolui no tempo de forma senoidal. A amplitude máxima alcançada está representada por V . O intervalo de tempo representado por T é o período. Num sistema elétrico observa-se uma corrente que, numa primeira análise, também evolui de forma senoidal e atinge o valor máximo I . Na figura, a corrente está defasada da tensão de um ângulo representado por φ . É comum dizer, examinando-se a Figura 1, que a corrente está **adiantada** de um ângulo φ em relação à tensão, pois a amplitude máxima I da corrente é atingida em um instante **anterior** àquele no qual a tensão atinge a sua amplitude máxima V . De forma análoga, a corrente estaria **atrasada** de um ângulo φ em relação à tensão na situação em que a amplitude máxima I da corrente fosse verificada em um instante **posterior** àquele no qual a tensão atinge a sua amplitude máxima V .

Por outro lado, através de uma comparação entre a potência dissipada em um resistor ligado a uma fonte de tensão contínua e a potência dissipada no mesmo resistor quando conectado a uma fonte de tensão alternada senoidal, surge a definição de **valor eficaz** ou **valor rms** (*root mean square*, ou raiz média quadrática) de uma corrente alternada por meio da Equação 1.

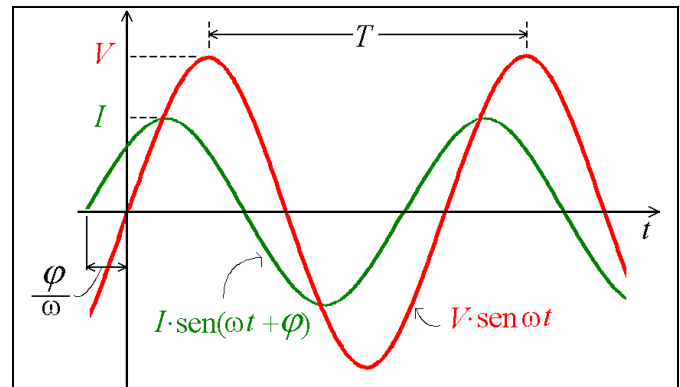


Figura 1: Principais grandezas em um sistema de corrente alternada senoidal.

$$I_{rms} = \frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt \quad \text{Eq. 1}$$

Supondo ser a corrente uma função senoidal pura, ao se aplicar a Equação 1 tem-se como resultado o **valor eficaz da corrente senoidal** mostrado na Equação 2:

$$I_{rms} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad \text{Eq. 2}$$

De modo análogo, o **valor eficaz da tensão alternada senoidal** é dada pela Equação 3:

$$V_{rms} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad \text{Eq. 3}$$

III. A CONVERSÃO PARA CORRENTE CONTÍNUA

A partir da tensão alternada disponível nos sistemas elétricos obtém-se uma tensão alternada simplesmente com o uso de um circuito retificador. Para isso é necessário algum tipo de dispositivo que permita o fluxo da corrente elétrica em uma determinada direção mas a bloqueie no sentido oposto. Os primeiros retificadores empregaram elementos bem pouco eficientes, com válvulas de mercúrio ou colunas de selênio, de modo que a conversão *rotativa* se mantinha como alternativa mais viável para potências elevadas. A partir da Segunda Guerra Mundial, no entanto, foram desenvolvidos diodos com silício que fizeram com que a conversão *estática* fosse dominante.

O tiristor, citado na introdução, possibilitou um melhor controle da retificação, de modo que no final dos anos 60 a conversão rotativa estivesse praticamente abandonada em favor dos conversores estáticos.

Apesar do contínuo progresso verificado no campo das Fontes Chaveadas, os circuitos de retificação são basicamente topologias clássicas. Na Figura 2, observa-se o circuito do retificador trifásico conhecido como “ponte de Graetz”, formado por seis diodos e filtro de saída capacitivo.

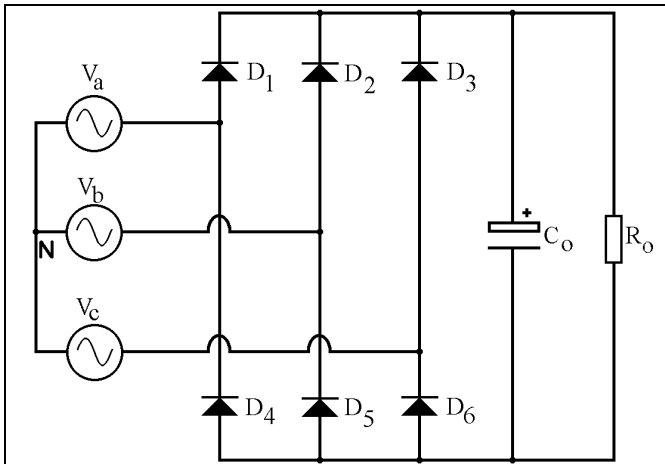


Figura 2: Retificador Trifásico formado por seis diodos conectados em “ponte de Graetz” e filtro de saída capacitivo.

Devido a sua simplicidade e baixo custo, o retificador trifásico da Figura 2 é a opção mais utilizada como estágio de entrada de equipamentos eletrônicos de alta potência. Na Figura 2, V_a , V_b e V_c representam a rede trifásica, com o ponto neutro N . A retificação da corrente é feita pelos diodos $D_1...D_6$. Para reduzir a ondulação da tensão de saída, um conjunto de capacitores eletrolíticos de valor elevado, representado na Figura 2 como C_o , é normalmente conectado à saída retificada, em paralelo com a carga R_o . O circuito comporta-se, sob o ponto de vista da rede elétrica, como uma carga não linear, sendo a corrente drenada à rede tipicamente da forma mostrada na Figura 3, onde é evidente a forma não-senoidal da corrente.

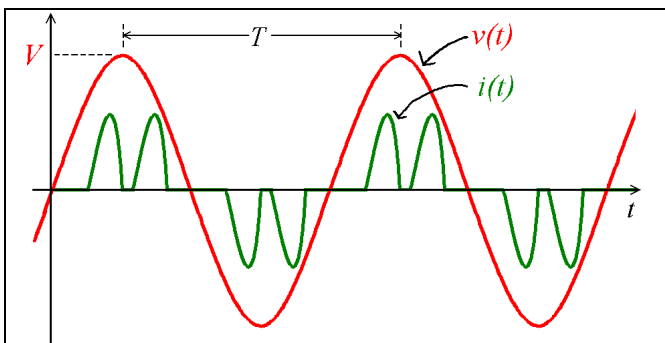


Figura 3: Formas de Onda de Tensão e Corrente típicas para o Retificador Trifásico Básico

Além do retificador “clássico”, existem também uma série de outras topologias. Estes circuitos tem sido objeto de atenção recentemente, como alternativas para reduzir a geração de correntes harmônicas na rede elétrica mas, na presente análise, considera-se que a conversão de tensão alternada para contínua seja obtida através de um retificador convencional.

