

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA - INTRODUÇÃO À DISCIPLINA

Este curso faz uma apresentação das aplicações eletrônicas de potência no sistema elétrico. Inicialmente tem-se um breve histórico da produção e utilização industrial da eletricidade, indicando-se o surgimento e a evolução do que hoje é chamada Eletrônica de Potência.

Os sistemas eletromecânicos usados no início da eletrificação são incapazes de dar ao sistema elétrico um comportamento dinâmico adequado às necessidades modernas. Apenas com o advento da Eletrônica de Potência na década de 60 do século passado e sua contínua evolução desde então é que tem se tornado possível atuar, praticamente em tempo real, sobre grandes quantidades de energia, em qualquer estágio, desde sua geração até seu aproveitamento.

Na sequência se faz uma exposição das principais fontes e acumuladores de energia que usam conversores eletrônicos para seu aproveitamento. Tais fontes estão diretamente relacionadas à geração de energia de forma renovável e limpa e se constituem em elementos determinantes para a consolidação de uma matriz de energia elétrica menos danosa ao meio ambiente.

Os capítulos seguintes apresentam os conversores eletrônicos de potência utilizados na conexão das fontes ao sistema elétrico.

A seguir são apresentadas as aplicações na transmissão de energia, as tecnologias FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Tais dispositivos transformam o sistema de transmissão de um elemento passivo do sistema para um elemento ativo, no sentido de que se torna possível atuar sobre o mesmo para controlar o fluxo de potência entre fontes e para as cargas.

Uma revisão e um aprofundamento das teorias de potência elétrica são apresentados. Tal discussão é de grande importância, especialmente em situações que fogem das condições ideais do sistema, ou seja, quando se têm desequilíbrios e distorções. Nesses casos as teorias convencionais não são capazes de produzir resultados consistentes com os fenômenos físicos associados.

Ao discutir os aspectos de distribuição, são abordadas aplicações relacionadas com qualidade da energia e introduzida a tecnologia de redes inteligentes (*smart grids*), que associam fontes distribuídas de energia, controle descentralizado, comunicações, etc.

A importância da Eletrônica de Potência nesse contexto é que essa tecnologia é a que permite implementar estratégias de controle na produção, transporte e uso final da energia elétrica.

Embora limitada pela capacidade de bloqueio de tensão e de condução de corrente dos dispositivos semicondutores (diodos, transistores e tiristores), na atualidade já é possível construir conversores com capacidade para alguns MVA. Tem-se a expectativa de, com evoluções nos materiais utilizados para a construção destes dispositivos, ampliar em pelo menos uma ordem de grandeza estes valores, o que dará ainda maior capacidade de processamento de energia aos conversores.



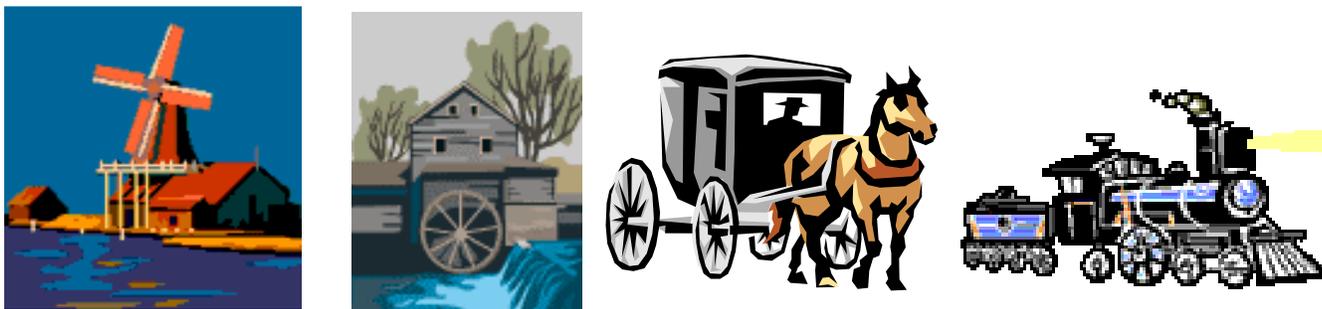
Peças publicitárias da Pirelli© (1998)

<http://www.pirelli.com/corporate/en/company/brand/advertising/98-99-camp/default.html#.TxxK66Xy-MQ>

Uma breve história da eletricidade industrial e da eletrônica de potência

As forças da natureza, desde o início da civilização, foram utilizadas para realizar trabalhos que facilitassem a atividade humana. Fosse a força das águas, dos ventos ou animal, a tecnologia evoluiu no sentido de tornar possível ao Homem o aproveitamento controlado dessa energia.

A energia eólica, como se sabe, é sazonal e um aproveitamento perene é possível apenas em poucas localidades. Já a energia hidráulica, embora também sofra sazonalidades, está disponível de modo muito mais regular. Por essa razão, as instalações industriais (como moinhos e serrarias), instalavam-se ao lado dos cursos d'água. A invenção da máquina a vapor, no século XVIII, pela primeira vez tornou possível que as instalações industriais se deslocassem para locais mais seguros, distantes dos cursos d'água.



Exemplos de aproveitamento de energia (imagens Microsoft).

Seja com máquinas eólicas, hidráulicas ou a vapor, a transmissão da energia se fazia de forma mecânica, por meio de eixos, roldanas, engrenagens, etc. O controle independente de cada tipo de maquinário era, assim, de maior complexidade e limitado em termos de flexibilidade de aplicações. Em outras palavras, a energia mecânica não se constitui em um bom *vetor energético*, ou seja, é difícil de ser levada de um local a outro e conveniente transformada.



Transmissão mecânica de força motriz: tração animal, roda d'água e máquina a vapor

Possivelmente a principal vantagem da eletricidade sobre outras formas de energia seja exatamente sua “portabilidade” e facilidade de transformação. Ou seja, é muito fácil levar energia elétrica de um local a outro e também transformá-la em movimento, em luz, em calor, etc. Nesse contexto, considera-se que a eletricidade é, atualmente, o melhor *vetor energético*. Por outro lado, sofre de uma grande limitação, que é a impossibilidade de armazenagem direta em quantidades significativas.

A eletricidade

A eletricidade, como tema de investigação científica remonta ao século XVIII. Desde a antiguidade a produção de eletricidade se fazia apenas por meio eletrostático, o que significava a capacidade de obter um potencial elétrico elevado, mas fortemente dependente do processo de descarga, ou seja, não se dispunha de uma fonte de potencial elétrico minimamente constante e, assim, da possibilidade de obter uma corrente constante de valor significativo.

Na segunda metade do século XVIII, um assistente de médico italiano Luigi Galvani¹, ao tocar o nervo ciático de uma rã com um escalpelo metálico, verificou uma contração muscular na região tocada sempre que uma máquina eletrostática produzia uma faísca. Tal observação fez com que Galvani investigasse a relação entre a eletricidade e a animação - ou *vida*. Os resultados das investigações de Galvani geraram muita especulação sobre tal relação. Não à toa, a escritora Mary Shelley em seu romance Frankenstein, escrito no início do século XIX, vincula a animação do corpo do ser criado pelo Dr. Frankenstein a uma descarga de eletricidade.



Cena do filme “Jovem Frankenstein” (Mel Brooks, 1974), na qual uma descarga elétrica confere vida ao novo ser.

No entanto Galvani não via a eletricidade como a essência da vida, acreditando que a eletricidade animal vinha do músculo. A divulgação de suas descobertas levou à invenção da primeira bateria elétrica por Alessandro Volta².

Volta fez observações no trabalho de Galvani e realizou experimentos próprios, concluindo que as rãs não produziam eletricidade. O que ocorria era que os metais utilizados na conexão dos nervos e músculos da rã geravam a eletricidade, e a passagem da corrente causava as contrações. Volta percebeu que as contrações nos músculos das rãs ocorriam e continuavam enquanto houvesse um circuito e que fossem utilizados contatos de metais heterogêneos. Disso ele concluiu que o princípio de excitação residia nos metais. Concluiu também que a corrente elétrica surgia quando estes metais estavam separados por um meio condutor, como as pernas da rã ou uma solução salina e o músculo funcionava apenas como um condutor e detector biológico da corrente elétrica.

Em 1800 Volta idealizou a pilha voltaica, dispondo discos de cobre e zinco, alternadamente, empilhados em série, separados por discos de feltro encharcados de solução condutora.

¹ https://pt.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani

² https://pt.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta



Bateria de Volta

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/VoltaBattery.JPG/450px-VoltaBattery.JPG>

Com tal invenção, os estudiosos da eletricidade passaram a dispor de uma fonte perene de eletricidade, o que teve resultados revolucionários na evolução desse campo de investigação. A produção de eletricidade, ao longo de toda a primeira metade do século XIX provinha, pois, de reações eletroquímicas, sendo fonte de Corrente Contínua (CC). A primeira bateria recarregável, do tipo chumbo-ácido, foi inventada em 1859, por Gaston Plantè.

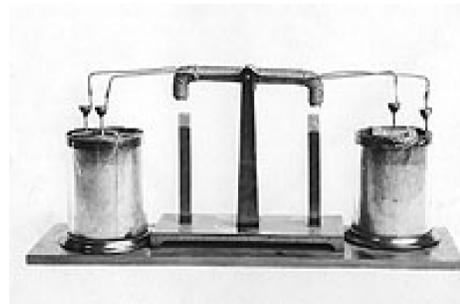
As pesquisas realizadas na primeira metade do século XIX resultaram nas descobertas das leis fundamentais do eletromagnetismo. As descobertas de Michael Faraday e Joseph Henry, de forma autônoma, em 1831, fazendo a vinculação dos fenômenos elétricos aos magnéticos, abriram as portas para outras formas de produção de energia elétrica, em maior quantidade e, portanto, à aplicação produtiva da eletricidade.



Faraday



Henry



Reconstruction of Henry's original oscillating electromagnet motor.
N.M.A.H. Cat. No. 244,904.
Smithsonian neg. no. 24,976-A.

Poucos anos depois, conhecida a propriedade de campos eletromagnéticos interagirem entre si, produzindo ação mecânica, começaram os desenvolvimentos dos motores elétricos³.

³ http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor

O desenvolvimento dos motores CC começa em 1832, com William Sturgeon. Seguiram-se os desenvolvimentos realizados por Emily and Thomas Davenport em 1837, levando a um motor CC com comutador. Não havia, no entanto, suprimento de energia adequado para estes dispositivos.

Em 1856 Werner Siemens desenvolveu uma máquina eletromecânica, à qual denominou “dínamo”, com objetivo de substituir as baterias (que até então não eram recarregáveis) nos sistemas telegráficos⁴. Em 1867 ele aperfeiçoou o invento com a introdução de um sistema de auto-excitação, tendo enunciado o princípio de reversibilidade, ou seja, que a mesma máquina poderia atuar como gerador ou motor.

Em 1869, Zenobe Gramme patenteou o dínamo (gerador CC), aproveitando o princípio de auto-excitação de Siemens e a invenção dos anéis coletores por Antonio Pacinotti em 1865. Ao conectar duas destas máquinas em paralelo, sendo que apenas uma era acionada mecanicamente, observou que a outra máquina passara a rodar e desenvolver torque em seu eixo, ou seja, atuava como motor. Tinha-se, assim a possibilidade de gerar eletricidade a partir de uma fonte de energia mecânica e em muito maior quantidade. A produção industrial do dínamo de Gramme se iniciou em 1871. Mais do que isso, a experiência de Gramme demonstrou ser possível *transmitir* energia elétrica através de fios condutores, ou seja, tornava-se possível que a fonte de energia e as cargas não mais estivessem no mesmo local.

