

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - UNICAMP
EE-833 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

MÓDULO 2

TIRISTORES e RETIFICADORES CONTROLADOS

ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 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 seqüência 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 (SCR ativado por luz), TRIAC (tiristor triodo bidirecional), DIAC (tiristor diodo bidirecional), GTO (tiristor comutável pela porta), MCT (Tiristor controlado por MOS), IGCT (Tiristor controlado com *gate* isolado).

2.1.1 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 2.1 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 [2.1].

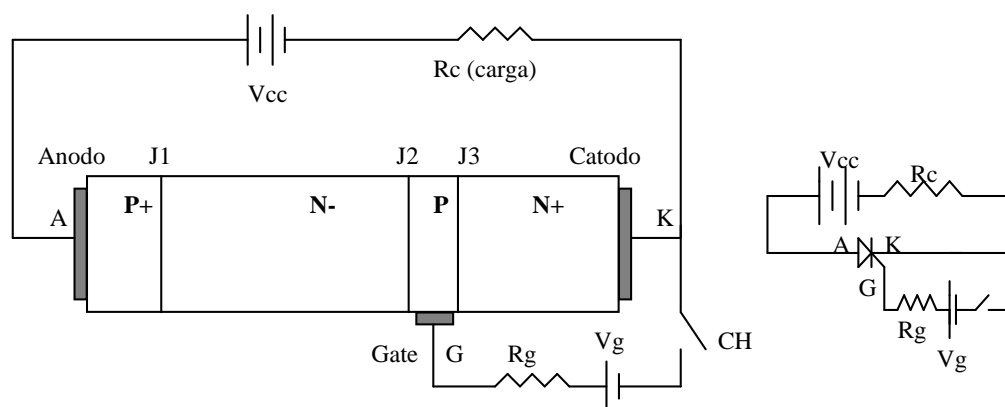


Figura 2.1 Funcionamento básico do tiristor

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.

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.

É comum fazer-se uma analogia entre o funcionamento do tiristor e o de uma associação de dois transistores, conforme mostrado na figura 2.2.

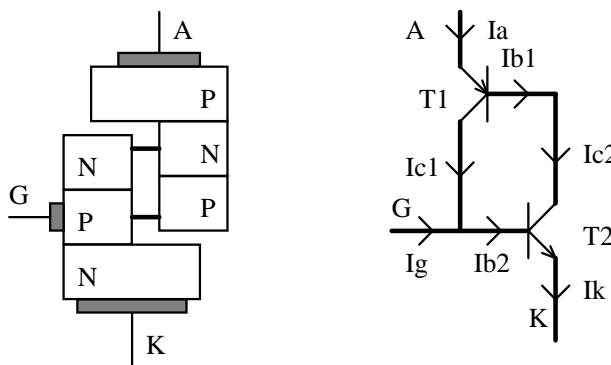


Figura 2.2 Analogia entre tiristor e transistores

Quando uma corrente I_g positiva é aplicada, I_{c2} e I_k crescerão. Como $I_{c2} = I_{b1}$, T1 conduzirá e teremos $I_{b2} = I_{c1} + I_g$, que aumentará I_{c2} e assim o dispositivo evoluirá até a saturação, mesmo que I_g seja retirada. Tal efeito cumulativo ocorre se os ganhos dos transistores forem maior que um. 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. Para a comutação do dispositivo não basta, pois, a aplicação de uma tensão negativa entre anodo e catodo. Tal tensão reversa apressa o processo de desligamento por deslocar nos sentidos adequados os portadores na estrutura cristalina, mas não garante, sozinha, o desligamento.

Devido a características construtivas do dispositivo, a aplicação de uma polarização reversa do terminal de *gate* não permite a comutação do SCR.

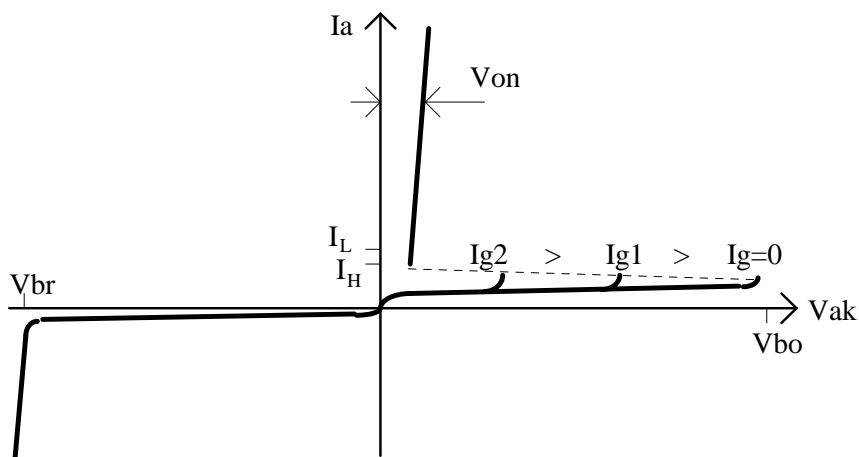


Figura 2.3 Característica estática do tiristor.

2.1.2 Maneiras de disparar um tiristor

Há cinco maneiras distintas de fazer com que um tiristor entre em condução:

a) Tensão

Quando polarizado diretamente, no estado desligado, a tensão de polarização é aplicada sobre a junção J2. O aumento da tensão V_{ak} leva a uma expansão da região de transição tanto para o interior da camada do *gate* quanto para a camada N adjacente. Mesmo na ausência de corrente de *gate*, por efeito térmico, sempre existirão cargas livres que penetram na região de transição (no caso, elétrons), as quais são aceleradas pelo campo elétrico presente em J2. Para valores elevados de tensão (e, conseqüentemente, de campo elétrico), é possível iniciar um processo de avalanche, no qual as cargas aceleradas, ao se chocarem com átomos vizinhos, provoquem a expulsão de novos portadores, os quais reproduzem o processo. Tal fenômeno, do ponto de vista do comportamento do fluxo de cargas pela junção J2, tem efeito similar ao de uma injeção de corrente pelo *gate*, de modo que, se ao se iniciar a passagem de corrente for atingido o limiar de I_L , o dispositivo se manterá em condução.

b) Taxa de crescimento da tensão direta

Quando reversamente polarizadas, a área de transição de uma junção comporta-se de maneira similar a um capacitor, devido ao campo criado pela carga espacial. Considerando que praticamente toda a tensão está aplicada sobre a junção J2 (quando o SCR estiver desligado e polarizado diretamente), a corrente que atravessa tal junção é dada por:

$$I_j = \frac{d(C_j \cdot V_{ak})}{dt} = C_j \cdot \frac{dV_{ak}}{dt} + V_{ak} \cdot \frac{dC_j}{dt} \quad (2.1)$$

Onde C_j é a capacitância da junção.

Quando V_{ak} cresce, a capacitância diminui, uma vez que a região de transição aumenta de largura. Entretanto, se a taxa de variação da tensão for suficientemente elevada, a corrente que atravessará a junção pode ser suficiente para levar o tiristor à condução.

Uma vez que a capacitância cresce com o aumento da área do semicondutor, os componentes para correntes mais elevadas tender a ter um limite de dv/dt menor. Observe-se que a limitação diz respeito apenas ao crescimento da tensão direta ($V_{ak} > 0$). A taxa de crescimento da tensão reversa não é importante, uma vez que as correntes que circulam pelas junções J1 e J3, em tal situação, não têm a capacidade de levar o tiristor a um estado de condução.