IV. A REGULAÇÃO DA TENSÃO

Não basta, no entanto, ter-se a tensão contínua, mas é necessário regula-la para um funcionamento estável do equipamento eletrônico. A regulação de tensão pode ser feita utilizando-se os **reguladores lineares** ou então através do controle do tempo de condução de um elemento semiconductor.

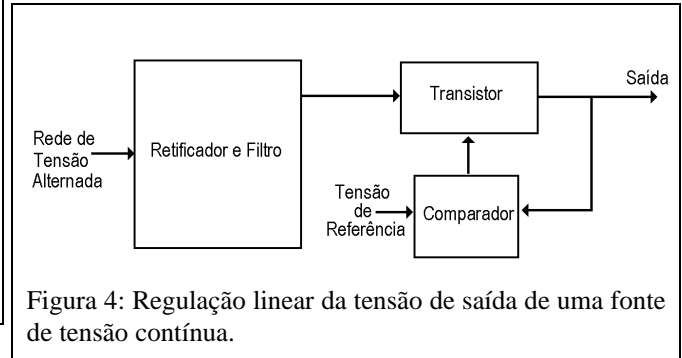
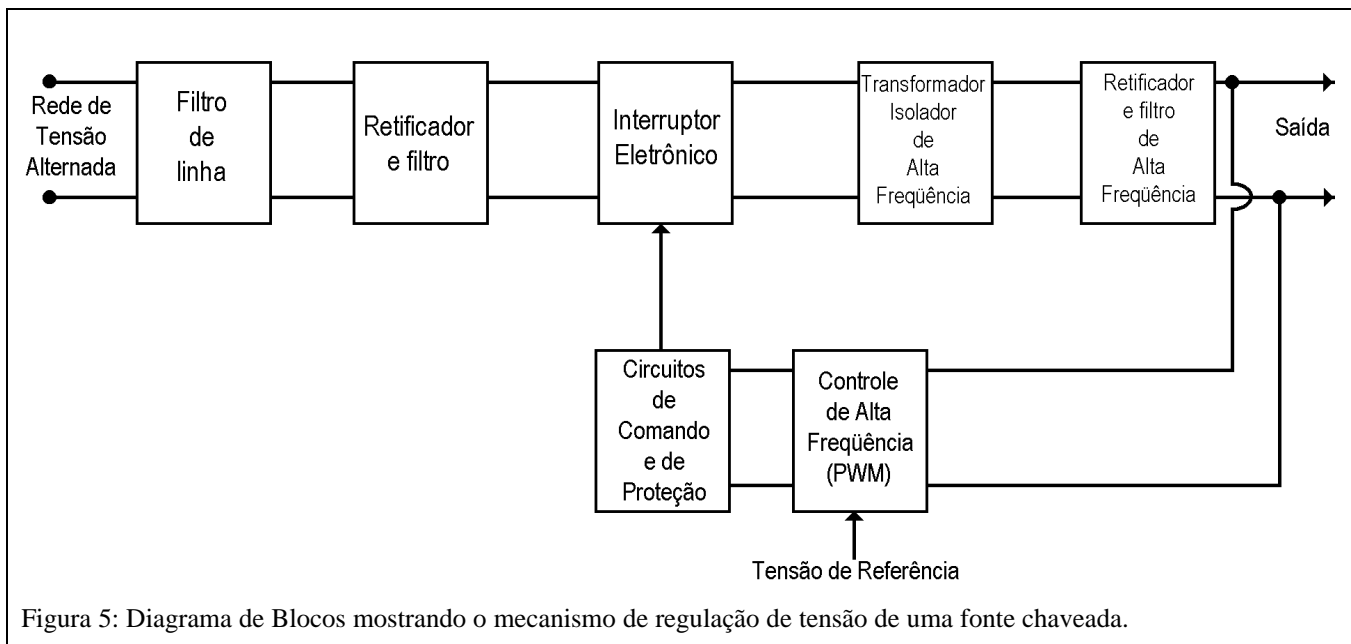


Figura 4: Regulação linear da tensão de saída de uma fonte de tensão contínua.

A regulação linear caracteriza-se pelo controle da condutividade de um transistor, ajustando-se dessa forma a intensidade da corrente fornecida e obtendo-se a regulação. A Figura 4 ilustra de forma esquemática essa alternativa. Após a retificação da tensão alternada, existe um elemento semiconductor (transistor) cuja condutividade pode ser ajustada. A tensão de saída é constantemente comparada com uma tensão de referência e, dessa forma, o transistor age como um elemento de resistência variável e absorve qualquer variação de tensão. Por operar em sua região linear, o transistor apresenta uma dissipação de potência elevada e é o maior responsável pelo baixo rendimento nesse tipo de regulador. Como consequência é necessário usar dissipadores de calor volumosos e pesados.

Apesar das aparentes desvantagens da regulação linear, é possível obter-se tensão de saída extremamente estável e a resposta a transitórios é excelente. Além disso, o funcionamento do transistor em região linear faz com que o circuito não emita qualquer tipo de interferência eletromagnética de alta frequência. Em face disso os reguladores lineares, apesar de serem a princípio indicados somente em baixas potências, encontram também aplicações em sistemas de telecomunicações onde há problemas de ruído.

Outra maneira de se obter a regulação da tensão de saída de uma fonte de tensão contínua é através do chaveamento de um dispositivo semiconductor em frequência elevada. A Figura 5 ilustra esquematicamente essa alternativa, que é conhecida como **fonte chaveada**.