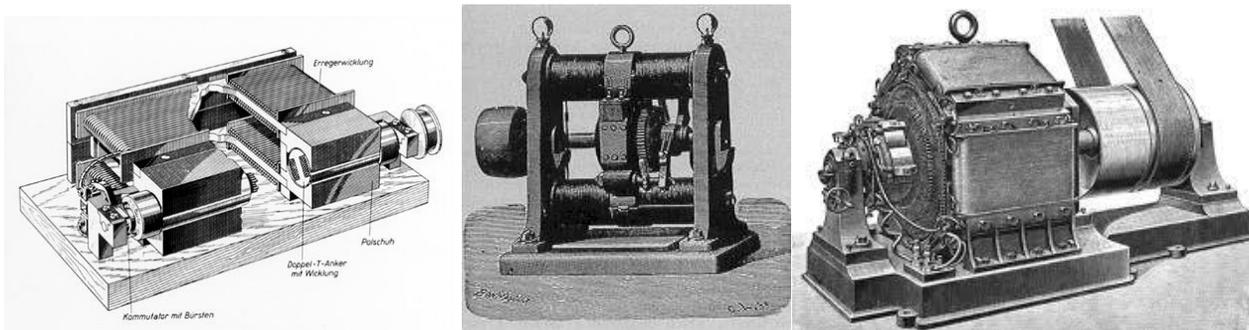
Durante a década de 80 do século XIX, impulsionado pelos trabalhos e investimentos de Thomas Edison, ampliou-se a produção e o aproveitamento da eletricidade em sua forma CC. A transmissão da energia se dava em distâncias relativamente curtas, uma vez que o nível de tensão era reduzido (110 V) por razões de segurança.

O aumento da demanda por eletricidade e a necessidade de aumentar a distância de transmissão apontavam para a elevação da tensão, o que encontrava severas limitações em termos de isolamento dos condutores e proteção dos usuários.

Ao mesmo tempo avançavam estudos para o uso de corrente alternada. Em 1881 Gaulard e Gibbs construíram um dispositivo que pode ser considerado um transformador primitivo, com núcleo aberto, que permitia obter tensão CA de saída isolada da tensão aplicada na entrada. Denominaram esse dispositivo de “gerador secundário”, o qual foi inicialmente usado para alimentação de lâmpadas de arco.

A geração de tensão CA era feita pelos dínamos, sem uso do comutador, coletando a tensão por meio de anéis diretamente na bobina do rotor. Ou seja, eram sistemas monofásicos.

Em 1884 Gaulard construiu uma linha de transmissão CA de 34 km de extensão, 2 kV, 130 Hz. Seus “geradores secundários” tiveram os enrolamentos de entrada conectados em série e as saídas, isoladas, alimentavam as cargas no nível adequado de tensão.



Dínamo de Siemens⁵ (esq.) e de Gramme (dir)⁶ e dínamo de seis polos⁷ patenteado por René Thury em 1883 (abaixo).

⁴ Massimo Guarnieri, “The Beginning of Electric Energy Transmission: part One”, IEEE Industrial Electronics Magazine, March 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6482228>

⁵ http://www.siemens.com/history/en/news/1057_dynamolectric_principles.htm

⁶ <http://www.hbci.com/~wenonah/history/img/ed10.jpg>

⁷ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rene_Thury_six_pole_dynamo.jpg

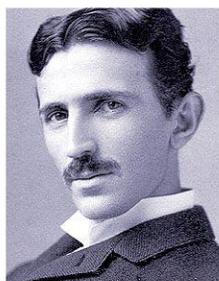
Nesse mesmo ano Galileo Ferraris desenvolveu estudos sobre o dispositivo de Gaulard e identificou a existência de defasagem entre tensão e corrente, definindo os conceitos de potência ativa e de fator de potência. Em 1885, Ferraris produziu um campo girante a partir de duas tensões defasadas, sendo considerado, juntamente com Tesla, inventor dos motores de corrente alternada.

Ainda em 1885, Otto Bláthy construiu um dispositivo com núcleo magnético fechado, denominando-o de “transformador”. A invenção do transformador permitiu, por meio do ajuste das relações de espiras, a efetivação do conceito de transmissão de energia em CA, com diversos transformadores alimentados por uma mesma fonte de tensão e com secundários independentes.



“Gerador secundário” de Gaulard e Gibbs⁸ (esq.) e Transformador de Bláthy⁹ (dir)

Em 1888, Nikola Tesla inventa o motor de indução. Tesla, em 1888, através duas patentes registra a invenção não apenas do motor de indução¹⁰, indicando a possibilidade de uso de rotor bobinado ou em gaiola, mas também do motor de relutância variável e do motor a histerese¹¹, estes últimos com característica de sincronismo com o campo girante. Embora concedidas na mesma data (1º de maio de 1888) a patente referente ao motor de indução foi solicitada cerca de um mês após as demais, talvez indicando que os estudos dos fenômenos que levavam à produção de torque no rotor continuaram mesmo após o pedido inicial (que não se referia ao motor de indução)¹².



Galileo Ferraris, Nikola Tesla e réplicas dos motores de indução de Ferraris e de Tesla

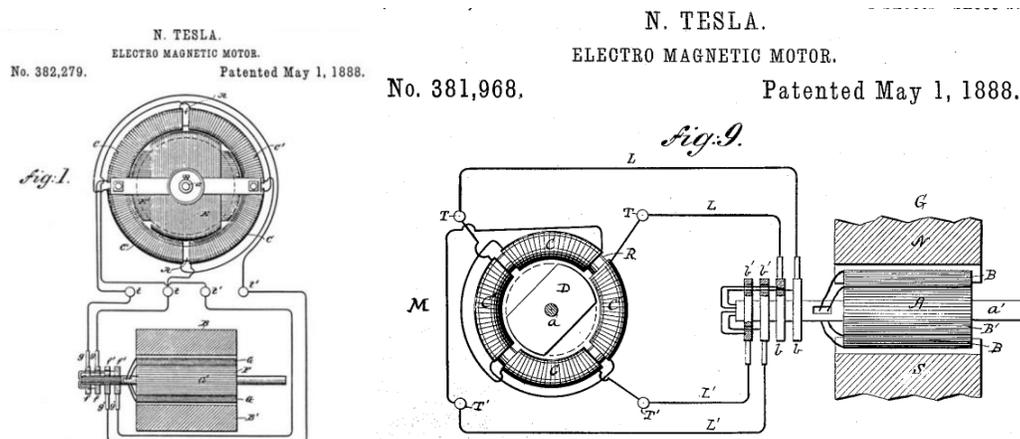
⁸ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/DMM_18206_Verteiltransformator_Gaulard_und_Gibbs.jpg

⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/File:DBZ_trafo.jpg

¹⁰ Tesla patent 382,279 Electro-magnetic motor. Acessível em <https://teslauniverse.com/nikola-tesla/patents/us-patent-382279-electro-magnetic-motor>

¹¹ Tesla patent 381,968 Electro-magnetic motor. Acessível em <https://teslauniverse.com/nikola-tesla/patents/us-patent-381968-electro-magnetic-motor>

¹² Tesla, N., “Motor Eletromagnético”, Tradução de Igor Kopcak, Ateliê Tipográfico, Universidade Federal de Goiás, 2016.



Ilustrações dos pedidos de patente do motor de indução (à esq.) e do motor de relutância variável (à dir.).

Outro nome importante, Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky¹³ é considerado o criador do sistema trifásico e um dos desenvolvedores do motor de indução, de maneira independente dos trabalhos de Tesla. Foi o inventor do transformador trifásico e do motor de indução em curto-circuito (gaiola de esquilo)¹⁴. Desenvolveu os estudos pioneiros relacionados às conexões delta-estrela. O êxito do sistema trifásico foi exibido na Europa na Exposição Eletrotécnica Internacional de 1891, onde Dolivo-Dobrovolsky usou este sistema para transmitir energia elétrica, em 40 Hz e 15 kV, a uma distância de 176 km entre Lauffen, local da primeira usina hidrelétrica trifásica, e Frankfurt, local da exposição. O sistema apresentou eficiência de 75%. Os primeiros motores de indução trifásicos com rotor em gaiola apresentavam baixo torque de partida, o que Dolivo-Dobrovolsky solucionou com a inclusão de resistências externas conectadas ao rotor por meio de anéis coletores. Seu trabalho pode ser considerado definitivo para a vitória do sistema CA sobre o CC na chamada “guerra das correntes”¹⁵.

As vantagens do uso de CA para transmissão e distribuição de energia elétrica fizeram desta tecnologia a responsável pela formidável expansão da eletrificação a partir do final do século XIX.

O funcionamento dos motores CA em velocidade constante, no entanto, impedia seu uso em aplicações veiculares (trens, bondes, etc.) ou alguns processos industriais, como laminadoras. Nestas aplicações, o motor CC mantinha seu predomínio, já que facilmente se alterava sua velocidade, mantendo a necessidade de fornecimento de energia em corrente contínua, em potências relativamente elevadas.



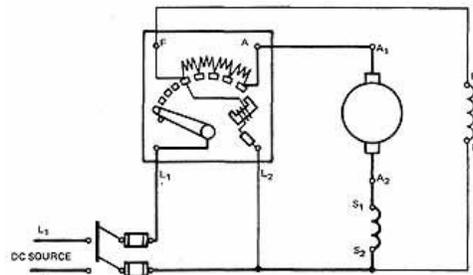
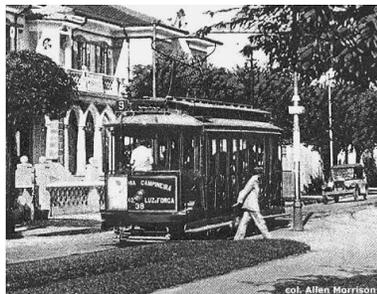
Dolivo-Dobrovolsky e as instalações pioneiras da hidrelétrica em Lauffen, Alemanha, no rio Neckar (1891). O gerador de à esquerda e o transformador à direita.

¹³ https://en.wikipedia.org/wiki/Mikhail_Dolivo-Dobrovolsky

¹⁴ <https://www.mpoweruk.com/history.htm>

¹⁵ <https://edisontechcenter.org/LauffenFrankfurt.html>

Os sistemas de transmissão de energia em CC assumiram valores compatíveis com as aplicações de transporte: 600 V em uso urbano (bondes), 1,5 kV em uso ferroviário (vias isoladas). Alguns sistemas de transmissão com tensão mais elevada foram testados no final do século XIX, fazendo uso de associações série de geradores e de cargas. As limitações técnicas de tal solução, combinadas com a rápida implantação de sistemas CA, manteve a alimentação CC limitada aos sistemas de transporte.



Bonde elétrico em Campinas ¹⁶ e controle reostático de velocidade.

O início da eletrônica

No início do século XX, a partir de experimentos realizados por Edison, que introduziu um eletrodo com potencial positivo em sua lâmpada de filamento para evitar que houvesse deposição de material no bulbo, Ambrose Fleming ¹⁷ identificou a capacidade de este dispositivo atuar como retificador. Ou seja, converter uma alimentação CA em CC. Uma vez que a produção de eletricidade já se faz em CA, essa invenção possibilitou o processamento da energia elétrica de forma a se adequar às cargas CC.

Foram também desenvolvidos outros dispositivos retificadores, como as válvulas a arco de mercúrio ¹⁸, mais adequadas a aplicações de potência elevada, devido à maior capacidade de corrente devido ao plasma criado pelo arco. Seu uso permitiu substituir os grupos motores-geradores para produção de corrente contínua necessária aos sistemas de tração ¹⁹.