Como se verá adiante, utilizam-se circuitos RC em paralelo com os tiristores com o objetivo de limitar a velocidade de crescimento da tensão direta sobre eles.

c) Temperatura

Em altas temperaturas, a corrente de fuga numa junção p-n reversamente polarizada dobra aproximadamente com o aumento de 8° C. Assim, a elevação da temperatura pode levar a uma corrente através de J2 suficiente para levar o tiristor à condução.

d) Ação da corrente positiva de porta

É o método usual de disparo do SCR, já tendo sido descrito anteriormente.

Sendo o disparo através da corrente de porta a maneira mais usual de ser ligado o tiristor, é importante o conhecimento dos limites máximos e mínimos para a tensão V_{gk} e a corrente I_g , como mostrados na figura 2.4.

O valor V_{gm} indica a mínima tensão de *gate* que garante a condução de todos os componentes de um dado tipo, na mínima temperatura especificada.

O valor V_{go} é a máxima tensão de *gate* que garante que nenhum componente de um dado tipo entrará em condução, na máxima temperatura de operação.

A corrente I_{gm} é a mínima corrente necessária para garantir a entrada em condução de qualquer dispositivo de certo tipo, na mínima temperatura.

Para garantir a operação correta do componente, a reta de carga do circuito de acionamento deve garantir a passagem além dos limites V_{gm} e I_{gm} , sem exceder os demais limites (tensão, corrente e potência máximas).

e) Energia radiante

Energia radiante dentro da banda espectral do silício, incidindo e penetrando no cristal, produz considerável quantidade de pares elétrons-lacunas, aumentando a corrente de fuga reversa, possibilitando a condução do tiristor. Este tipo de acionamento é o utilizado nos LASCR, cuja aplicação principal é em sistemas que operam em elevado potencial, onde a isolação necessária só é obtida por meio de acoplamentos óticos.

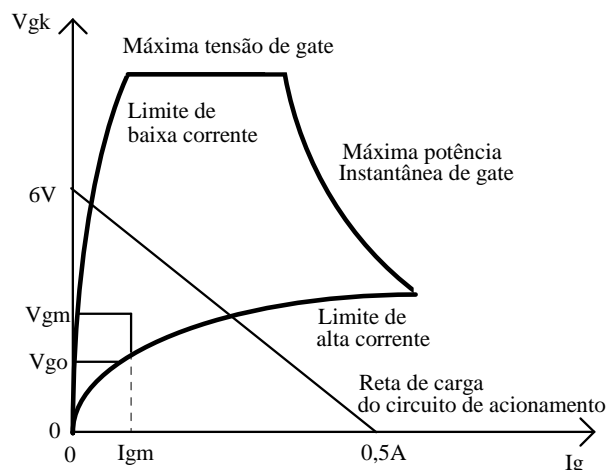


Figura 2.4 Condições para disparo de tiristor através de controle pela porta.

2.1.3 Parâmetros básicos de tiristores

Apresentaremos a seguir alguns parâmetros típicos de tiristores e que caracterizam condições limites para sua operação [2.2]. Alguns já foram apresentados e comentados anteriormente e serão, pois, apenas citados aqui.

- a) Tensão direta de ruptura (V_{BO})
- b) Máxima tensão reversa (V_{BR})
- c) Máxima corrente de anodo ($I_{a_{max}}$): pode ser dada como valor RMS, médio, de pico e/ou instantâneo.
- d) Máxima temperatura de operação ($T_{j_{max}}$): temperatura acima da qual pode haver destruição do cristal.
- e) Resistência térmica (R_{th}): é a diferença de temperatura entre dois pontos especificados ou regiões, dividido pela potência dissipada em condições de equilíbrio térmico. É uma medida das condições de fluxo de calor do cristal para o meio externo.
- f) Característica I^2t : é o resultado da integral do quadrado da corrente de anodo num determinado intervalo de tempo, sendo uma medida da máxima potência dissipável pelo dispositivo. É dado básico para o projeto dos circuitos de proteção.
- g) Máxima taxa de crescimento da tensão direta V_{ak} (dv/dt).
- h) Máxima taxa de crescimento da corrente de anodo (di/dt): fisicamente, o início do processo de condução de corrente pelo tiristor ocorre no centro da pastilha de silício, ao redor da região onde foi construída a porta, espalhando-se radialmente até ocupar toda a superfície do

catodo, à medida que cresce a corrente. Mas se a corrente crescer muito rapidamente, antes que haja a expansão necessária na superfície condutora, haverá um excesso de dissipação de potência na área de condução, danificando a estrutura semicondutora. Este limite é ampliado para tiristores de tecnologia mais avançada, fazendo a interface entre *gate* e catodo com maior área de contato, por exemplo, “interdigitando” o *gate*, como ilustra a figura 2.5.

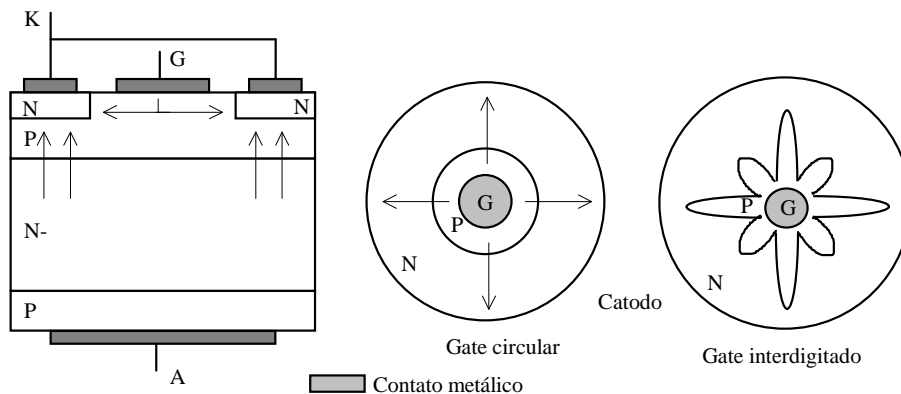


Figura 2.5 Expansão da área de condução do SCR a partir das vizinhanças da região de *gate*.

i) Corrente de manutenção de condução (I_h): a mínima corrente de anodo necessária para manter o tiristor em condução.

j) Corrente de disparo (I_L): mínima corrente de anodo requerida para manter o SCR ligado imediatamente após ocorrer a passagem do estado desligado para o ligado e ser removida a corrente de porta.

k) Tempo de disparo (t_{on}): é o tempo necessário para o tiristor sair do estado desligado e atingir a plena condução.

l) Tempo de desligamento (t_{off}): é o tempo necessário para a transição entre o estado de condução e o de bloqueio. É devido a fenômenos de recombinação de portadores no material semicondutor.

m) Corrente de recombinação reversa (I_{rqm}): valor de pico da corrente reversa que ocorre durante o intervalo de recombinação dos portadores na junção.

A figura 2.6 ilustra algumas destas características.