Um regulador chaveado é basicamente um conversor no qual tanto a tensão de entrada como de saída são contínuas (conversor CC-CC). Conforme o tipo de conversor empregado, o valor da tensão de saída pode ser maior ou menor que a tensão de entrada, apesar que nas fontes usadas em telecomunicações normalmente a tensão de saída é menor que a de entrada. O interruptor eletrônico opera somente nos estados de saturação (ligado) e corte (desligado), com frequência de operação muito maior que a frequência da rede elétrica. O resultado é, então, uma tensão alternada não-senoidal que é retificada novamente e entregue à carga. De modo esquemático tem-se os seguintes elementos, conforme a Figura 5:

- **Filtro de linha:** evita a passagem do ruído elétrico produzido pelo conversor para a rede elétrica; em algumas fontes há também o filtro de linha trabalha também no sentido inverso, evitando que ruído existente na rede elétrica seja transmitido para a fonte.
- **Retificador e Filtro de Entrada:** na maioria das fontes chaveadas faz-se a retificação direta da tensão disponível na rede elétrica. Isso elimina a necessidade de um transformador no circuito de entrada, que é volumoso e pesado.
- **Interruptor Eletrônico:** é um transistor operando em condição de corte e saturação. Apesar das primeiras fontes chaveadas usarem transistores bipolares, esses foram logo abandonados em favor dos MOSFETs, que operam em frequência mais elevada com baixas perdas e permitem simplificar o circuito de chaveamento. Para evitar a produção de ruído audível, é necessário que a frequência de chaveamento do interruptor eletrônico seja maior que 20 kHz.
- **Transformador de Alta Frequência:** o chaveamento do interruptor eletrônico produz uma tensão pulsada que, através de um transformador especialmente projetado para operar em alta frequência, é abaixada ou elevada para o nível desejado na saída. Este transformador possibilita também o isolamento elétrico entre a saída da fonte chaveada e a rede elétrica.
- **Retificador e Filtro de Alta Frequência:** a tensão pulsante disponível na saída do transformador é retificada e filtrada.
- **Controle de Alta Frequência:** é responsável pelo controle do tempo de condução do interruptor eletrônico. Normalmente o controle é feito através de um comparador, que recebe uma amostra da tensão de saída e compara-a com uma tensão de referência. Na maioria dos circuitos se a tensão de saída estiver baixa, o interruptor eletrônico é comandado a permanecer conduzindo por um tempo maior; se estiver baixa, o comando determinará um tempo mais curto de condução. Por esse motivo o controle é chamado **por largura de pulso (PWM = pulse width modulation)** e muitas vezes as fontes chaveadas são também conhecidas como **Fontes PWM**.
- **Circuitos de Comando e Proteção:** normalmente as fontes chaveadas incorporam circuitos de proteção contra curto-circuitos e outras condições anormais de funcionamento, que podem ser implementadas através de controles adicionais sobre o interruptor eletrônico. Há também circuitos auxiliares para o acionamento do interruptor eletrônico e, em alguns casos, de interruptores auxiliares, como é o caso das fontes ressonantes.

V. COMPARAÇÕES ENTRE AS FONTES CHAVEADAS E AS DE REGULAÇÃO LINEAR

É evidente que, frente ao exposto, as fontes chaveadas são sistemas eletrônicos muito mais complexos do que aquelas onde se usa a regulação linear. À primeira vista, portanto, não ficam evidentes as razões de sua rápida aceitação pelo mercado.

A principal vantagem das fontes chaveadas está relacionada ao funcionamento do interruptor eletrônico. A potência elétrica é definida como o produto entre a **tensão** e a **corrente**:

$$P = V \cdot I \quad \text{Eq. 4}$$

Desse modo, quando um transistor está operando como um controlador de corrente (funcionamento na região linear) é evidente que o produto **V.I** da Equação 4 não é nulo, ou seja, há uma certa potência sendo dissipada na forma de calor. Já se o transistor é levado a operar como um interruptor, tem-se as seguintes situações:

- **Interruptor “Aberto”**: de modo idealizado um interruptor “aberto” não terá qualquer fluxo de corrente. Portanto na Equação 4 o produto será nulo, independentemente do valor da tensão.

- **Interruptor “Fechado”**: nesse caso há um fluxo de corrente pelo interruptor mas, sob o ponto de vista ideal, a tensão é nula. Ou seja, novamente o produto descrito na Equação 4 será nulo.

Na verdade os transistores empregados na função de interruptor eletrônico apresentam uma pequena tensão entre seus terminais quando são colocados no estado de saturação, de forma que na prática há uma certa dissipação de potência. Também as transições entre os estados “aberto” → “fechado” e “fechado” → “aberto” (comutação de condução e de bloqueio) não ocorrem de forma instantânea e portanto há também uma dissipação de potência nesses instantes de chaveamento. Mesmo assim, a dissipação observada nas fontes chaveadas é muito inferior àquela que seria obtida com o uso da regulação linear. Ou seja, além da eficiência da fonte chaveada ser maior, a diminuição da potência dissipada melhora sensivelmente a relação de potência de saída por peso ou potência por volume. O Quadro 1 mostra, de forma resumida, as vantagens das fontes chaveadas em comparação com as fontes com regulação linear.[3, 4]

Quadro 1: Comparação de alguns parâmetros entre as fontes que empregam regulação linear e as fontes chaveadas.

Parâmetro	Regulação Linear	Fonte Chaveada
Eficiência	Pode chegar a 50%, mas normalmente é da ordem de 25%.	Mesmo nas fontes mais simples é superior a 65%; em projetos de alta qualidade é superior a 95%.
Temperatura dos componentes	O transistor usado como regulador opera em alta temperatura, atingindo freqüentemente 80°C. Os demais componentes acabam também aquecendo-se e o tempo de vida útil é diminuído.	Como a dissipação é menor, é mais fácil manter a temperatura do transistor usado como interruptor em níveis baixos. No entanto, como o volume da fonte é reduzido, é comum usar ventiladores para auxiliar a dissipação.
Ondulação da Tensão de Saída	É muito baixa, como resultado da operação do transistor em região linear.	O uso de alta freqüência introduz uma ondulação adicional. Para obter-se o mesmo nível de ondulação da regulação linear, é necessário um projeto cuidadoso.
Resposta a Transientes	É muito rápida, devido à utilização do transistor em região linear.	Para ter-se resposta rápida, é necessário usar freqüência de chaveamento elevada e circuitos de comando sofisticados.
Relação Potência/Peso	Da ordem de 25 W/kg	Normalmente 100 W/kg. O uso de ventilação forçada e componentes de última geração permite aumentar esse valor.
Relação Volume/Potência	Da ordem de 30 cm ³ /W	Normalmente 8 cm ³ /W. Também pode ser menor com componentes de última geração.
Emissão de Rádio-Interferência	É praticamente nula.	O uso do interruptor eletrônico operando em alta freqüência produz ruído e faz com que sejam necessárias blindagem e filtragem.

Quadro 1 – continuação.