Nos anos 1920 surgiu a Thyatron ²⁰, que tem seu interior ocupado por algum gás, responsável por ampliar a quantidade de íons e a capacidade de condução de corrente. Seu comportamento é o de um interruptor acionado por um terminal de disparo. Com este dispositivo foi possível aprimorar os processos alimentados em CC, pois viabilizou o ajuste do valor da tensão e/ou corrente por uma retificação controlada.



Ambrose Fleming e o Diodo à vácuo²¹, Thyatron a vapor de mercúrio, utilizada até 1950 ²²

¹⁶ A CCTLF inaugurou seu sistema de bondes elétricos com bitola métrica em 24 de junho de 1912. O cartão postal mostra o veículo 38 na Avenida Andrade Neves em 1920. <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=470828>

¹⁷ http://www.radio-electronics.com/info/radio_history/valve/hov.php

¹⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_arc_valve

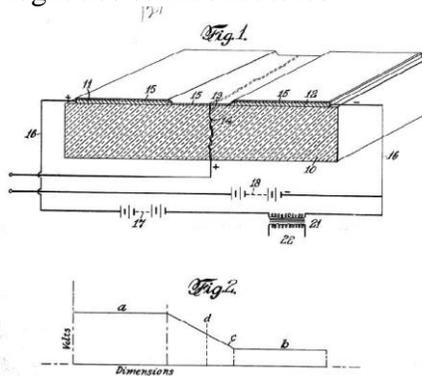
¹⁹ Frank Dittmann, "The development of power electronics in Europe", acessível em www.ieee.org/wiki/images/a/a7/DITTMANN.pdf

²⁰ <http://en.wikipedia.org/wiki/Thyatron>

²¹ <http://www.r-type.org/pics/aag0010.jpg>

²² <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thyatron-Mercure.JPG>

Em 1925 fora registrada uma patente (concedida em 1930 a Julius Edgard Lilienfeld, reproduzida a seguir) que se referia a “um método e um dispositivo para controlar o fluxo de uma corrente elétrica entre dois terminais de um sólido condutor”. Tal patente, que pode ser considerada a precursora do que viriam a ser os Transistores de Efeito de Campo de Junção (JFET), no entanto, não redundou em um componente prático, uma vez que não havia, então, tecnologia que permitisse a construção do dispositivo, nem havia material com a condição de condutividade necessária ao funcionamento do dispositivo. Isto se modificou a partir do final da década de 40, com a nova tecnologia dos semicondutores.



Julius Edgard Lilienfeld e desenhos de sua patente do que viria a ser, décadas depois, um JFET²³

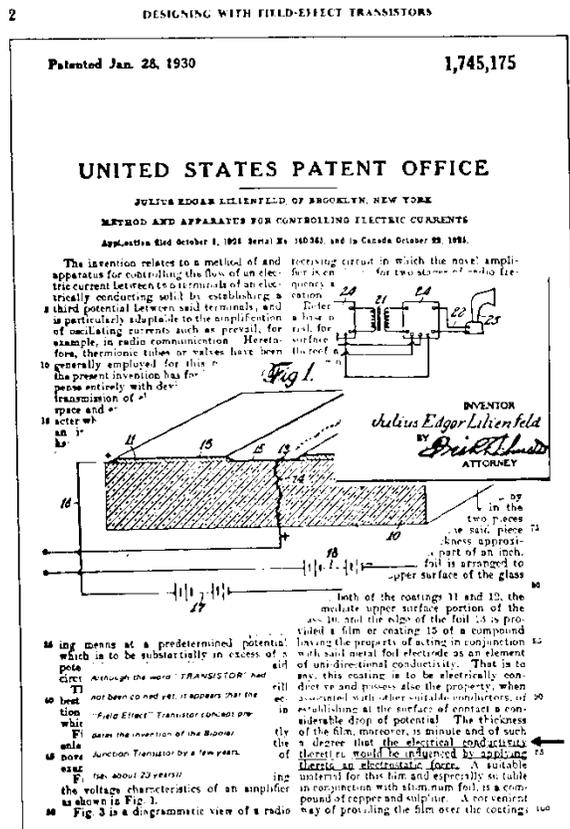


FIGURE 1-1 “FET” patent predates the bipolar transistor patent by nearly 20 years!

Patente de dispositivo que apresenta o princípio de funcionamento dos transistores de efeito de campo.

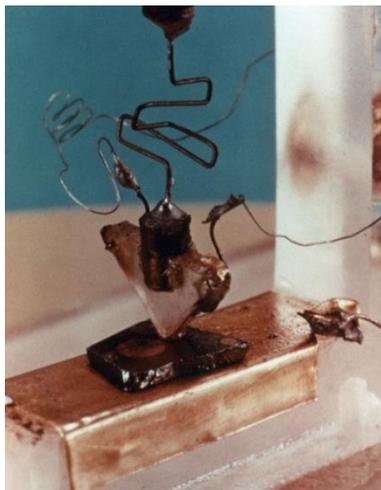
²³ M. Guarnieri, “Trailblazers in Solid-State Electronics”, IEEE Industrial Electronics Magazine, December 2011, pp.

Da eletrônica de estado sólido à Eletrônica de Potência

Em 1947²⁴ John Bardeen e Walter Brattain, que trabalhavam no Bell Telephone Laboratories, estudavam o comportamento de elétrons na interface entre um metal e um semicondutor. Ao fazer dois contatos muito próximos um do outro, criaram um dispositivo de três terminais com capacidade de amplificação. Bardeen e Brattain receberam o Prêmio Nobel de Física de 1956, juntamente com William Shockley, "por suas pesquisas em semicondutores e descoberta do efeito transistor". Shockley tinha desenvolvido um transistor de junção, que foi construído em camadas finas de diferentes tipos de material semicondutor.

Tais descobertas levaram a um enorme esforço de pesquisa em dispositivos eletrônicos de estado sólido. Ao longo dos anos 50²⁵ os trabalhos se concentraram na substituição do germânio pelo silício como elemento sobre o qual se construir os dispositivos semicondutores. As propriedades do silício são muito superiores às do germânio (no que tange à realização de tais dispositivos), permitindo obter maiores capacidades de bloqueio de tensão e de condução de corrente.

Os primeiros transistores tinham como aplicação principal a amplificação de sinais. Embora muito mais eficientes do ponto de vista energético em comparação com as válvulas, a aplicação em potências elevadas não era possível.



Reprodução do primeiro transistor
<http://blog.makezine.com/HR-1stTransistor.jpg>

O alto rendimento exigido no processamento da energia elétrica faz com que os dispositivos devam atuar como interruptor quando, idealmente, não dissipam potência, pois apresentam ou tensão nula (quando conduzem) ou corrente nula (quando abertos). A transição de um estado a outro, idealmente, deve ser instantânea.

O primeiro dispositivo de estado sólido, que marca o nascimento do campo tecnológico a que denominamos Eletrônica de Potência foi o SCR (Retificador Controlado de Silício), denominação dada pela General Electric, em 1958^{26,27}. Tratava-se de um dispositivo com o mesmo comportamento biestável da thyatron. Por tal razão, a denominação que se estabeleceu para o componente foi Tiristor.

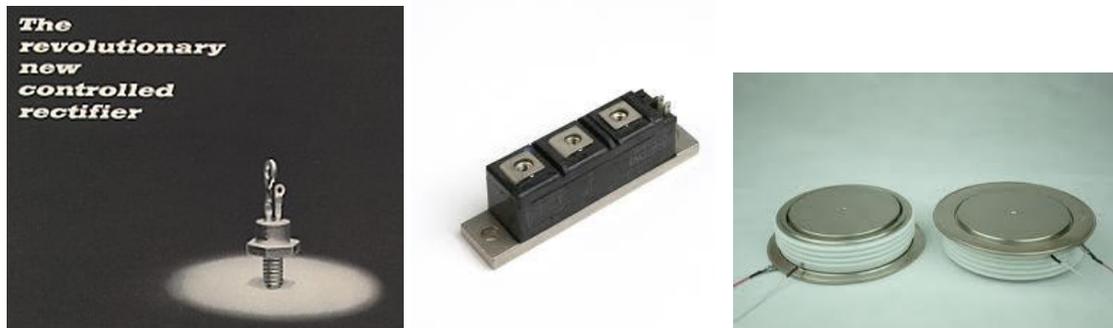
²⁴ <http://nobelprize.org/educational/physics/transistor/history/>

²⁵ <http://www.ti.com/corp/docs/company/history/timeline/popup.htm>

²⁶ Wilson, T.G. "The Evolution of Power Electronics", IEEE Transactions on Power Electronics, **Volume:** 15 Issue:3, May 2000, **page(s):** 439 - 446

²⁷ Masao Yano, Shigeru Abe, Eiichi Ohno, "History of Power Electronics for Motor Drives in Japan", acessível em www.ieeeeghn.org/wiki/images/4/49/Yano2.pdf

O domínio sobre os processos de purificação do silício, aliado ao aprofundamento dos conhecimentos sobre os fenômenos da física do estado sólido e dos processos microeletrônicos permitiu ao longo dos anos 60 e 70 o aumento na capacidade de controle de potência dos tiristores, atingindo valores na faixa de MVA.



Publicidade do primeiro SCR (Tiristor) pela GE²⁸ e dispositivos modernos

Não houve, naquela fase, o desenvolvimento de novas aplicações, mas a substituição de dispositivos a vácuo/gás ou eletromecânicos pelos tiristores, com ganhos de rendimento e de desempenho, principalmente como retificador (conversor CA-CC) no acionamento de motores CC.

Em sistemas com alimentação CC, como em trens e tróleibus, o uso dos tiristores enfrentou dificuldades, dada a incapacidade de este dispositivo ser desligado por ação do terminal de comando (*gate*). Foram desenvolvidas estratégias para possibilitar tal tipo de aplicação. São do início dos anos 60 os circuitos de comutação idealizados por William McMurray²⁹ que permitiam o uso do tiristor em CC, bem como a obtenção de uma saída CA a partir da entrada CC. Tais conversores visavam a substituição de motores CC por motores de indução em aplicações de velocidade variável. No entanto a complexidade dos circuitos e problemas de confiabilidade restringiram fortemente as aplicações. A primeira aplicação ferroviária de um conversor eletrônico de potência ocorreu no Japão em 1969, com o controle do enrolamento de campo (por meio de conversor CC-CC) dos motores CC de tração. O uso de motor de indução nesta aplicação ocorreu em 1982. No Brasil, a modernização dos transportes aconteceu a partir dos sistemas metroviários no final dos anos 70.

As técnicas de comutação forçada de tiristores caíram em desuso nos anos 80 com o desenvolvimento do GTO (Gate Turn-Off thyristor), que permitia tanto o disparo quando o bloqueio controlado. Os GTOs dominaram as aplicações de tração com alimentação CC até o final do século XX, quando foram substituídos por componentes mais modernos.

Outro campo que se beneficiou do desenvolvimento dos tiristores foi o sistema de transmissão de energia elétrica por meio de linhas em corrente contínua de alta tensão, envolvendo retificadores e inversores. A instalação do sistema CC para trazer energia da parte paraguaia de Itaipú (gerada em 50 Hz) até o sudeste do Brasil (onde se converte em 60 Hz) ocorreu nos anos 80. Ainda na área do sistema elétrico, surgiram dispositivos de compensação, como os reatores controlados a tiristor (RCT) ou o TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator), instalado no início deste século na interligação dos sistemas norte (Tucuruí) ao sistema sul-sudeste³⁰.