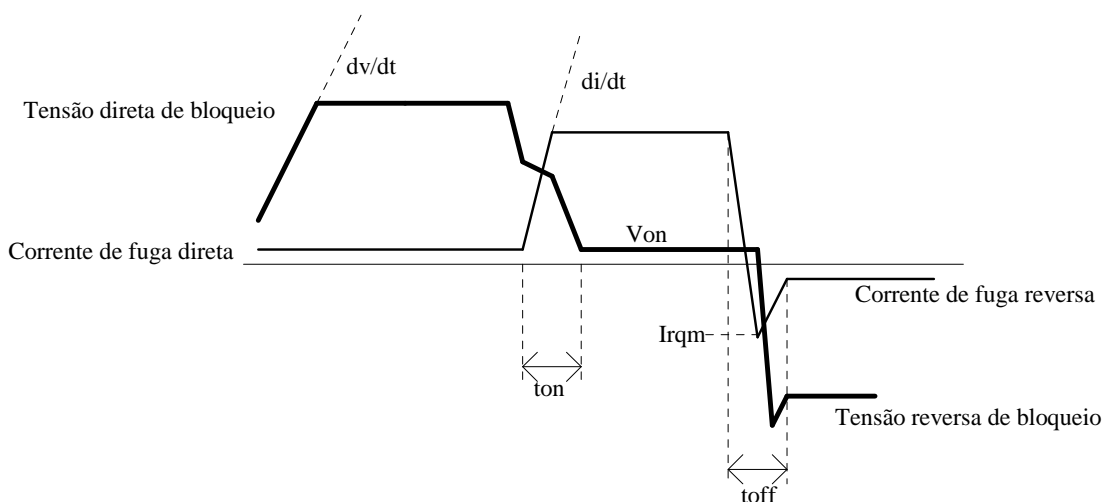


Figura 2.6: Características do tiristor

2.1.4 Circuitos para comando de disparo e desligamento de tiristores

a) Disparo

Conforme foi visto, a entrada em condução de um tiristor é controlada pela injeção de uma corrente no terminal da porta, devendo este impulso estar dentro da área delimitada pela figura 2.6. Por exemplo, para um dispositivo que deve conduzir 100 A, um acionador que forneça uma tensão V_{gk} de 6 V com impedância de saída 12 ohms é adequado. A duração do sinal de disparo deve ser tal que permita à corrente atingir I_L quando, então, pode ser retirada.

Observamos ser bastante simples o circuito de disparo de um SCR e, dado o alto ganho do dispositivo, as exigências quando ao acionamento são mínimas.

b) Desligamento

Se, por um lado, é fácil a entrada em condução de um tiristor, o mesmo não se pode dizer de sua comutação. Lembramos que a condição de desligamento é que a corrente de anodo fique abaixo do valor I_H . Se isto ocorrer, juntamente com a aplicação de uma tensão reversa, o bloqueio se dará mais rapidamente.

Não existe uma maneira de se desligar o tiristor através de seu terminal de controle, sendo necessário algum arranjo ao nível do circuito de anodo para reduzir a corrente principal.

b.1) Comutação Natural

É utilizada em sistemas de CA nos quais, em função do caráter ondulatório da tensão de entrada, em algum instante a corrente tenderá a se inverter e terá, assim, seu valor diminuído abaixo de I_H , desligando o tiristor. Isto ocorrerá desde que, num intervalo inferior a t_{off} , não cresça a tensão direta V_{ak} , o que poderia levá-lo novamente à condução.

A figura 2.7 mostra um circuito de um controlador de tensão CA, alimentando uma carga RL, bem como as respectivas formas de onda. Observe que quando a corrente se anula a tensão sobre a carga se torna zero, indicando que nenhum dos SCRs está em condução.

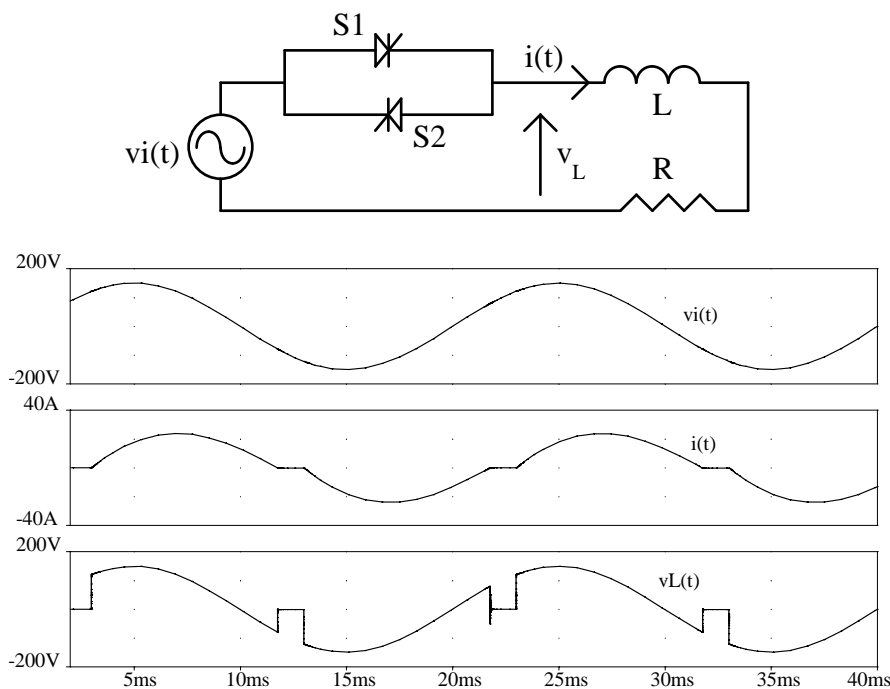


Figura 2.7 Controlador de tensão CA com carga RL e formas de onda típicas.

b.2) Comutação por ressonância da carga

Em algumas aplicações específicas, é possível que a carga, pela sua dinâmica própria, faça com que a corrente tenda a se inverter, fazendo o tiristor desligar. Isto ocorre, por exemplo, quando existem capacitâncias na carga as quais, ressoando com as indutâncias do circuito produzem um aumento na tensão ao mesmo tempo em que reduzem a corrente. Caso a corrente se torne menor do que a corrente de manutenção e o tiristor permaneça reversamente polarizado pelo tempo suficiente, haverá o seu desligamento. A tensão de entrada pode ser tanto CA quanto CC. A figura 2.8 ilustra tal comportamento em um circuito com entrada e saídas unidirecionais. Observe que enquanto o tiristor conduz a tensão de saída, $v_o(t)$ é igual à tensão de entrada. Quando a corrente se anula e S1 desliga, o que se observa é a tensão imposta pela carga ressonante a qual.

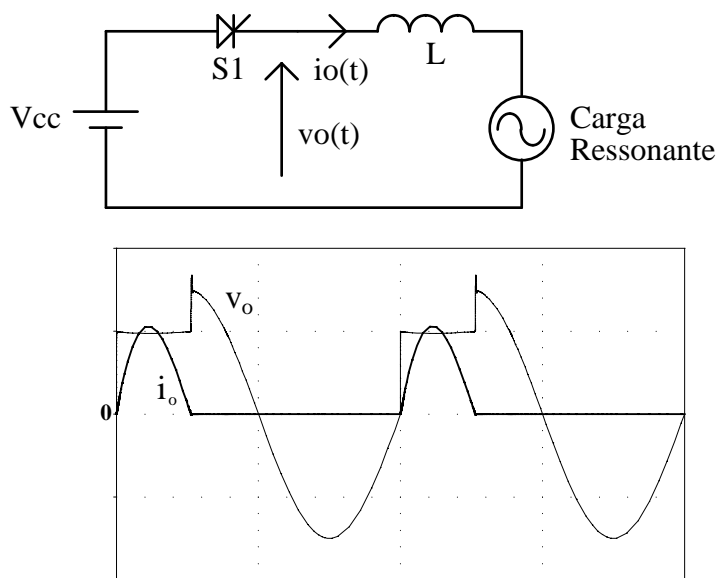


Figura 2.8 Circuito e formas de onda de comutação por ressonância da carga.

b.3) Comutação forçada

Este foi um assunto muito discutido, enquanto não se dispunha de dispositivos capazes de serem comandados para entrar em condução e para desligar, como são os transistores ou tiristores comutáveis pela porta (GTO, MCT e IGCT). Com o advento destes dispositivos os SCRs tiveram seu uso concentrado nas aplicações nas quais ocorre comutação natural ou pela carga. Atualmente este é um tema praticamente obsoleto.