Parâmetro	Regulação Linear	Fonte Chaveada
Interferência à Rede Elétrica	Existe somente o ruído normal decorrente da operação do retificador de entrada.	É necessário filtrar o ruído de chaveamento do interruptor eletrônico.
Confiabilidade	Como o número de componentes eletrônicos é reduzido, a confiabilidade é aparentemente alta. No entanto, caso a dissipação de potência do transistor regulador não seja adequada, pode-se ter temperaturas elevadas que afetam a confiabilidade.	Devido a complexidade do circuito e ao alto número de componentes, a confiabilidade é naturalmente baixa. O uso de circuitos integrados que reúnem várias das funções da fonte chaveada aumenta a confiabilidade.

Verifica-se portanto que a principal vantagem da fonte chaveada, em relação a uma fonte de mesma potência empregando regulação linear, é o peso e o volume. As fontes com regulação linear, apesar de volumosas e pesadas, possuem ainda uma ampla aplicação, principalmente quando os requisitos de confiabilidade são fundamentais.

Uma outra questão crucial que emerge do exame do Quadro 1 é o custo de fabricação. Num primeiro momento as fontes chaveadas só eram interessantes devido ao menor volume e peso, apresentando custo superior às fontes com regulação linear. Dessa forma, eram empregadas principalmente quando o uso de uma fonte com regulação linear comprometesse de alguma forma o espaço ocupado produto final. Esse foi o caso, por exemplo, dos primeiros microcomputadores pessoais, onde a necessidade de uma fonte com potência da ordem de 200 W faria com que, optando-se pelo uso de uma fonte de regulação linear, o volume final do computador fosse provavelmente o dobro e o peso bastante superior. Atualmente, no entanto, o desenvolvimento de circuitos integrados especiais para fontes chaveadas tem facilitado a tarefa de projetá-las, diminuindo sua complexidade e baixando seus custos. Como consequência, as fontes chaveadas estão presentes atualmente na maioria dos equipamentos eletrônicos, tanto nas áreas industriais como para entretenimento.

No caso dos sistemas de telecomunicações, no Brasil observou-se uma certa demora na adoção ampla das fontes chaveadas, devido a restrições impostas por normas da TELEBRÁS. Mesmo com o surgimento de normas específicas sobre fontes chaveadas, no período de 1993 a 1994, num primeiro momento proibia-se o uso de ventilação forçada; essa limitação fazia com que o volume da fonte chaveada fosse elevado e eliminava, por consequência, uma das suas principais vantagens. Aparentemente existiam dúvidas na época quanto à confiabilidade dos ventiladores e, uma vez que previam-se ensaios com temperatura ambiente da ordem de 42°C, os projetistas eram obrigados a dotar os interruptores eletrônicos de dissipadores de calor extremamente grandes, pesados e caros. Logo em seguida, no entanto, a TELEBRÁS reviu sua posição e permitiu o uso de ventilação forçada, possibilitando a imediata redução no volume das fontes chaveadas.

Um grande impulso para a disseminação do uso das fontes chaveadas em sistemas de telecomunicações deve-se também à “descentralização” das centrais telefônicas observada nos últimos anos. Atualmente a implantação de sistemas de telefonia fixa faz uso intenso de armários de distribuição que são, na verdade, extensões remotas da central telefônica. Ou seja, esses armários são equipamentos ativos que, portanto, necessitam ser dotados de sua própria fonte de alimentação. Como o sistema opera de forma totalmente automatizada sem a presença de operadores humanos, é necessário que a fonte de alimentação possua características de supervisão mais avançadas, que podem ser implementadas facilmente nas fontes chaveadas. De mesma forma, esses sistemas necessitam de baterias para operarem nas condições de falta de suprimento da rede elétrica e, assim, a fonte de alimentação deve ser capaz de também atuar como circuito carregador das baterias. Por isso tudo atualmente as fontes de alimentação usadas nesses sistemas são fontes chaveadas bastante sofisticadas, ocasionando em um notável progresso nas técnicas de projeto e construção.

VI. TENDÊNCIAS DE EVOLUÇÃO DAS FONTES CHAVEADAS

Observa-se a cada dia o uso mais freqüente de fontes chaveadas nos mais diversos sistemas eletrônicos. As razões para tal crescimento são, basicamente, os requisitos de volume e peso dos equipamentos. Apesar do avanço verificado na técnica de projeto e nos componentes eletrônicos, a fonte de alimentação permanece, dentro de um sistema eletrônico, como o sub-sistema que ocupa mais espaço relativo e o de menor confiabilidade.

A tecnologia de fontes chaveadas recebe dois impulsos valiosos para prosseguir avançando. O principal, sem dúvida, vem da indústria de microcomputadores e demais equipamentos de informática. Nesse caso a demanda dos fabricantes é por fontes de volume menor e que apresentem menor custo. O custo de produção dos circuitos integrados digitais e microprocessadores mostra uma redução significativa com o aumento do número de peças produzidas, já que são fabricados por processos automatizados. Porém as fontes de alimentação (chaveadas ou não) ainda utilizam um grande número de componentes

discretos, como é o caso dos transistores usados como interruptores eletrônicos e dos componentes magnéticos (indutores e transformadores). O resultado é que o processo de fabricação das fontes faz uso de mão de obra tradicional, elevando o custo final. Os fabricantes de microcomputadores demandam também uma redução do volume final das fontes, que é considerado excessivo frente à miniaturização dos demais componentes. Por exemplo, num microcomputador portátil é impossível incorporar a fonte de alimentação ao próprio equipamento, sendo essa ainda um elemento volumoso e pesado. Assim, apesar do equipamento ser portátil e poder ser acionado “em qualquer lugar” através das baterias internas, na verdade o usuário é obrigado a levar em sua bagagem a fonte de alimentação para prover a carga das baterias e operar o equipamento por um período mais longo.

Esse mesmo tipo de demanda ocorre, no campo das telecomunicações, na telefonia móvel. Os telefones celulares mais modernos são, em alguns casos, menores e mais leves que a fonte de alimentação que é necessária para realizar a carga das baterias. Esses exemplos cotidianos mostram que a tecnologia das fontes chaveadas é ainda um campo fértil para a evolução tecnológica.

A. Incremento da Freqüência de Chaveamento

O principal motivo de se buscar um incremento na freqüência de chaveamento é a redução do tamanho dos transformadores, indutores e capacitores da fonte chaveada. A Figura 6 mostra, de forma comparativa, o tamanho de dois transformadores usados em fontes chaveadas, onde fica evidente a vantagem obtida com o incremento da freqüência.