²⁸ <https://sites.google.com/site/transistorhistory/Home/us-semiconductor-manufacturers/general-electric-history>

²⁹ W. McMurray, "SCR Inverter Commutated by an Auxiliary Impulse," IEEE Trans. on Communication and Electronics, Vol. 83, p.824, 1964.

³⁰ C. Gama, L. Ängquist, G. Ingeström, and M. Noroozian, "Commissioning and operative experience of TCSC for damping power oscillation in the Brazilian north-south interconnection," in Proc. CIGRE Session 2000, Paper 14-104, Paris, France, 2000.



Transportes eletrificados modernos tipicamente usam motores CA acionados por inversores.



Conjunto de tiristores formando uma válvula no sistema retificador de Itaipu

[http://www04.abb.com/global/gad/gad02007.nsf/Images/5824B8312CF6E9C5C1256EBD00523B4F/\\$File/L36541_720.jpg](http://www04.abb.com/global/gad/gad02007.nsf/Images/5824B8312CF6E9C5C1256EBD00523B4F/$File/L36541_720.jpg)

O elevado ganho de rendimento obtido com os tiristores, em comparação com as soluções anteriores, não veio acompanhado de aumento na densidade de potência dos conversores, uma vez que os dispositivos continuavam a operar em 50/60 Hz. Apenas quando houve disponibilidade de transistores de potência com capacidade de comutar na faixa de dezenas ou centenas de kHz tornou possível uma grande redução no volume dos transformadores, indutores e capacitores utilizados nos conversores, minimizando o espaço requerido pelas fontes de alimentação dos equipamentos.

Ao longo dos anos 60 e 70 as aplicações eletrônicas, principalmente na área de computação, cresceram vertiginosamente. O suprimento de energia para sistemas espaciais, computadores, bem como para uso residencial e comercial, como reatores para lâmpadas fluorescentes e televisores, exigiam soluções mais eficientes, leves e compactas. Nesta direção, houve grande evolução dos transistores, não para operar como amplificador (na região ativa) mas para funcionar como interruptor.

Diferentemente dos tiristores que, por seu modo de funcionamento se adequam à alimentação CA, os transistores têm sua melhor aplicação a partir de fontes CC. Ao desenvolvimento dos transistores bipolares de potência somou-se a evolução dos transistores de efeito de campo, principalmente o MOSFET (Metal-Oxide Silicon Field Effect Transistor), resultando, no final dos anos 80 no surgimento do IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Em níveis crescentes de tensão e corrente, permitindo alimentar cargas na faixa de MVA, as fontes chaveadas e os inversores (conversores alimentados em CC) tiveram um enorme desenvolvimento em termos de desempenho e confiabilidade.

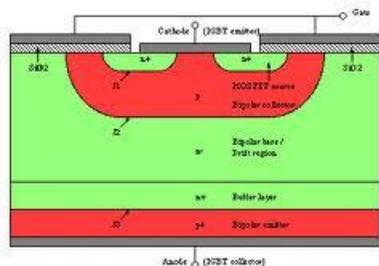


Fig. 1: A typical IGBT structure



Estrutura interna e moderno dispositivo (Semikron)

O sucesso dos inversores, ao permitir o controle de velocidade dos motores de indução, a partir dos anos 90, praticamente eliminou o uso dos motores CC de escovas. É certo que ainda existem aplicações com tais motores, mas os processos de troca de equipamentos sempre apresentam vantagens para o uso dos motores CA associados aos inversores.



Fontes chaveadas e “ballasts” eletrônicos para lâmpadas fluorescentes

Outras estruturas de motores, como o motor de relutância variável, os motores de passo, os motores CC sem escovas (DC *brushless*) necessitam de um conversor eletrônico para seu funcionamento. Conjugasse, deste modo o desenvolvimento dos sistemas de acionamento ao de eletrônica de potência de maneira irreversível.

O direcionamento atual da Eletrônica de Potência tem sido em busca de processos de aproveitamento de energia mais ambientalmente adequados. Os usos de energia fotovoltaica, eólica, do hidrogênio, carecem de um processamento eletrônico para sua adequação às cargas.

Apesar dos imensos progressos da microeletrônica (já tendo se tornado nanoeletrônica), do ponto de vista dos dispositivos de potência, aparentemente se está no limite da capacidade do silício em termos de bloqueio de tensão e de condução de corrente. A quebra dos atuais limites destas grandezas, que permitiria ampliar as aplicações, depende do desenvolvimento de novos materiais semicondutores, como carbeto de silício, ou nitreto de gálio, capazes de ampliar o campo elétrico suportável, diminuir perdas, facilitar o fluxo do calor interno, etc.³¹. Quem sabe, daqui a uns 10 anos tenha-se um novo e importante capítulo nessa história.

³¹ MOHAN, UNDERLAND, ROBBINS “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, 2nd edition, John Wiley, 1994.



Sem Eletrônica de Potência não se aproveitam adequadamente as fontes limpas e renováveis de energia.

<http://keetsa.com/blog/wp-content/uploads/2009/02/solar-wind-power.jpg>

Noções sobre dispositivos semicondutores

Este texto apresenta, de forma resumida, as principais características dos dispositivos semicondutores de maior uso na construção de conversores eletrônicos de potência: diodos, tiristores, transistores MOSFET e IGBTs. Para informações detalhadas e aprofundamento, consultem a bibliografia.

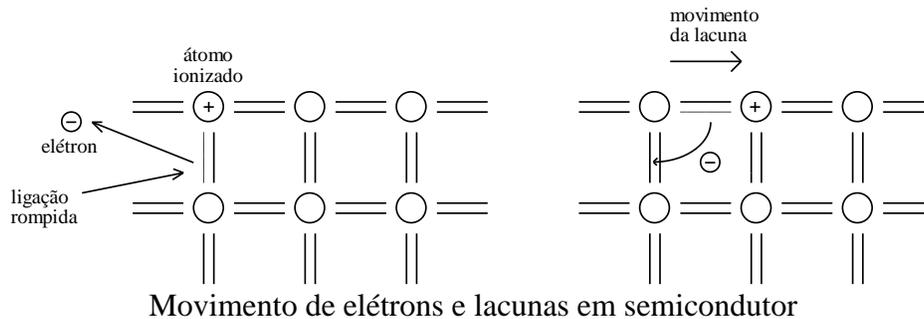
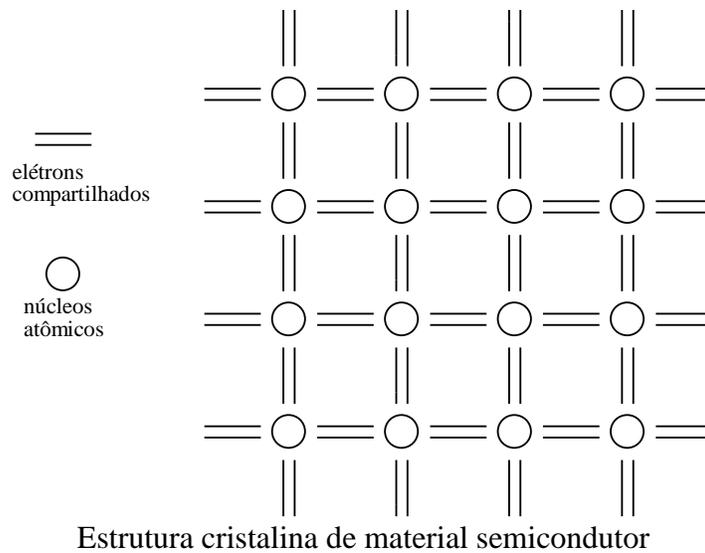
Breve Revisão da Física de Semicondutores

A passagem de corrente elétrica em um meio depende da aplicação de um campo elétrico e da existência de portadores livres (usualmente elétrons) neste meio. Em metais, como o cobre ou a prata, a densidade de portadores livres (elétrons) é da ordem de $10^{23}/\text{cm}^3$, enquanto nos materiais isolantes, como o quartzo ou o óxido de alumínio, o valor é da ordem de $10^3/\text{cm}^3$. Os chamados semicondutores, como o silício, têm densidades intermediárias, na faixa de 10^8 a $10^{19}/\text{cm}^3$. Nos condutores e nos isolantes, tais densidades são propriedades dos materiais. O mesmo vale para as estruturas cristalinas (puras) dos semicondutores.

Os portadores: elétrons e lacunas

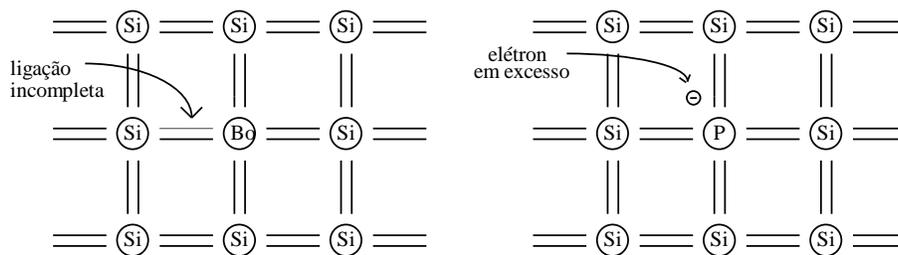
Átomos de materiais com quatro elétrons em sua camada mais externa (C, Ge, Si, etc.), ou ainda moléculas com a mesma propriedade, permitem o estabelecimento de ligações químicas muito estáveis, uma vez que, pelo compartilhamento dos elétrons externos com átomos vizinhos (ligação covalente), tem-se um arranjo com 8 elétrons na camada de valência, como ilustra a figura.

Em qualquer temperatura acima do zero absoluto (-273°C), algumas destas ligações são rompidas (ionização térmica), produzindo elétrons livres. O átomo que perde tal elétron se torna ionizado positivamente. Ocasionalmente um outro elétron também escapa de outra ligação e, atraído pela carga positiva do átomo ionizado, preenche a ligação covalente, cancelando a carga total. Desta maneira tem-se uma movimentação relativa da “carga positiva”, chamada de lacuna que, na verdade, é devida ao deslocamento dos elétrons que saem de suas ligações covalentes e vão ocupar outras.



Semicondutores dopados

Quando se faz a adição à estrutura dos semicondutores de átomos de materiais que possuam 3 (como o alumínio ou o boro) ou 5 elétrons (como o fósforo) em sua camada de valência, os átomos vizinhos a tal impureza terão suas ligações covalentes incompletas ou com excesso de elétrons.



Semicondutores dopados

As dopagens das impurezas ($10^{19}/\text{cm}^3$ ou menos), tipicamente são feitas em níveis muito menores que a densidade de átomos do material semicondutor ($10^{23}/\text{cm}^3$), de modo que as propriedades de ionização térmica não são afetadas.

Recombinação

Uma vez que a quantidade de portadores é determinada apenas por propriedades do material e pela temperatura, é necessário que exista algum mecanismo que faça a recombinação do excesso de portadores à medida que novos portadores são criados pela ionização térmica.

Tal mecanismo inclui tanto a recombinação propriamente dita de um elétron com uma lacuna em um átomo de Si, quanto a captura dos elétrons pela impureza ionizada ou, adicionalmente, por imperfeições na estrutura cristalina. Tais imperfeições fazem com que os átomos adjacentes não necessitem realizar quatro ligações covalentes.

Pode-se definir o “tempo de vida” de um portador como o tempo médio necessário para que o elétron ou a lacuna sejam “neutralizados” pela consecução de uma ligação covalente. Em muitos casos pode-se considerar o “tempo de vida” de um portador como uma constante do material. No entanto, especialmente nos semicondutores de potência, esta não é uma boa simplificação.