A comutação forçada era utilizada em circuitos com alimentação CC e nos quais não ocorre reversão no sentido da corrente de anodo. A ideia básica é oferecer à corrente de carga um caminho alternativo ao tiristor, anulando a corrente de anodo, enquanto se aplica uma tensão reversa sobre ele, desligando-o.

A figura 2.9 mostra um circuito para comutação forçada de SCR e as formas de onda típicas. A figura 2.10 mostra detalhes de operação do circuito auxiliar de comutação.

Em um tempo anterior a t_0 , a corrente da carga (suposta quase constante, devido à elevada constante de tempo do circuito RL) passa pelo diodo de circulação, D_f . A tensão sobre o capacitor é negativa, com valor igual ao da tensão de entrada.

Em t_1 o tiristor principal, S_p , é disparado, conectando a fonte à carga, levando o diodo D_f ao desligamento. Ao mesmo tempo surge uma malha formada por S_p , C_r , D_1 e L_r , a qual permite a ocorrência de uma ressonância entre C_r e L_r , levando à inversão na polaridade da tensão do

capacitor. Em t_1 a tensão atinge seu máximo e o diodo D1 desliga (pois a corrente se anula). O capacitor está preparado para realizar a comutação de Sp.

Quando o tiristor auxiliar, Sa, é disparado, em t_2 , a corrente da carga passa a ser fornecida através do caminho formado por Lr, Sa e Cr, levando a corrente por Sp a zero, ao mesmo tempo em que se aplica uma tensão reversa sobre ele, de modo a desligá-lo.

Continua a haver corrente por Cr, a qual, em t_3 , se torna igual à corrente da carga, fazendo com que a variação de sua tensão assuma uma forma linear. Esta tensão cresce (no sentido negativo) até levar o diodo de circulação à condução, em t_4 . Como ainda existe corrente pelo indutor Lr, ocorre uma pequena oscilação na malha Lr, Sa, Cr e D2 e, quando a corrente por Sa se anula, o capacitor se descarrega até a tensão Vcc na malha formada por Cr, D1, Lr, fonte e Df.

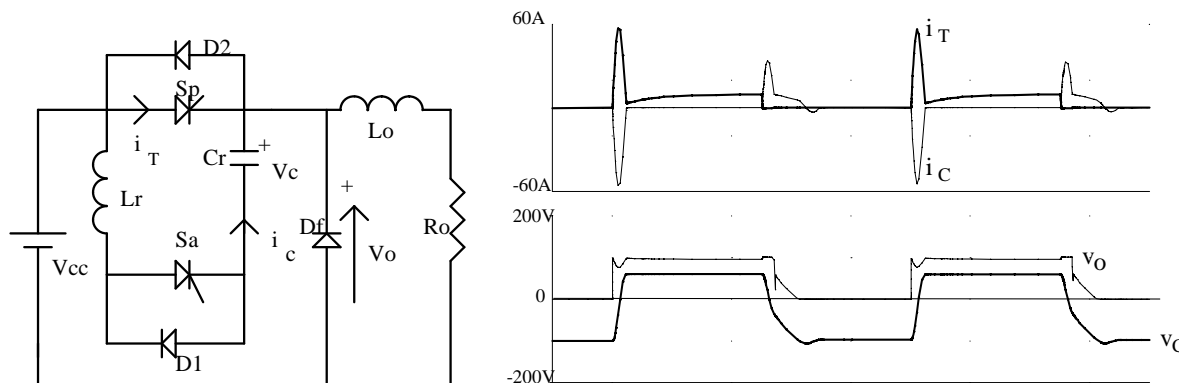


Figura 2.9 Topologia com comutação forçada de SCR e formas de onda típicas.

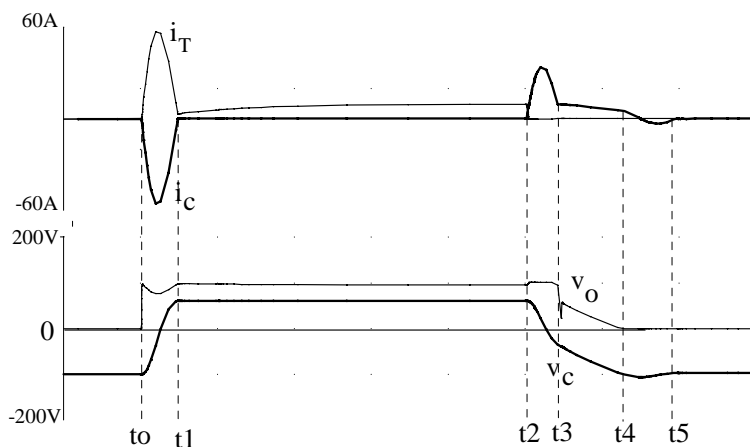


Figura 2.10 Detalhes das formas de onda durante comutação.

2.1.5 Redes Amaciadoras (snubbers)

O objetivo destas redes é evitar problemas advindos de excessivos valores para dv/dt e di/dt , conforme descrito anteriormente.

a) O problema di/dt

Uma primeira medida capaz de limitar possíveis danos causados pelo crescimento excessivamente rápido da corrente de anodo é construir um circuito acionador de *gate* adequado, que tenha alta derivada de corrente de disparo para que seja também rápida a expansão da área condutora.

Um reator saturável em série com o tiristor também limitará o crescimento da corrente de anodo durante a entrada em condução do dispositivo.

Além deste fato tem-se outra vantagem adicional que é a redução da potência dissipada no chaveamento pois, quando a corrente de anodo crescer, a tensão V_{ak} será reduzida pela queda sobre a indutância.

O atraso no crescimento da corrente de anodo pode levar à necessidade de um pulso mais longo de disparo, ou ainda a uma seqüência de pulsos, para que seja assegurada a condução do tiristor.

b) O problema do dv/dt

A limitação do crescimento da tensão direta V_{ak} , usualmente é feita pelo uso de circuitos RC, RCD, RLCD em paralelo com o dispositivo, como mostrado na figura 2.11.