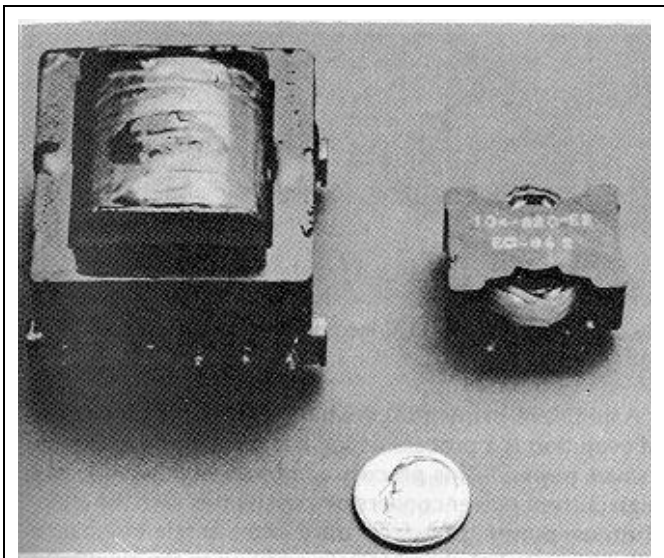


Figura 6: Comparação entre dois transformadores usados em fontes chaveadas com potência de 150 W; à esquerda, usando freqüência de chaveamento de 40 kHz e à direita, de 400 kHz.

O aumento da freqüência de chaveamento reduz o tamanho dos componentes magnéticos e dos capacitores devido à maneira como operam as fontes chaveadas: o chaveamento do interruptor eletrônico é responsável por um mecanismo de transferência de energia. Ou seja, durante cada ciclo de chaveamento a energia é armazenada em um componente (indutor, transformador ou capacitor – conforme o tipo de circuito usado na fonte) e transferida à carga. Ou seja, toda fonte chaveada opera por um princípio de carga e descarga da energia. À medida que a freqüência aumenta, o elemento no qual a energia é armazenada pode ser menor, pois uma quantidade menor de energia necessita ser “guardada” a cada ciclo. O resultado final, portanto, são componentes de menor volume ao se aumentar a freqüência de chaveamento.

Apesar de ser observado que o volume dos componentes de armazenamento diminui com o aumento da freqüência, na verdade a tecnologia encontra uma barreira ao se promover tal incremento de freqüência. Durante alguns anos, principalmente no final da década de 1980, os pesquisadores perseguiram freqüências de chaveamento cada vez maiores. As primeiras fontes chaveadas com aplicação comercial operavam em freqüências ligeiramente superiores a 20 kHz, suficiente para ultrapassar o limite de sensibilidade do ouvido humano. Tais fontes usavam, como elemento interruptor, transistores bipolares. A partir da disponibilização de MOSFETs de potência, capazes de operar em freqüências mais elevadas, observou-se uma verdadeira corrida no sentido de se produzir fontes chaveadas com freqüência de chaveamento elevadas, chegando-se até a faixa de alguns megahertz em trabalhos experimentais. Para uso industrial, no entanto, observou-se que o incremento exagerado da freqüência de chaveamento introduzia problemas adicionais, tais como a necessidade de placas de circuito impresso de projeto especial, que comprometiam dessa forma o custo final e a confiabilidade do produto. Também na faixa de megahertz as reatâncias parasitas dos componentes tem ordem de grandeza compatível com a dos próprios componentes, produzindo dificuldades adicionais ao projeto. Dessa forma, a maioria das fontes chaveadas de microcomputadores utiliza freqüência de chaveamento inferior a 100 kHz. Em fontes chaveadas mais sofisticadas, usadas por exemplo em centrais telefônicas digitais de grande porte, atinge-se freqüências de chaveamento de até 500 kHz.

B. Redução da Dissipação de Potência

Sob o ponto de vista ideal o chaveamento do interruptor eletrônico não teria qualquer tipo de perda. A Figura 7, no entanto, ilustra o que ocorre num interruptor eletrônico.