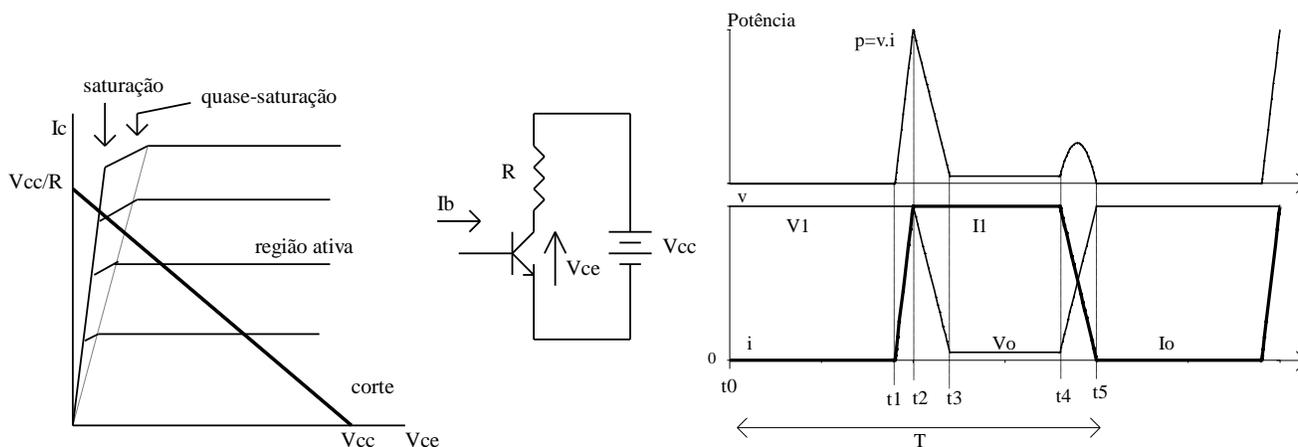
Correntes de deriva e de difusão

Quando um campo elétrico for aplicado em um material semiconductor, as lacunas se movimentarão no sentido do campo decrescente, enquanto os elétrons seguirão em sentido oposto. Esta corrente depende de um parâmetro denominado “mobilidade”, a qual varia com o material e tipo de portador. A mobilidade dos elétrons é aproximadamente 3 vezes maior do que a das lacunas para o Si em temperatura ambiente. A mobilidade diminui aproximadamente com o quadrado do aumento da temperatura.

Outro fator de movimentação de portadores é por “difusão”, quando existem regiões adjacentes em que há diferentes concentrações de portadores. O movimento aleatório dos portadores tende a equalizar sua dispersão pelo meio, de modo que tende a haver uma migração de portadores das regiões mais concentradas para as mais dispersas.

As limitações dos dispositivos

Como se verá na sequência do curso, por simplicidade de análise, muitas vezes os interruptores de potência serão considerados como chaves ideais. Isso significa que quando desligados a corrente por eles é zero. Quando em condução, a queda de tensão é nula. As transições entre os estados ligado e desligado são instantâneas. Nestas três situações idealizadas, não ocorre dissipação de energia no dispositivo. No entanto, nenhuma delas é verdadeira.



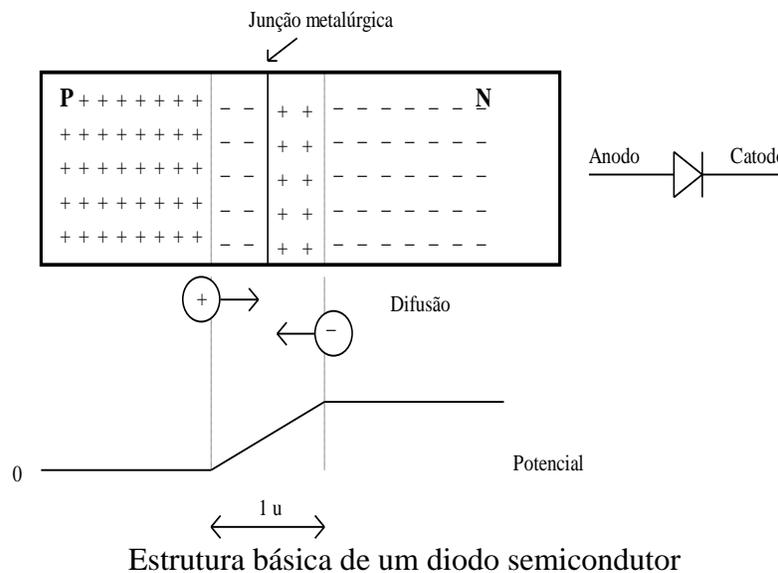
Comutação de transistor bipolar atravessando a região ativa (carga resistiva). Exemplo de sinais de tensão, corrente e potência para cálculo de potência média dissipada

A energia dissipada leva a uma elevação da temperatura interna do componente, o qual tem definida uma “máxima temperatura de junção”, abaixo da qual se garante que o dispositivo tem capacidade de suportar a tensão especificada (no estado bloqueado) e conduzir a corrente nominal. Operar acima de tal temperatura implica em uma rápida redução na capacidade de bloqueio o que conduz à falha do componente.

Para os componentes de silício, a temperatura estabelecida pelos fabricantes está entre 120 e 150°C. Para que o dispositivo não a ultrapasse são utilizados sistemas de dissipação de calor por meio do aumento da superfície de troca com o ambiente (normalmente placas ou blocos metálicos que fazem o contato entre o encapsulamento do dispositivo e o ar circundante). Em casos de maior potência, se faz uso de circulação forçada de ar ou até do uso de líquidos refrigerantes, para aumentar a capacidade de extração da energia dissipada, sem que a temperatura da junção se eleve em demasia.

Diodos de Potência

Um diodo semicondutor é uma estrutura P-N que, dentro de seus limites de tensão e de corrente, permite a passagem de corrente em um único sentido. Detalhes de funcionamento, em geral desprezados para diodos de sinal, podem ser significativos para componentes de maior potência, caracterizados por uma maior área (para permitir maiores correntes) e maior comprimento (a fim de suportar tensões mais elevadas). A figura 1.4 mostra, simplificadamente, a estrutura interna de um diodo.



Aplicando-se uma tensão entre as regiões P e N, a diferença de potencial aparecerá na região de transição, uma vez que a resistência desta parte do semicondutor é muito maior que a do restante do componente (devido à concentração de portadores).

Quando se polariza reversamente um diodo, ou seja, aplica-se uma tensão negativa no anodo - região P - e positiva no catodo - região N, mais portadores positivos (lacunas) migram para o lado N, e vice-versa, de modo que a largura da região de transição aumenta, elevando a barreira de potencial.

Por difusão ou efeito térmico, certa quantidade de portadores minoritários penetra na região de transição. São, então, acelerados pelo campo elétrico, indo até a outra região neutra do dispositivo. Esta corrente reversa independe da tensão reversa aplicada, variando, basicamente, com a temperatura.

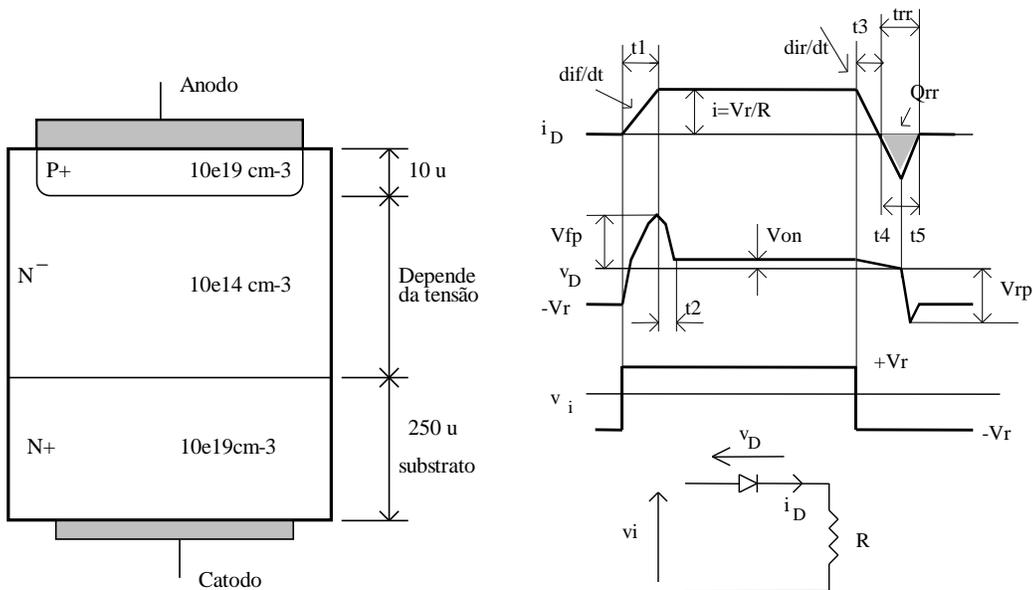
Se o campo elétrico na região de transição for muito intenso, os portadores em trânsito obterão grande velocidade e, ao se chocarem com átomos da estrutura, produzirão novos portadores, os quais, também acelerados, produzirão um efeito de avalanche. Dado o aumento na corrente, sem redução significativa na tensão na junção, produz-se um pico de potência que destrói o componente.

Uma polarização direta leva ao estreitamento da região de transição e à redução da barreira de potencial. Quando a tensão superar o valor da barreira, cerca de 0,7 V para diodos de Si, os elétrons do lado N serão atraídos pelo potencial positivo do anodo e vice-versa, levando o componente à condução.

Na estrutura interna de um diodo de potência existe uma região N intermediária, com baixa dopagem. O papel desta região é permitir ao componente suportar tensões mais elevadas, pois tornará menor o campo elétrico na região de transição (que será mais larga, para manter o equilíbrio de carga). Esta região de baixa dopagem resulta uma significativa característica resistiva quando em condução, tão mais significativa quanto maior for a tensão suportável pelo componente. As camadas que fazem os contatos externos são altamente dopadas, a fim de fazer com que se obtenha um contato com característica ôhmica.

No estado bloqueado, pode-se analisar a região de transição como um capacitor, cuja carga é aquela presente na própria região de transição. Na condução não existe tal carga, no entanto, devido à alta dopagem da camada P+, por difusão, existe uma penetração de lacunas na região N-. Além disso, à medida que cresce a corrente, mais lacunas são injetadas na região N-, fazendo com que elétrons venham da região N+ para manter a neutralidade de carga. Desta forma, cria-se uma carga espacial no catodo, a qual terá que ser removida (ou se recombinar) para permitir a passagem para o estado bloqueado.

O comportamento dinâmico de um diodo de potência é, na verdade, muito diferente do de uma chave ideal. Suponha-se que se aplica uma tensão v_i ao diodo, alimentando uma carga resistiva (cargas diferentes poderão alterar alguns aspectos da forma de onda).

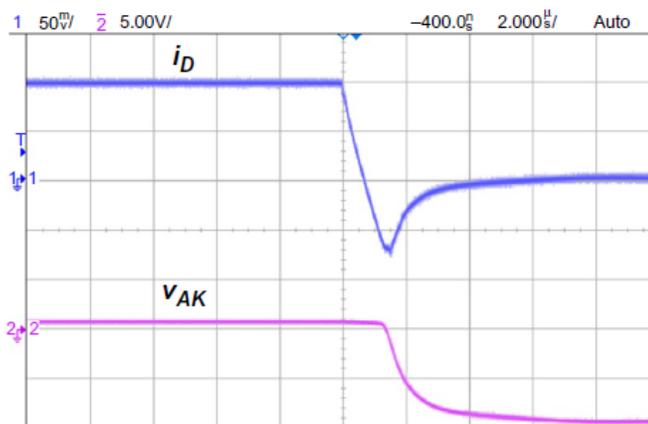


Estrutura típica de diodo de potência e formas de onda típicas de comutação de diodo de potência.