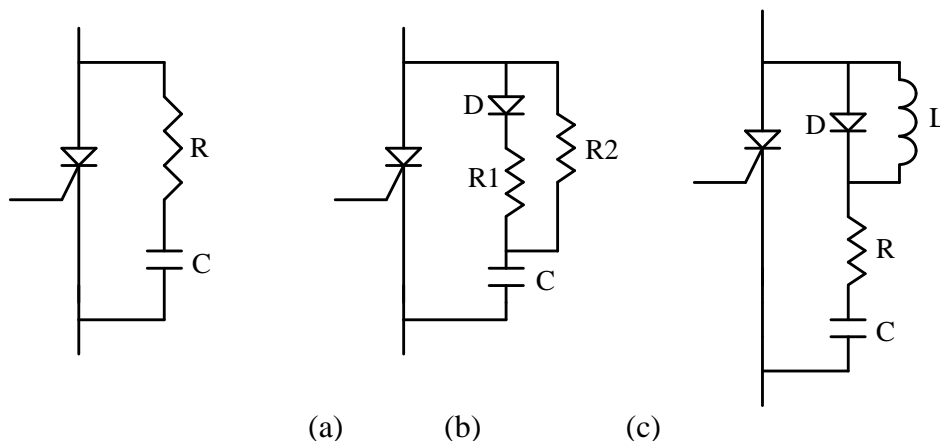


Figura 2.11: Circuitos amaciadores para dv/dt

No caso mais simples (a), quando o tiristor é comutado a tensão V_{ak} segue a dinâmica dada por RC que, além disso, desvia a corrente de anodo facilitando a comutação. Quando o SCR é ligado o capacitor descarrega-se, ocasionando um pico de corrente no tiristor, limitado pelo valor de R.

No caso (b) este pico pode ser reduzido pelo uso de diferentes resistores para os processos de carga e descarga de C. No 3º caso, o pico é limitado por L, o que não traz eventuais problemas de alto di/dt . A corrente de descarga de C auxilia a entrada em condução do tiristor, uma vez que se soma à corrente de anodo proveniente da carga.

A energia acumulada no capacitor é praticamente toda dissipada sobre o resistor de descarga.

2.1.5.1 Circuito de disparo

Em muitas aplicações, devido à necessidade de isolamento elétrico entre o circuito de comando e o de potência, o sinal de disparo deve ser isolado por meio de algum dispositivo como, por exemplo, transformadores de pulso ou acopladores óticos.

a) Transformador de pulso

Neste caso, têm-se transformadores capazes de responder apenas em alta frequência, mas que possibilitam a transferência de pulsos de curta duração (até centenas de microssegundos), após o que o transformador satura. Caso seja necessário um pulso mais largo, ele poderá ser obtido por meio de um trem de pulsos, colocando-se um filtro passa-baixas no lado de saída. Com tais dispositivos deve-se prever algum tipo de limitação de tensão no secundário (onde está conectado o *gate*), a fim de evitar sobretensões.

Quando se usar transformador de pulso é preciso garantir que ele suporte pelo menos a tensão de pico da alimentação. Como as condições de disparo podem diferir consideravelmente entre os tiristores, é comum inserir uma impedância em série com a porta para evitar que um tiristor com menor impedância de porta drene o sinal de disparo, impedindo que os demais dispositivos entrem em condução. Esta impedância em série pode ser um resistor ou um capacitor, que tornaria mais rápido o crescimento do pulso de corrente.

b) Acoplamento luminoso

O acoplamento ótico apresenta como principal vantagem a imunidade a interferências eletromagnéticas, além da alta isolação de potencial. Dois tipos básicos de acopladores são usados: os optoacopladores e as fibras óticas. No primeiro caso tem-se um dispositivo onde o emissor e o receptor estão integrados, apresentando uma isolação típica de 2500 V. Já para as fibras óticas, o isolamento pode ser de centenas de kV.

A potência necessária para o disparo é provida por duas fontes: uma para alimentar o emissor (em geral a própria fonte do circuito de controle) e uma outra para o lado do receptor. Eventualmente a própria carga armazenada no capacitor do circuito amaciador (ou rede de equalização), através de um transformador de corrente, pode fornecer a energia para o lado do receptor, a partir da corrente que circula pelo tiristor, assegurando potência durante todo o período de condução [2.3].

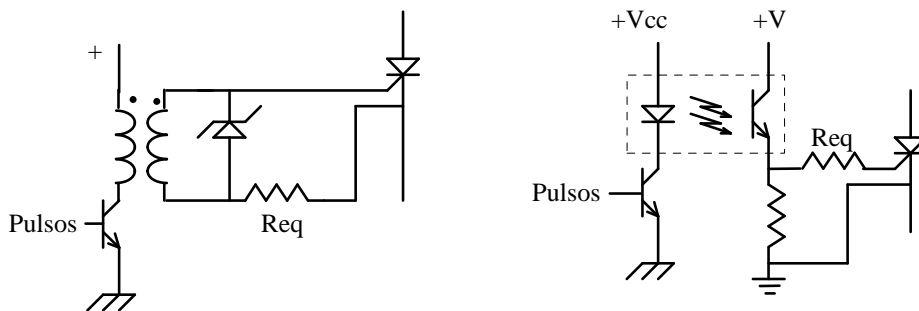


Figura 2.12: Rede de equalização e circuitos de acionamento de pulso

2.2 Pontes retificadoras

Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tiristores em conversores estáticos. Possuem vasta aplicação industrial, no acionamento de motores de corrente contínua, em estações retificadoras para alimentação de redes de transmissão CC, no acionamento de locomotivas, etc.

Analisaremos aqui pontes retificadoras monofásicas, embora o estudo das pontes trifásicas não seja substancialmente diferente. Para potência superior a 10 kW geralmente se usam pontes trifásicas (ou mesmo hexafásicas).

Estudaremos ainda o TCA 780, um dos CIs dedicados ao acionamento de tiristores em sistemas com controle de fase.

A Figura 2.13 mostra 3 estruturas de pontes retificadoras monofásicas.

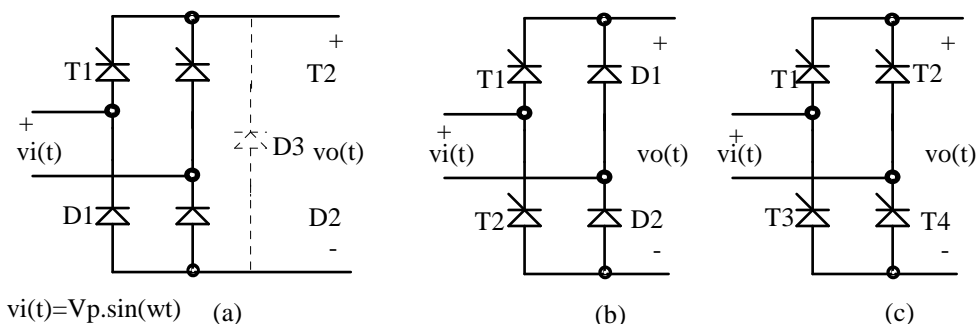


Fig.2.13 - Pontes retificadoras monofásicas:

- a) Semi-controlada simétrica; b) Semi-controlada assimétrica; c) totalmente controlada

A principal vantagem das pontes semi-controladas é o uso de apenas 2 tiristores, sendo indicadas quando o fluxo de energia será apenas da fonte para a carga. Neste circuito a tensão de saída, $v_o(t)$ pode assumir apenas valores (instantâneos e médios) positivos. Sempre que a tensão de saída tender a se inverter haverá um caminho interno que manterá esta tensão em zero, desconectando a carga da rede.