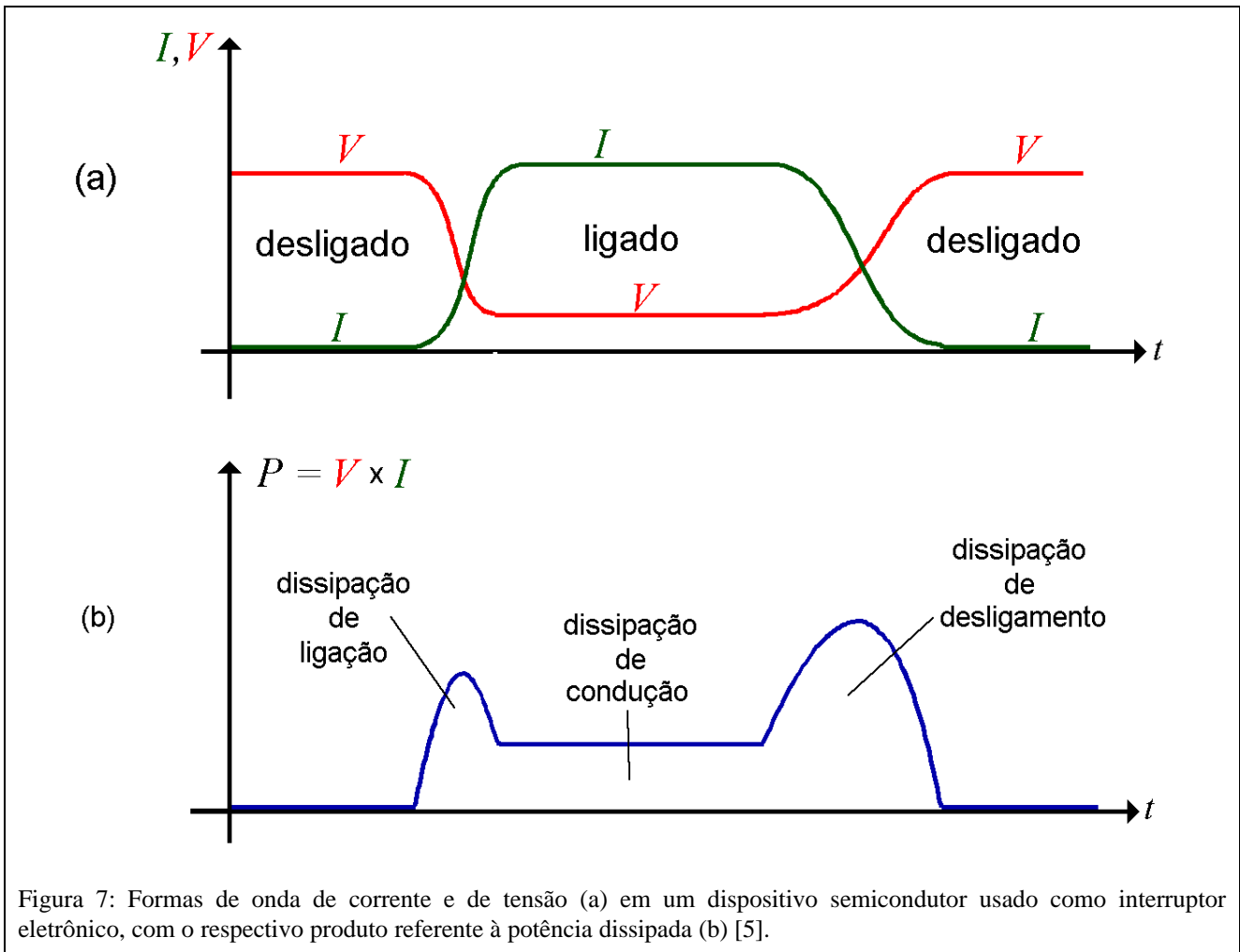


Figura 7: Formas de onda de corrente e de tensão (a) em um dispositivo semicondutor usado como interruptor eletrônico, com o respectivo produto referente à potência dissipada (b) [5].

De modo esquemático tem-se as seguintes situações na Figura 7, sob o ponto de vista da potência dissipada:

- Enquanto o interruptor encontra-se em estado “desligado”, a corrente é nula, de modo que a potência (ou produto $V.I$, conforme Equação 4) é nulo. Assim, nessa situação a dissipação é zero.
- No instante em que o interruptor muda da condição “desligado” para a condição “ligado”, a corrente sobe de zero até um determinado valor, enquanto a tensão desce. Ou seja, o produto $V.I$ apresenta um “pico” chamado de **dissipação de ligação** (*turn-on loss*).
- Durante o intervalo em que o interruptor está “ligado”, a corrente flui através de seus terminais e, devido às características do material semicondutor empregado, há uma pequena tensão entre os terminais. Aqui novamente o produto $V.I$ não é nulo, sendo considerado como **dissipação de condução** (*conduction loss*).
- Ao passar da condição de “ligado” para a de “desligado” (comutação de bloqueio), a corrente diminui até zero à medida que a tensão aumenta. Em todos os componentes eletrônicos usados como interruptores nas fontes chaveadas essa transição é

mais lenta do que aquela observada na condição “desligado” → “ligado” (comutação de condução). Como consequência, a **dissipação de desligamento** (*turn-off loss*) é maior do que a de ligação.

Em face da Figura 7, o esforço de melhoria ocorre em duas áreas distintas:

- Redução da dissipação durante a condução: está baseada na tecnologia de fabricação do interruptor, ou seja, é um esforço que está concentrado nas mãos dos fornecedores de componentes eletrônicos.
- Redução da dissipação durante o chaveamento: por um lado este tipo de dissipação é uma característica intrínseca ao componente. Porém os projetistas de fontes chaveadas desenvolveram alguns métodos para redução dessa dissipação através de fenômenos de ressonância. Esta técnica é bastante sofisticada e tira partido da capacitância parasita dos componentes de modo a obter, durante os instantes de chaveamento, uma circulação de corrente por elementos auxiliares. Como resultado pode-se obter no instante de chaveamento uma tensão nula sobre o interruptor ($ZVS = \text{zero voltage switching}$) ou uma corrente nula ($ZCS = \text{zero current switching}$), diminuindo-se a

dissipação total. Apesar dos resultados promissores em nível de trabalhos experimentais, os projetistas industriais são normalmente relutantes em adotar o chaveamento ressonante nos seus produtos, alegando que essa técnica é extremamente sofisticada para produção em escala industrial.

Além dessas abordagens, existe também um esforço, novamente sob responsabilidade dos fabricantes de componentes, de se melhorar o acoplamento térmico entre a parte ativa do interruptor e seu invólucro, e deste com o dissipador de calor. Nesse assunto trabalha-se basicamente com novos tipos de montagens internas dos componentes, bem como há propostas de novos tipos de invólucros e dissipadores.

C. Tecnologia de Interruptores de Potência:

Os interruptores eletrônicos disponíveis para Eletrônica de Potência podem ser classificados em quatro grandes grupos [6]:

- **Tiristores:** além do tiristor “convencional”, também chamado SCR (*silicon controlled rectifier*), há os tiristores bloqueados por *gate* (GTO – *gate turn-off thyristor*), tiristores de indução estática (SITH – *static induction thyristor*) e tiristores controlados por transistor tipo MOS (MCT – *MOS controlled thyristor*). Esses dispositivos tem características de chaveamento em baixa frequência, não sendo utilizados em fontes chaveadas. Seu uso é intenso, no entanto, nas fontes de potência elevada.
- **Transistores bipolares (BJT – bipolar junction transistor):** apesar de terem sido fabricados transistores bipolares para correntes da ordem de centenas de ampères e tensões de bloqueio até 800 V, este tipo de componente praticamente não é mais utilizado em fontes chaveadas. O principal problema deve-se a que o transistor bipolar é um dispositivo controlado por corrente de base; a corrente de base típica, quando o dispositivo opera como interruptor de potência, é um torno de 10% a 15 % da corrente do coletor. É necessário também aplicar uma corrente de base reversa, para permitir um bloqueio rápido. Com isso, o circuito de comando é caro e complexo.
- **MOSFET (transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor – metal-oxide-semiconductor field-effect transistor):** Este dispositivo é um interruptor com características de controle por um sinal de tensão aplicado no terminal de *gatilho (gate)*. Com isso, a corrente necessária durante as comutações (entrada em estado de condução e bloqueio) é bastante baixa, diminuindo consideravelmente a complexidade do circuito de comando. Além disso o tempo de comutação é menor que aquele observado nos transistores bipolares, fazendo com que seja possível a operação em frequências elevadas. O MOSFET rapidamente dominou o cenário das fontes chaveadas e é, atualmente, o principal componente para

aplicações industriais. Existe, no entanto, um problema associado à sua operação em tensões mais elevadas, da ordem de 1000 V. Ocorre que, para suportar tais tensões, os projetistas são obrigados a deslocar os terminais internos de “dreno” e “fonte” e obtém-se como consequência uma elevada resistência elétrica durante a condução, aumentando a dissipação. Como resultado, os MOSFETs limitam-se, para uso em fontes chaveadas, a tensões da ordem de 800 V.