Durante o intervalo t_1 , remove-se a carga acumulada na região de transição. Como ainda não houve significativa injeção de portadores, a resistência da região N- é elevada, produzindo um pico de tensão. Indutâncias parasitas do componente e das conexões também colaboram com a sobretensão. Durante t_2 tem-se a chegada dos portadores e a redução da tensão para cerca de 1 V. Estes tempos são, tipicamente, da ordem de centenas de ns.

No desligamento, a carga espacial presente na região N- deve ser removida antes que se possa reiniciar a formação da barreira de potencial na junção. Enquanto houver portadores transitando, o diodo se mantém em condução. A redução em V_{on} se deve à diminuição da queda ôhmica. Quando a corrente atinge seu pico negativo é que foi retirado o excesso de portadores, iniciando-se, então, o bloqueio do diodo. A taxa de variação da corrente, associada às indutâncias do circuito, provoca uma sobretensão negativa.

Diodos rápidos possuem t_{rr} inferior a microssegundo, enquanto nos diodos para uso em baixa frequência esse tempo é de dezenas de microssegundos.



Resultados experimentais das comutações de diodo

O Tiristor

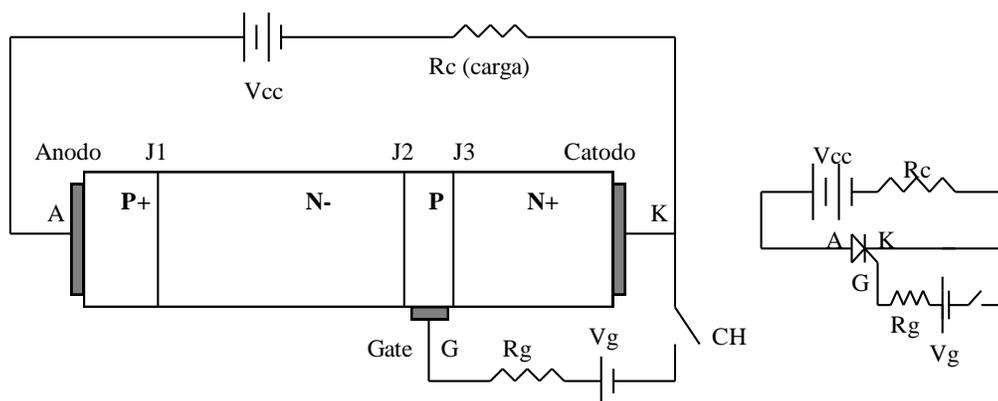
O nome tiristor engloba uma família de dispositivos semicondutores que operam em regime chaveado, tendo em comum uma estrutura de 4 camadas semicondutoras numa sequência p-n-p-n, apresentando um funcionamento biestável.

O tiristor de uso mais difundido é o SCR (Retificador Controlado de Silício), usualmente chamado simplesmente de tiristor. Outros componentes, no entanto, possuem basicamente a mesma estrutura: LASCR ou LTT (tiristor ativado por luz), TRIAC (tiristor triodo bidirecional), DIAC (tiristor diodo bidirecional), GTO (tiristor comutável pela porta), IGCT (Tiristor controlado com *gate* isolado).

Princípio de funcionamento

O tiristor é formado por quatro camadas semicondutoras, alternadamente p-n-p-n, possuindo 3 terminais: *anodo* e *catodo*, pelos quais flui a corrente, e a *porta* (ou *gate*) que, a uma injeção de corrente, faz com que se estabeleça a corrente anódica. A figura ilustra uma estrutura simplificada do dispositivo.

Se entre anodo e catodo tivermos uma tensão positiva, as junções J1 e J3 estarão diretamente polarizadas, enquanto a junção J2 estará reversamente polarizada. Não haverá condução de corrente até que a tensão V_{ak} se eleve a um valor que provoque a ruptura da barreira de potencial em J2.



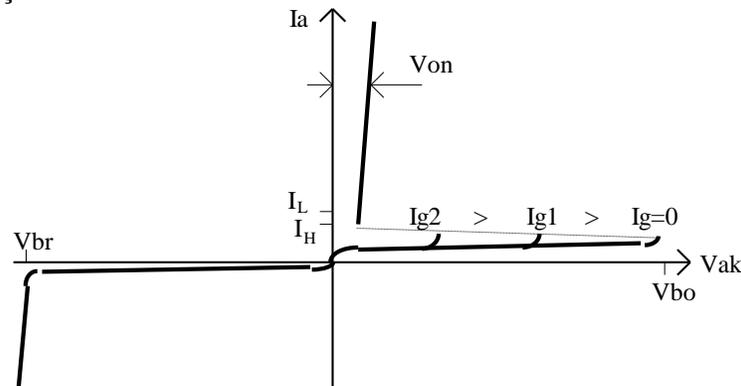
Funcionamento básico do tiristor

Se houver uma tensão V_{gk} positiva, circulará uma corrente através de J3, com portadores negativos indo do catodo para a porta. Por construção, a camada P ligada à porta é suficientemente estreita para que parte dos elétrons que cruza J3 possua energia cinética suficiente para vencer a barreira de potencial

existente em J2, sendo então atraídos pelo anodo. Desta forma, a junção reversamente polarizada tem sua diferença de potencial diminuída e estabelece-se uma corrente entre anodo e catodo, que poderá persistir mesmo na ausência da corrente de porta.

O componente se manterá em condução desde que, após o processo dinâmico de entrada em condução, a corrente de anodo tenha atingido um valor superior ao limite I_L , chamado de corrente de "latching". Para que o tiristor deixe de conduzir é necessário que a corrente por ele caia abaixo do valor mínimo de manutenção (I_H), permitindo que se restabeleça a barreira de potencial em J2.

Quando a tensão V_{ak} for negativa, J1 e J3 estarão reversamente polarizadas, enquanto J2 estará diretamente polarizada. Assim, o tiristor bloqueará o fluxo de portadores enquanto não for superada a tensão de ruptura das duas junções.



Característica estática do tiristor.

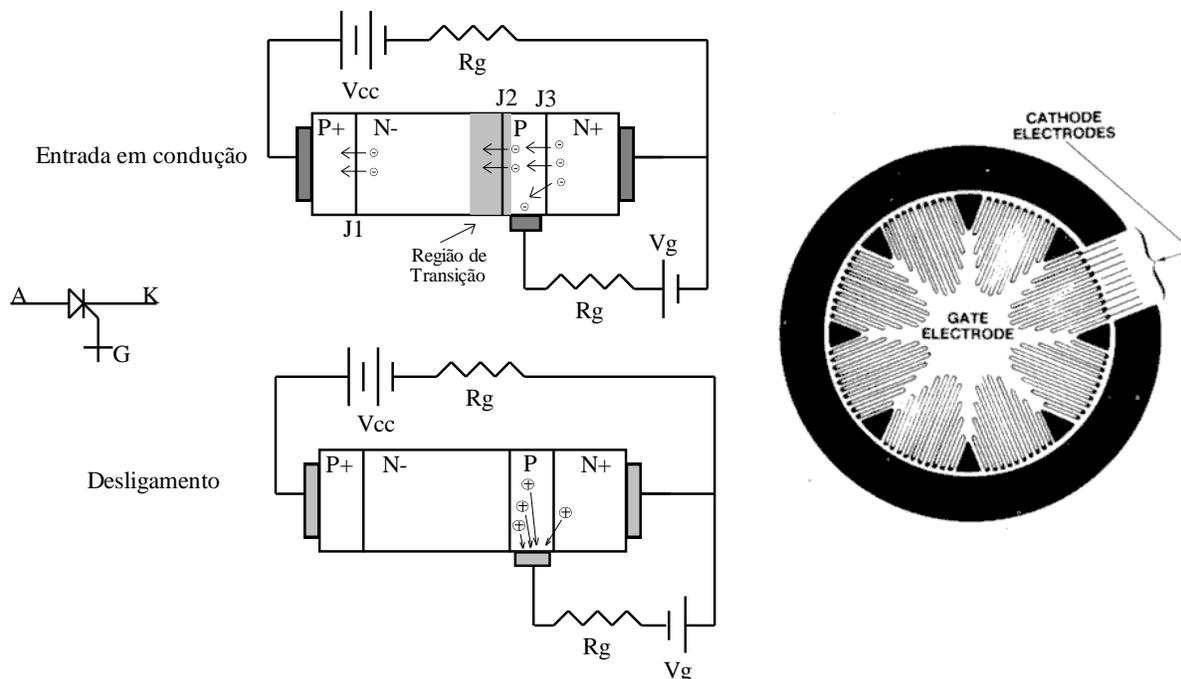
GTO - Gate Turn-Off Thyristor

O GTO, embora tenha sido criado no início da década de 60, por problemas de fraco desempenho foi pouco utilizado. Com o avanço da tecnologia de construção de dispositivos semicondutores, novas soluções foram encontradas para aprimorar tais componentes, que hoje ocupam significativa faixa de aplicação, especialmente naquelas de elevada potência, uma vez que estão disponíveis dispositivos para 5000V, 4000A.

Princípio de funcionamento

O GTO possui uma estrutura de 4 camadas, típica dos componentes da família dos tiristores. Sua característica principal é sua capacidade de entrar em condução e bloquear através de comandos adequados no terminal de *gate*. Seu desenvolvimento ocorreu com a evolução das tecnologias de semicondutores

O mecanismo de disparo é igual ao do SCR. Para o desligamento, a forte interdigitação da região do gate com a do catodo permite que uma elevada corrente negativa de *gate* seja capaz de levar a corrente de anodo a um valor inferior à corrente I_H , levando o GTO ao desligamento forçado. Aparentemente seria possível tal comportamento também no SCR. As diferenças, no entanto, estão no nível da construção do componente. Dada a complexidade do circuito de *gate* para o desligamento, normalmente os fabricantes fornecem os GTOs integrados com os respectivos *drivers*.



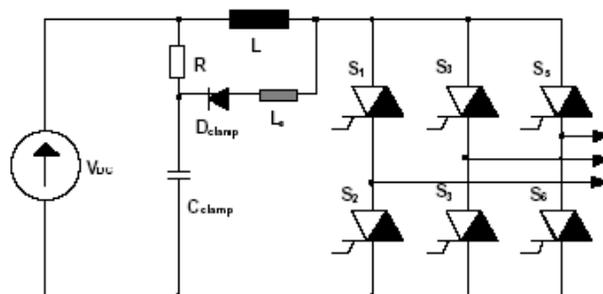
Símbolo, processos de comutação e estrutura interna de GTO.
 A figura do GTO foi obtida na AN-315, International Rectifier, 04/82.