Quando a carga for resistiva, a forma de onda da corrente de linha será a mesma da tensão sobre a carga (obviamente sem a retificação). Com carga indutiva, a corrente irá se alisando à medida que aumenta a constante de tempo elétrica da carga, tendo, no limite, uma forma plana. Vista da entrada, a corrente assume uma forma retangular.

a) Ponte semicontrolada assimétrica

Na ponte assimétrica existe um caminho de livre-circulação formado pelos diodos D1 e D2. Supondo a polaridade da tensão da entrada como indicada, o disparo de T1 conecta a entrada à carga (indutiva) através do tiristor e D2. Quando a tensão de entrada se inverte, D1 entrará em condução e T1 cortará (Enquanto, devido ao tempo de desligamento do tiristor, T1, D1 e D2 conduzirem, a fonte estará curto-circuitada, com sua corrente sendo limitada pela impedância da fonte). Quando T2 for disparado, D1 cortará.

O intervalo de condução de cada SCR é de $(\pi - \alpha)$. Cada diodo conduz por $(2\pi - \alpha)$. A figura 2.14 mostra formas de onda para este conversor.

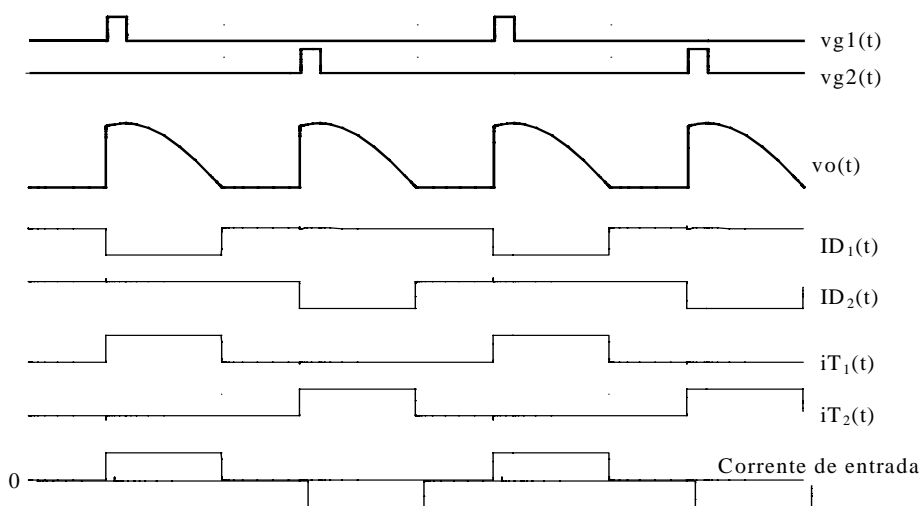


Figura 2.14 Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada assimétrica, com carga altamente indutiva.

b) Ponte semicontrolada simétrica

Neste circuito não existe um caminho natural de livre-circulação, a qual deve ocorrer sempre através de um SCR e um diodo.

Supondo $v_i(t)$ com a polaridade indicada, quando T1 for disparado, a corrente circulará por T1 e D2. Quando a tensão da fonte inverte a polaridade, D1 entrará em condução e D2 bloqueará. A tensão na carga será nula, pois T1 e D1 conduzirão simultaneamente, supondo que a corrente não se interrompa (carga indutiva). Quando T2 for disparado, T1 bloqueará. Diodos e tiristores conduzem por 180° .

Note que se T2 não for disparado, supondo que T1 continue a conduzir em função da elevada constante de tempo elétrica da carga, no próximo semiciclo positivo a fonte será novamente acoplada à carga fornecendo-lhe mais corrente. Ou seja, a simples retirada dos pulsos de disparo não garante o desacoplamento entre carga e fonte. Para que isso ocorra é necessário diminuir o ângulo de disparo para que a corrente se torne descontínua e assim T1 corte. Obviamente o mesmo

comportamento pode ocorrer com respeito ao outro par de componentes. Formas de onda típicas estão mostradas na figura 2.15.

Isto pode ser evitado pela inclusão do diodo de livre-circulação D3, o qual entrará em condução quando a tensão se inverter, desligando T1 e D1. A vantagem da montagem assimétrica é que os catodos estão num mesmo potencial, de modo que os sinais de acionamento podem estar num mesmo potencial.

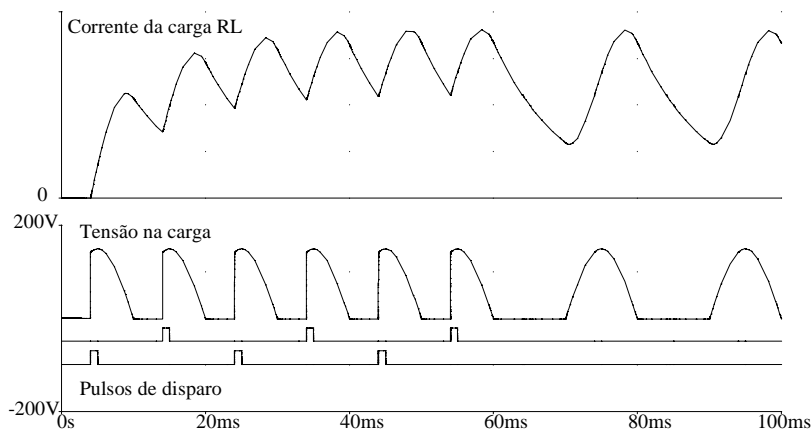


Figura 2.15 Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada simétrica, com carga altamente indutiva. Efeito da supressão dos pulsos de comando.

c) Ponte totalmente controlada

Seu principal uso é no acionamento de motor de corrente contínua quando é necessária uma operação em dois quadrantes do plano tensão x corrente, sendo possível devolver energia da carga para a fonte. Nestes circuitos não pode haver inversão de polaridade na corrente, mas a tensão sobre a carga pode se tornar negativa, desde que exista um elemento indutivo que mantenha a circulação de corrente pelos tiristores, mesmo quando reversamente polarizados.

Os pares de componentes T1 e T4, T2 e T3 devem ser disparados simultaneamente, a fim de garantir um caminho para a corrente através da fonte.

No caso de corrente descontínua (corrente da carga vai a zero dentro de cada semi-ciclo da rede), os tiristores desligarão quando a corrente cair abaixo da corrente de manutenção. No caso de condução contínua, o par de tiristores desligará quando a polaridade da fonte se inverter e for disparado outro par de tiristores. Assim, se houver inversão na polaridade da tensão de entrada, mas não for acionado o outro par de SCRs, a tensão nos terminais do retificador será negativa. A figura 2.16 mostra formas de onda.

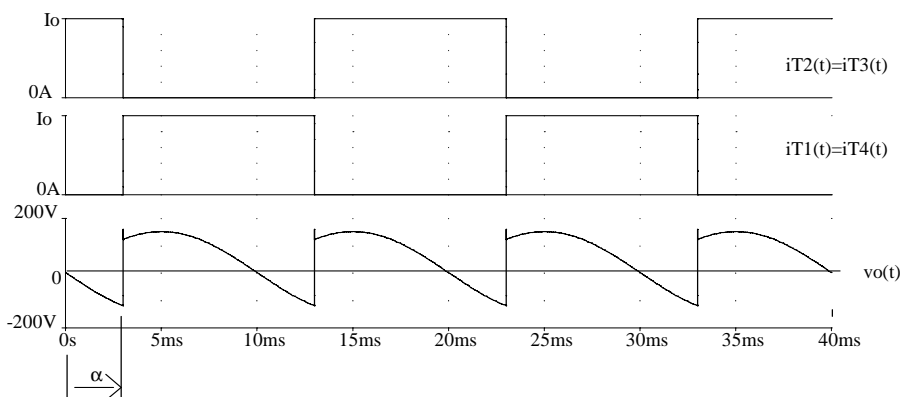


Figura 2.15 Formas de onda para ponte totalmente controlada, monofásica, alimentando carga indutiva.