- **IGBT (transistor bipolar com gatilho isolado – *isolated gate bipolar transistor*):** Para vencer as limitações do transistor bipolar e do MOSFET, desenvolveu-se um tipo híbrido de transistor, que tem crescido de importância no campo das fontes chaveadas. O IGBT é basicamente um transistor bipolar que, no lugar do terminal de base, apresenta um eletrodo de *gatilho (gate)* semelhante a um MOSFET. Assim, seu disparo é feito por nível de tensão, permitindo o uso de circuitos de comando simples como os usados nos MOSFETs. No entanto, sua condução semelhante a um transistor bipolar implica em uma baixa dissipação de condução e permite que o dispositivo opere sob tensões superiores a 1000 V. Os primeiros IGBTs apresentados, no entanto, não permitiam frequência de chaveamento superior a 15 kHz, tornando seu uso proibitivo em fontes chaveadas que fossem expostas ao público, devido ao ruído audível gerado. No entanto logo se tornaram disponíveis IGBTs capazes de operarem em frequências superiores a 20 kHz, permitindo seu amplo uso em fontes chaveadas. Existe ainda uma questão referente ao custo do IGBT, que ainda é superior aos MOSFETs nos dispositivos de baixa e média potência. Para fontes chaveadas de potência mais elevada, porém, o IGBT constitui-se atualmente na melhor alternativa.

Além dos citados, existem outros componentes tais como o **IGCT** (*Integrated Gate Commutated Thyristor*), que são componentes específicos para aplicações em potência elevada, como para fornos industriais e tração elétrica, de menor importância portanto para o campo das fontes chaveadas. Também o **SIT** – Transistor de Indução Estática (*static induction transistor*), é um componente que permite o chaveamento de altas correntes em altas frequências, porém atualmente restrito a aplicações fora da área de fontes chaveadas, como amplificadores de áudio, sistemas de VHF, UHF e microondas.

D. Integração de Componentes:

Conforme observou-se na Figura 5, uma fonte chaveada possui sempre uma série de sub-circuitos associados ao disparo do interruptor eletrônico e ao controle da tensão. Com a evolução da técnica de projeto de circuitos integrados e motivados pelo grande número de fontes chaveadas produzidas principalmente para microcomputadores, diversos fabricantes desenvolveram circuitos integrados específicos para uso nessas aplicações.

Na Figura 8 mostra-se, a título de exemplo, o circuito integrado UC1524 fabricado pela empresa UNITRODE. Este circuito integrado possui todos os elementos necessários para a implementação de uma fonte chaveada.

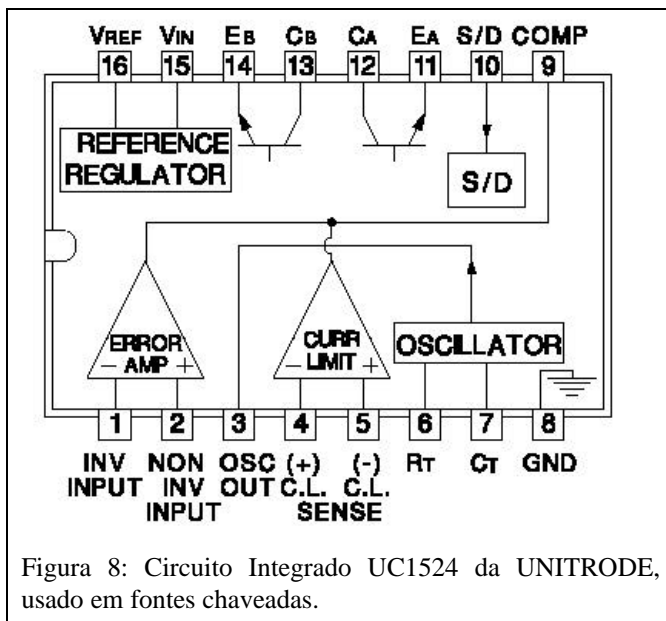


Figura 8: Circuito Integrado UC1524 da UNITRODE, usado em fontes chaveadas.

O circuito integrado UC1524, que encontra equivalentes de outros fornecedores, constitui-se basicamente dos seguintes blocos:

- **Regulador de Referência:** é uma fonte linear interna que fornece uma tensão de 5 V, usada para alimentar o próprio circuito e como tensão de referência.
- **Oscilador:** A frequência do oscilador interno pode ser ajustada em função de um capacitor conectado externamente. Além de ser usado para o controle por largura de pulso (PWM) do interruptor eletrônico da fonte, o circuito integrado permite o acionamento de um segundo interruptor, existente em algumas configurações de fontes chaveadas, introduzindo um “tempo morto” (*dead time*) entre dois chaveamentos.
- **Amplificador de Erro:** Permite a comparação de uma amostra da tensão de saída com a tensão de referência. A saída do Amplificador de Erro está disponível no pino 9, de modo que pode-se acrescentar um limitador externo na forma de um nível de tensão contínua e impedindo que, quando a saída da fonte esteja em aberto, os interruptores sejam colocados em estado de condução contínua. Há também um outro amplificador interno, denominado **Limitador de Corrente**, cuja função é sobrepor-se à saída do Amplificador de Erro no caso de se detectar uma corrente acima de um certo valor pré-ajustado.
- **Estágios de Saída:** Há duas saídas feitas através de transistores bipolares internos. Esses transistores recebem sinais de base defasados de 180°, permitindo o uso desse circuito integrado em fontes chaveadas com dois interruptores em configuração *push-pull*. No caso de fontes com um único interruptor, a segunda

saída do circuito integrado pode ser simplesmente deixada sem conexão.