IGCT

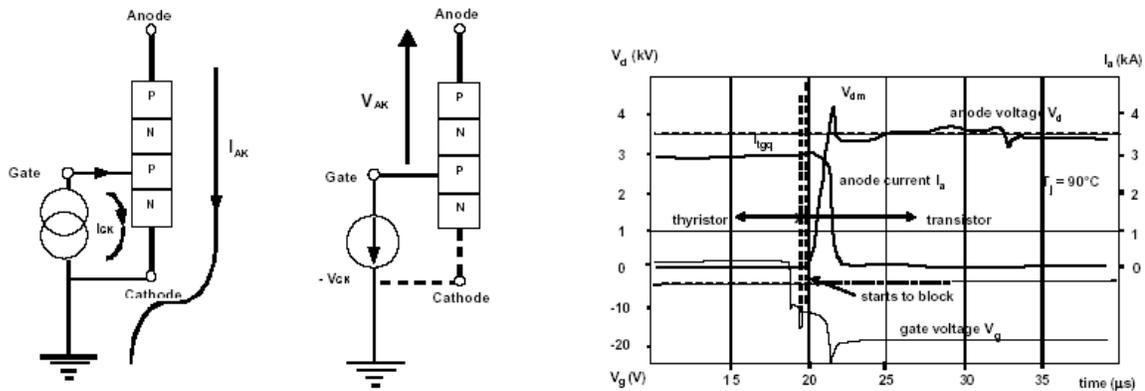
O IGCT é um dispositivo surgido no final da década de 90, capaz de comutação comandada para ligar e desligar, com aplicações em média e alta potência.

Além de algumas melhorias no projeto do dispositivo, a principal característica do IGCT, que lhe dá o nome, é a integração do circuito de comando junto ao dispositivo de potência. Tal implementação permite minimizar indutâncias, o que resulta na capacidade de desligamento rápida (da ordem de 1 μ s), e praticamente eliminando problemas de dv/dt típicos dos GTOs. Com isso, a ligação série destes componentes é muito facilitada.

A operação do IGCT no desligamento é feita com o desvio da totalidade da corrente de catodo pelo circuito de *gate*, enquanto aplica uma tensão negativa de *gate*.



IGCT e seu circuito de comando integrado ao dispositivo de potência e circuito de inversor com IGCT.



IGCT conduzindo, IGCT bloqueando e formas de onda no desligamento. (Figuras extraídas da referência Steimer, 2001)

Transistor Bipolar de Potência (TBP)

Os transistores bipolares foram os primeiros dispositivos de estado sólido criados. Inicialmente foram construídos em Germânio, mas como tal elemento apresenta grande variação de parâmetros com a temperatura, seu uso como componente de potência não era possível. Com a tecnologia de silício foi possível desenvolver os transistores bipolares de potência (TBP) que, de certa forma, permitiria a emergência de toda tecnologia de fontes chaveadas.

Com o surgimento dos transistores MOSFET e, posteriormente, dos IGBTs, não houve posteriores desenvolvimentos nos TBPs, de modo que seu desempenho, atualmente, é inferior aos dos outros transistores de potência. No entanto, continua-se a utilizar tal dispositivo, apenas em aplicações que não exijam maiores desempenhos em termos de perdas e velocidade, o que se deve ao seu custo menor em relação aos outros dispositivos.

Deve-se frisar, no entanto, que o uso de novos materiais (como se verá adiante), como SiC e GaN, o desenvolvimento de TBPs voltou à cena, com a expectativa de melhorias em relação aos atuais dispositivos de Si para aplicações de chaveamento de potências elevadas.

MOSFET

Princípio de funcionamento (canal N)

O terminal de *gate* é isolado do semiconductor por SiO_2 . A junção PN- define um diodo entre *Source* e *Drain*, o qual conduz quando $V_{ds} < 0$. A operação como transistor ocorre quando $V_{ds} > 0$.

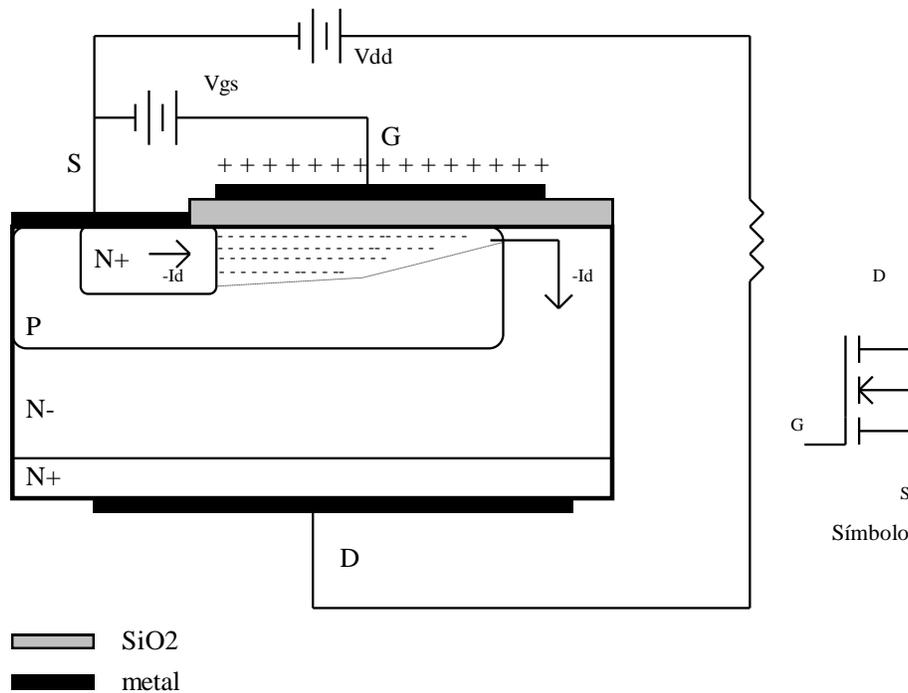


Figura 1.8 Estrutura básica de transistor MOSFET.

Quando uma tensão $V_{gs} > 0$ é aplicada, o potencial positivo no *gate* repele as lacunas na região P, deixando uma carga negativa, mas sem portadores livres. Quando esta tensão atinge certo limiar (V_{th}), elétrons livres (gerados principalmente por efeito térmico) presentes na região P são atraídos e formam um canal N dentro da região P, pelo qual se torna possível a passagem de corrente entre D e S. Elevando V_{gs} , mais portadores são atraídos, ampliando o canal, reduzindo sua resistência (R_{ds}), permitindo o aumento de I_d . Este comportamento caracteriza a chamada "região resistiva".

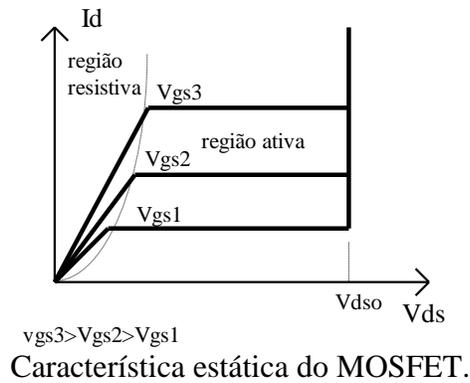
A passagem de I_d pelo canal produz uma queda de tensão que leva ao seu afunilamento, ou seja, o canal é mais largo na fronteira com a região N+ do que quando se liga à região N-. Um aumento de I_d leva a uma maior queda de tensão no canal e a um maior afunilamento, o que conduziria ao seu colapso e à extinção da corrente! Obviamente o fenômeno tende a um ponto de equilíbrio, no qual a corrente I_d se mantém constante para qualquer V_{ds} , caracterizando a região ativa do MOSFET.

Uma pequena corrente de *gate* é necessária apenas para carregar e descarregar as capacitâncias de entrada do transistor. A resistência de entrada é da ordem de 10^{12} ohms.

Estes transistores, em geral, são de canal N por apresentarem menores perdas e maior velocidade de comutação, devido à maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas.

A máxima tensão V_{ds} é determinada pela ruptura do diodo reverso. Os MOSFETs não apresentam segunda ruptura uma vez que a resistência do canal aumenta com o crescimento de I_d . Este fato facilita a associação em paralelo destes componentes.

A tensão V_{gs} é limitada a algumas dezenas de volts, por causa da capacidade de isolamento da camada de SiO_2 .



IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

O IGBT alia a facilidade de acionamento dos MOSFET com menores perdas em condução devido a uma mudança na estrutura do componente.

Princípio de funcionamento

A estrutura do IGBT é similar à do MOSFET, mas com a inclusão de uma camada P+ que forma o coletor do IGBT.

Em termos simplificados pode-se analisar o IGBT como um MOSFET no qual a região N- tem sua condutividade modulada pela injeção de portadores minoritários (lacunas), a partir da região P+, uma vez que J1 está diretamente polarizada. Esta maior condutividade produz uma menor queda de tensão em comparação a um MOSFET com mesma capacidade de bloqueio.

O controle de componente é análogo ao do MOSFET, ou seja, pela aplicação de uma polarização entre *gate* e emissor. Também para o IGBT o acionamento é feito por tensão.

A máxima tensão suportável é determinada pela junção J2 (polarização direta) e por J1 (polarização reversa). Como J1 divide duas regiões muito dopadas, conclui-se que um IGBT não suporta tensões elevadas quando polarizado reversamente.

Os IGBTs apresentam um tiristor parasita. A construção do dispositivo deve ser tal que evite o acionamento deste tiristor, especialmente devido às capacitâncias associadas à região P, a qual se relaciona à região do *gate* do tiristor parasita. Os modernos componentes não apresentam problemas relativos a este elemento indesejado.

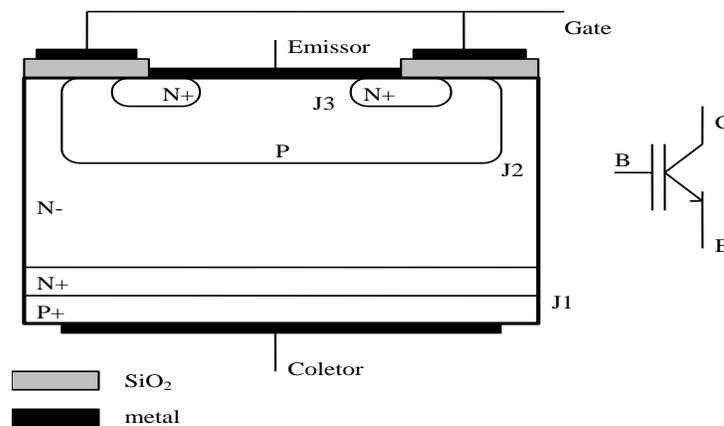


Figura 1.14 Estrutura básica de IGBT.

Alguns Critérios de Seleção para transistores de Si

Um primeiro critério é o dos limites de tensão e de corrente. Os MOSFET possuem uma faixa mais reduzida de valores, ficando, tipicamente entre: 100 V/200 A e 1000 V/20 A. Os MOSFET de baixa tensão de nova geração possuem resistência R_{ds} muito baixa, permitindo quedas de tensão menores do que as dos outros componentes.

Já os TBP e IGBT atingem potências mais elevadas, indo até 1200 V/500 A.

Como o acionamento do IGBT é muito mais fácil do que o do TBP, seu uso tem sido crescente, em detrimento dos TBP.

Outro importante critério para a seleção refere-se às perdas de potência no componente. Assim, em aplicações em alta frequência (acima de 50 kHz) devem ser utilizados MOSFETs. Em frequências mais baixas, qualquer dos três componentes pode responder satisfatoriamente.

No entanto, as perdas em condução dos TBPs e dos IGBTs são sensivelmente menores que as dos MOSFET de tensão elevada (na faixa de 400 a 1000 V).