A corrente de entrada apresenta-se como uma onda quadrada, com sua componente fundamental defasada de um ângulo α em relação à tensão.

Quando se faz o acionamento de um motor CC, a carga comporta-se como um circuito RL ao qual se adiciona uma fonte de tensão CC, que representa a força contra-eleto-motriz de armadura, como mostrado na figura 2.17. Em situações em que a constante de tempo é pequena, ou então a tensão E_a é elevada, é possível que a corrente se anule, fazendo com que os tiristores comutem dentro de um semiciclo da rede. Em tal situação, como não há corrente, a tensão vista nos terminais da máquina, $v_o(t)$, será a própria tensão de armadura. A tensão $v_o(t)$ será igual à tensão de entrada (retificada) apenas enquanto os tiristores conduzirem, como ilustram as formas de onda. A oscilação que se nota quando o circuito entra no modo descontínuo se deve a ressonâncias entre as capacitâncias dos semicondutores e a carga.

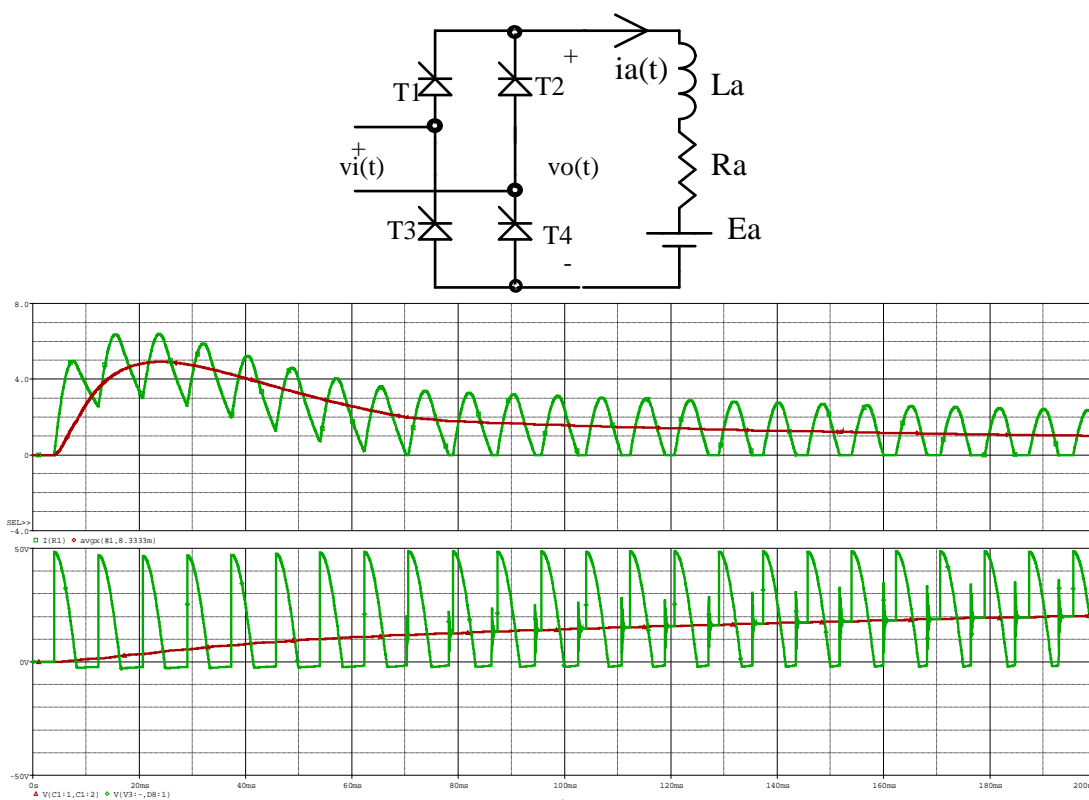


Figura 2.17 a) Retificador monofásico totalmente controlado, acionando motor CC. b) Formas de onda típicas.

2.3 Retificadores trifásicos

A figura 2.18 mostra circuitos de retificadores trifásicos. No caso a) tem-se um retificador semicontrolado, enquanto em b) tem-se um retificador totalmente controlado. Diferentemente do caso monofásico, no circuito trifásico não há o circuito simétrico.

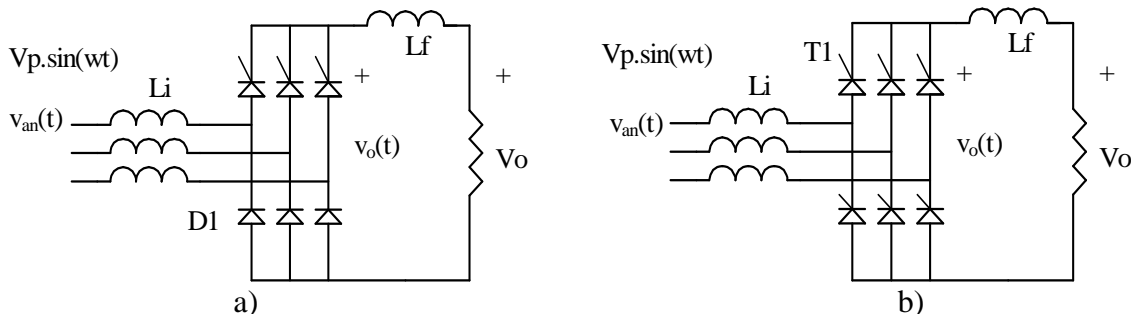


Figura 2.18 Retificador trifásico semicontrolado (a) e controlado (b).

Também para estes retificadores, a versão semicontrolada não permite a inversão da tensão instantânea no barramento CC. O circuito semicontrolado é raramente utilizado pois a corrente apresenta harmônicas pares, como se pode ver na figura 2.19.

A figura 2.10 mostra resultados análogos, também sem indutâncias de entrada, para um retificador totalmente controlado. A carga é um circuito RL (4Ω , 16 mH), de modo que a corrente se altera à medida que muda o ângulo de disparo e, conseqüentemente, a tensão média aplicada à carga. Para um ângulo de 0 grau a forma de onda é idêntica a do retificador a diodos. Na ausência de um diodo de roda-livre a tensão instantânea aplicada no barramento CC pode ser negativa, o que ocorre para um ângulo de disparo superior a 60 graus. Como não há possibilidade de inversão no sentido da corrente, uma tensão negativa leva à diminuição da corrente até sua extinção (em uma carga passiva).

A corrente da rede é simétrica, apresentando apenas componentes espectrais de ordem ímpar, exceto os múltiplos da terceira, que não existem.

A tensão média no barramento CC é dada por:
$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{\text{linha RMS}} \cdot \cos \alpha$$

Uma corrente no lado CC de baixa ondulação reflete para o lado CA uma onda quase quadrada, com condução de 120° a cada 180° , deslocada de um ângulo α em relação à tensão. Neste caso pode-se determinar o espectro da corrente em relação à corrente da carga, I_o . A corrente eficaz no lado CA é $81,6\%$ da corrente no lado CC.