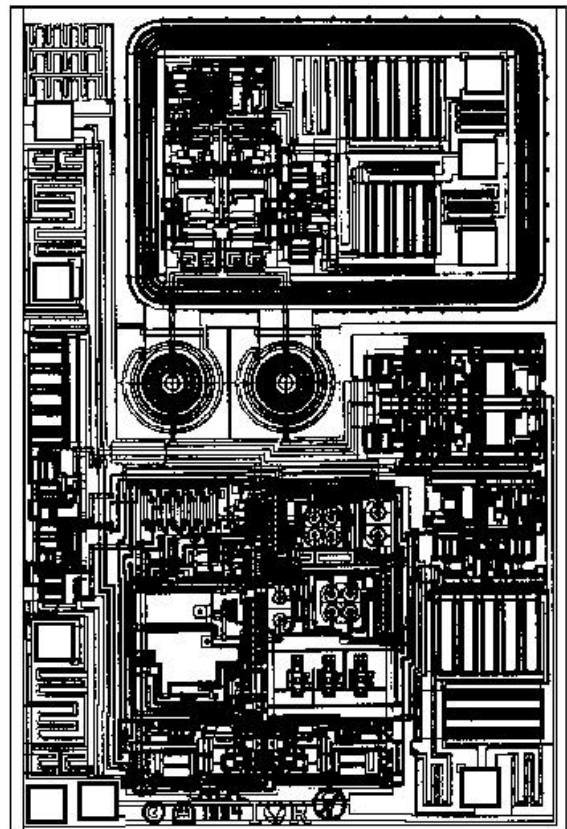


Figura 9: *Layout* interno de um circuito integrado usado em fontes chaveadas (International Rectifier - IR2151)

Na Figura 9 apresenta-se uma foto do *layout* interno de um circuito integrado utilizado em fontes chaveadas (no caso, é o circuito integrado IR2151, fabricado pela empresa *International Rectifier* para uso em fontes chaveadas de baixa potência, como as usadas em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes.

Existem também no mercado módulos híbridos, formados pelo circuito integrado de acionamento e os interruptores de potência encapsulados num único invólucro. Esses módulos são muito usados quando se deseja simplificar o processo de fabricação da fonte chaveada, principalmente as de menor potência. São também muito usados quando, num sistema eletrônico, é necessário obter uma tensão diferente daquela de alimentação. Na Figura 10 mostra-se alguns desses módulos.

Um outro estágio de integração coloca sobre um mesmo substrato de silício os interruptores de potência e os circuitos de acionamento e controle, chamando-se o dispositivo resultante de *smart power device*. Esses dispositivos, no entanto, são ainda de preço elevado e a tecnologia associada à sua produção deverá ainda ser objeto de considerável desenvolvimento.

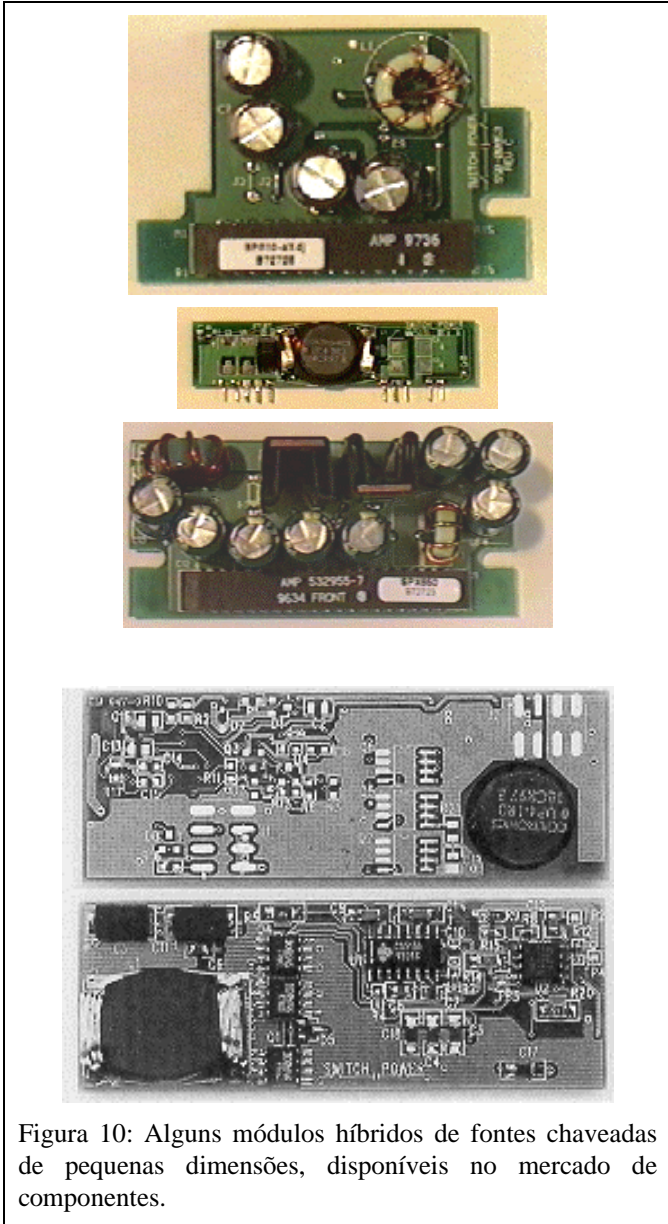


Figura 10: Alguns módulos híbridos de fontes chaveadas de pequenas dimensões, disponíveis no mercado de componentes.

CONCLUSÕES

As fontes chaveadas são atualmente muito empregadas nos mais variados sistemas eletrônicos, principalmente devido às suas características de baixo volume e peso em comparação com as fontes com regulação linear. No entanto, são circuitos complexos que demandam um maior cuidado para o projeto e implementação prática.

A evolução das fontes chaveadas dá-se tanto sob o aspecto do oferecimento de componentes com melhores características como pelo desenvolvimento da técnica de projeto e construção. Comparativamente às outras áreas da Eletrônica, muito há a ser feito, principalmente nos aspectos de integração de componentes e de melhoria da confiabilidade. Apesar desses desafios, as fontes chaveadas permanecem como uma alternativa extremamente interessante para todos os sistemas eletrônicos.

REFERÊNCIAS

- [1] DORF, Richard C. *Introduction to electric circuits*. John Wiley, New York, 1989.
- [2] THE SOFTWARE TOLLWORKS MULTIMEDIA ENCYCLOPEDIA. New York, 1992. Grolier. CD-ROM
- [3] AYRES, Carlos Augusto & SOUZA, Luiz Edival *Fontes chaveadas; fundamentos teóricos*. FUPAI, Itajubá, 1993.
- [4] RASHID, Muhammad H. *Eletrônica de Potência; circuitos, dispositivos e aplicações*. Makron Books, São Paulo, 1999.
- [5] BURNS, William W. & KOCIEKI, John *Power electronics in the minicomputer industry*. Proceedings of the IEEE, vol. 76, n. 4, April 1988.
- [6] BASCOPE, René P. T. & PERIN, Arnaldo J. *O transistor IGBT aplicado em eletrônica de potência*. Sagra Luzzatto, Porto Alegre, 1997.