Como regra básica no caso de diodos de silício:

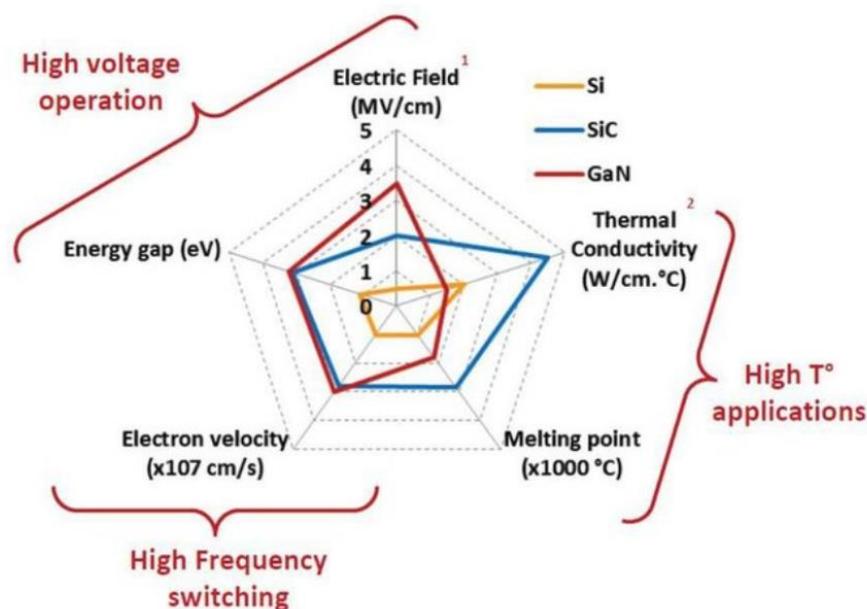
- em alta frequência: MOSFET
- em baixa tensão: MOSFET
- custo mínimo: TBP
- nos demais casos: IGBT

Materiais Emergentes

Silício ainda é o material hegemônico para a fabricação de componentes semicondutores de potência devido ao domínio da tecnologia e aos custos muito reduzidos.

Existem, no entanto, outros materiais com propriedades elétricas superiores, às do silício e que, crescentemente, apresentam redução do custo de produção. Em aplicações em que seja necessário, por exemplo, elevado nível de bloqueio de tensão, maior frequência de comutação com exigência de alta velocidade de chaveamento, ou ainda operação em temperatura elevada, pode ser inviável o uso dos atuais dispositivos de silício. Em tais aplicações, componentes produzidos com novos materiais, mesmo com custo mais elevado, podem ser a solução.

Arseneto de Gálio (GaAs), Nitreto de Gálio (GaN) e Carbeto de Silício (SiC) são os principais materiais emergentes.



Carbeto de Silício são materiais sobre os quais se fazem intensas pesquisas. O *gap* de energia é maior que o dobro do Si, permitindo operação em temperaturas elevadas. Adicionalmente apresenta elevada condutividade térmica (que é baixa nos componentes de GaAs), facilitando a dissipação do calor produzido no interior do semicondutor. Sua principal vantagem em relação tanto ao Si quanto ao GaAs é a intensidade de campo elétrico de ruptura, que é aumentada em uma ordem de grandeza.

A tabela I mostra propriedades de diversos materiais a partir das quais pode-se produzir dispositivos semicondutores de potência.

Outro material de interesse potencial é o diamante. Apresenta, dentre todos estes materiais, o maior *gap* de energia, a maior condutividade térmica e a maior intensidade de campo elétrico, além de elevada mobilidade de portadores. No entanto não existe ainda uma tecnologia para construção de "wafers" de monocristal de diamante. Os métodos existentes para produção de filmes finos levam a estruturas policristalinas. A difusão seletiva de dopantes e a realização de contatos ôhmicos ainda devem ser objeto de profundas pesquisas.

Uma análise pode ser feita comparando o impacto dos parâmetros mostrados na tabela I sobre algumas características de componentes (hipotéticos) construídos com tais materiais. As tabelas II a IV mostram as variações de alguns parâmetros. Tomem-se os valores do Si como referência. Estas informações foram obtidas em Mohan, Robbins e Undeland (1994).

Tabela I. Propriedades de materias semicondutores

Propriedade	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	Diamante
Gap de energia a 300K (eV)	1,12	1,43	2,2	2,9	5,5
Condutividade térmica (W/cm.C)	1,5	0,5	5,0	5,0	20
Mobilidade a 300K (cm ² /V.s)	1400	8500	1000	600	2200
Campo elétrico máximo (V/cm)	3.10 ⁵	4.10 ⁵	4.10 ⁶	4.10 ⁶	1.10 ⁷
Temperatura de fusão (°C) * Diamante → grafite	1415	1238	Sublima >> 1800	Sublima >>1800	Muda de fase 2200*

Nota-se (tabela II) que as resistências da região de deriva são fortemente influenciadas pelos materiais. Estes valores são determinados considerando as grandezas indicadas na tabela I. A resistência de um componente de diamante teria, assim, um valor cerca de 30000 vezes menor do que se tem hoje num componente de Si. O impacto sobre a redução das perdas de condução é óbvio.

Tabela II Resistência ôhmica da região de deriva

Material	Si	GaAs	SiC	Diamante
Resistência relativa	1	6,4.10 ⁻²	9,6.10 ⁻³	3,7.10 ⁻⁵

Na tabela III tem-se, para um dispositivo que deve suportar 1 kV, as necessidades de dopagem e o comprimento da região de deriva. Nota-se também aqui que os novos materiais permitirão uma redução drástica no comprimento dos dispositivos, implicando numa menor quantidade de material, embora isso não necessariamente tenha impacto sobre o custo. Um dispositivo de diamante seria, em princípio, capaz de suportar 1 kV com uma dopagem elevada na região de deriva e num comprimento de apenas 2 µm, ou seja, 50 vezes menos que um componente equivalente de Si.

Tabela III Dopagem e comprimento da região de deriva necessário para uma junção abrupta de 1 kV

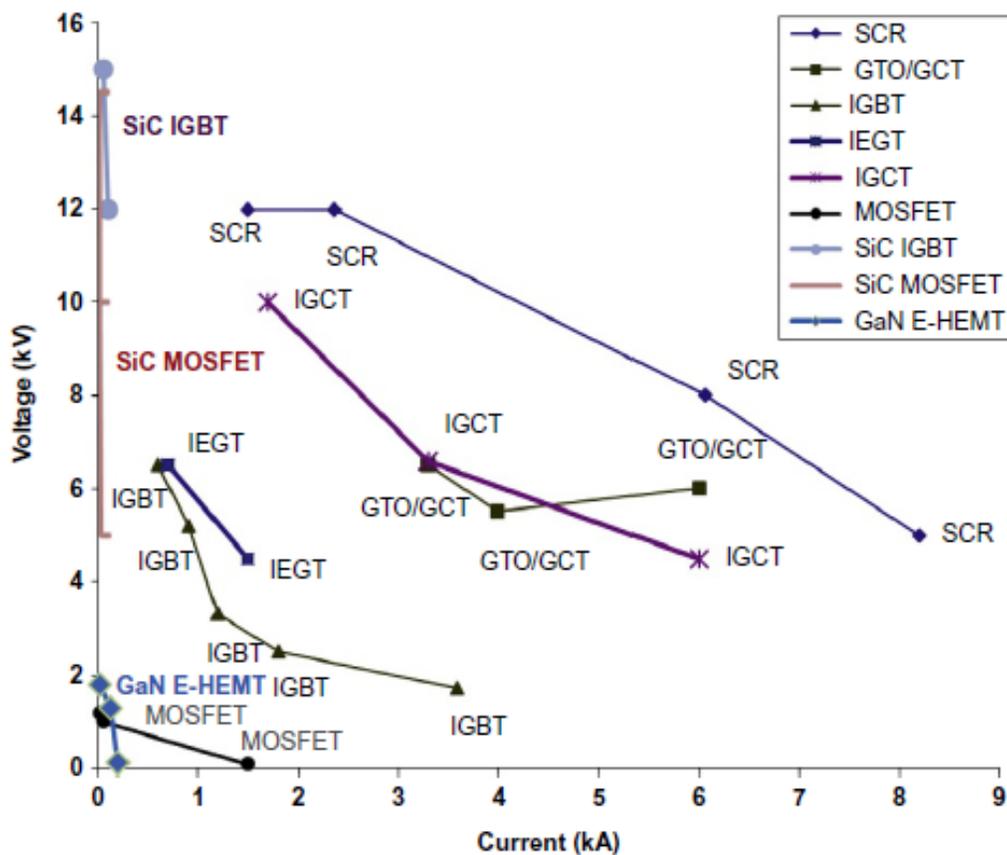
Material	Si	GaAs	SiC	Diamante
Dopagem (cm ⁻³)	1,3.10 ¹⁴	5,7.10 ¹⁴	1,1.10 ¹⁶	1,5.10 ¹⁷
Comprimento (µm)	100	50	10	2

Na tabela 13.IV tem-se expressa a redução no tempo de vida dos portadores no interior da região de deriva. Este parâmetro tem implicações sobre a velocidade de comutação dos dispositivos, sendo, assim, esperável que componentes de diamante, sejam algumas ordens de grandeza mais rápidos que os atuais componentes de Si.

Tabela IV Tempo de vida de portador (região de deriva) para junção pn com ruptura de 1000 V

Material	Si	GaAs	SiC	Diamante
Tempo de vida	1,2 μ s	0,11 μ s	40 ns	7 ns

Independentemente das vantagens que os materiais SiC e GaN possuem, eles não foram adotados para a fabricação de toda a família de dispositivos de alta potência. A dificuldade com o crescimento de cristais, a presença de defeitos de cristais e a ausência de fornecedores abundantes de *wafers* contribuem para a lentidão de progresso na fabricação de dispositivos SiC e GaN.



Limites (2018) de dispositivos e tecnologias de componentes de potência.

Figura obtida em ³²

³² J. F. Silva, L. Redondo, W. C. Dillard, Solid-State Pulsed Power Modulators and Capacitor Charging Applications, in Power Electronics Handbook – 4th Edition, M. Rashid, Editor, Elsevier, 2018, pp. 593-640.

Referências Bibliográficas

T. D. C. Busarello, M. G. Simões, J. A. Pomilio. [Semiconductor Diodes and Transistors](#), in Power Electronics Handbook – 4th Edition, M. Rashid, Editor, Elsevier, 2018, pp. 15-48.

T. K. Gachovska, J. L. Hudgins. [SiC and GaN Power Semiconductor Devices](#), in Power Electronics Handbook – 4th Edition, M. Rashid, Editor, Elsevier, 2018, pp. 95-155.

J. F. Silva, L. Redondo, W. C. Dillard, [Solid-State Pulsed Power Modulators and Capacitor Charging Applications](#), in Power Electronics Handbook – 4th Edition, M. Rashid, Editor, Elsevier, 2018, pp. 593-640.

N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins: “Power Electronics - Converters, Applications and Design”, John Wiley & Sons, Inc., Second Ed., 1995

Tsuneto Sekiya, S. Furuhashi, H. Shigekane, S. Kobayashi e S. Kobayashi: “Advancing Power Transistors and Their Applications to Electronic Power Converters”, Fuji Electric Co., Ltd., 1981

Edwin S. Oxner: “MOSPOWER Semiconductor”, Power Conversion International, Junho/Julho/Agosto/Setembro 1982, Artigo Técnico Siliconix TA82-2

B. Jayant Baliga: “Evolution of MOS-Bipolar Power Semiconductos Technology”, Proceedings of the IEEE, vol 76, no. 4, Abril 1988, pp. 409-418

Bimal K. Bose “Power Electronics - A Technology Review”, Proceedings of the IEEE, vol 80, no. 8, August 1992, pp. 1303-1334.

C. G. Steyn; J. D. van Wyk: Ultra Low-loss Non-linear Turn-off Snubbers for Power Electronics Switches. I European Conference on Power Electronics and Applications, 1985.