A componente fundamental é $I_{i1} = 0,78 \cdot I_o$, enquanto as harmônicas são dadas por:

$$I_{ih} = \frac{I_{i1}}{n}, \text{ onde } n=6k \pm 1, \text{ para } k=1,2,\dots$$

Isto permite determinar que a distorção harmônica total da corrente é de $31,08\%$.

O fator de deslocamento (ângulo entre a tensão e a componente fundamental da corrente) é igual a $(\cos \alpha)$. O fator de potência é:
$$FP = \frac{3}{\pi} \cos \alpha$$

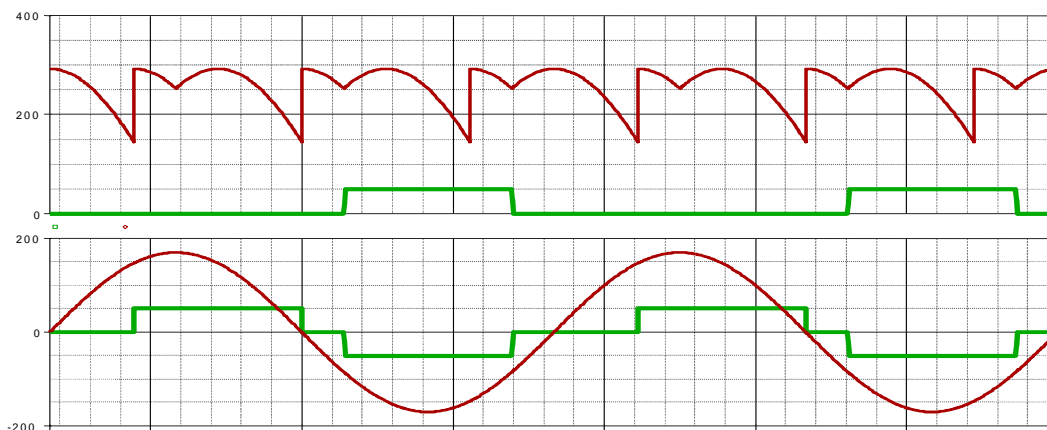


Figura 2.19 Formas de onda de retificador trifásico semi-controlado Ângulo de disparo: 30 graus. De cima para baixo: tensão instantânea no barramento CC ($v_o(t)$); Corrente no diodo D1; Tensão da fase A ($v_{an}(t)$); Corrente na fase A.

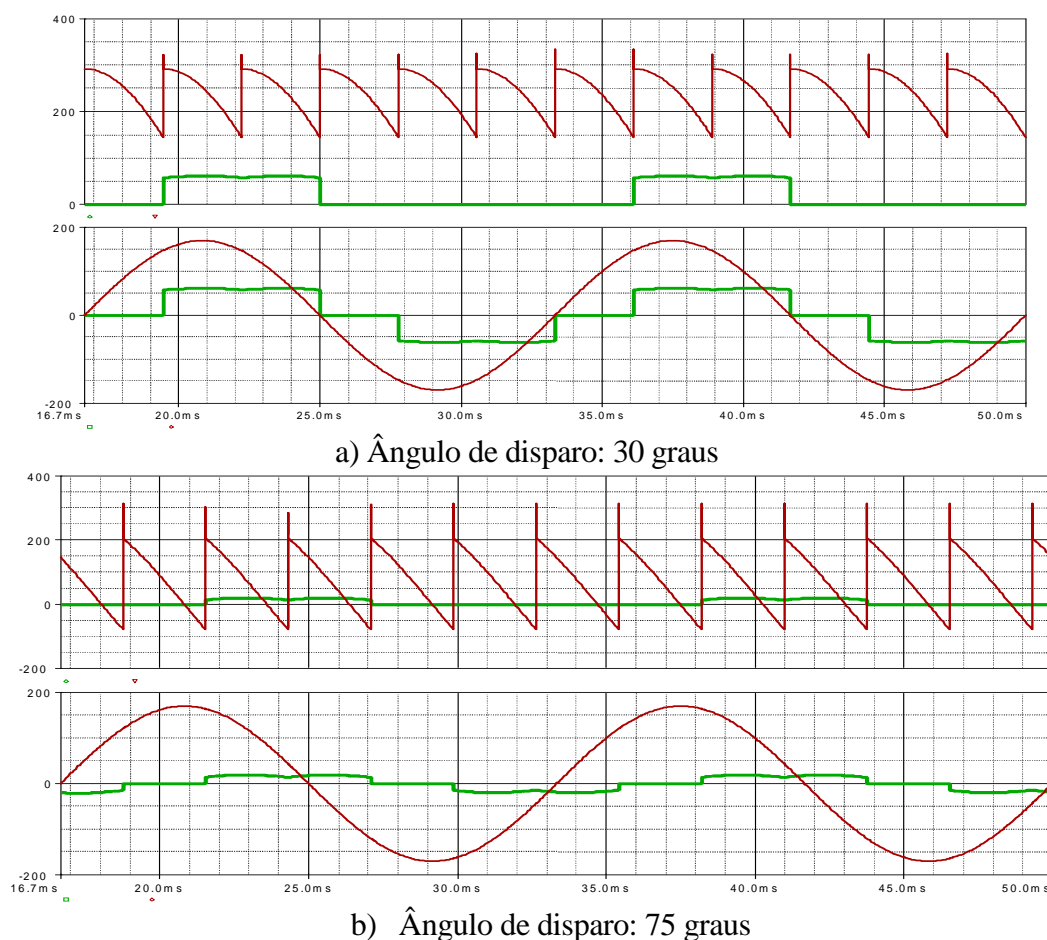


Figura 2.20. Formas de onda de retificador trifásico controlado.

De cima para baixo: tensão instantânea no barramento CC ($v_o(t)$); Corrente no tiristor T1; Tensão da fase A ($v_{an}(t)$); Corrente na fase A.

2.4 TCA 785 (ou TCA780)

Na figura 2.21 apresentam-se o diagrama de blocos do TCA 785 e seu diagrama de sinais, na figura 2.22. A alimentação interna do TCA 785 é feita por uma fonte interna estabilizada e que admite ampla variação da fonte externa. Esta tensão é acessível pelo pino 8.

O pino 1 é aterrado e ao pino 5 aplica-se a tensão de sincronismo (V). O sincronismo é obtido através de um detector de cruzamento por zero (do sinal CA), seguido por um registro de sincronismo.

Um gerador de rampa é construído através de uma fonte de corrente (interna ao CI) que carrega um capacitor externo conectado ao pino 10. O valor da corrente pode ser controlado através de um resistor colocado no pino 9, determinando a inclinação da rampa.

Toda rampa se inicia quando ocorre um cruzamento por zero na tensão CA de alimentação e termina no próximo cruzamento, quando o registro de sincronismo aciona o transistor de descarga.

Uma tensão de controle é aplicada no pino 11 e seu valor é comparado com a rampa. Quando a rampa se torna maior, é gerado um pulso na saída A1 (pino 14) ou em A2 (pino 15), dependendo da polaridade do sinal CA de sincronismo. É possível ainda pulsos mais longos através da conexão de um capacitor ao pino 12 ou mesmo de sua ligação ao terra. A ligação do pino 13 ao terra também aumenta a extensão do pulso.

O pino 3 oferece uma saída síncrona com A1, mas com duração de 180 e no pino 7 tem-se um ou-exclusivo de A1 e A2. São disponíveis também saídas complementares de A1 e A2 (pinos 2 e 4, respectivamente). O pino 6, quando ligado ao terra, inibe a saída dos pulsos.

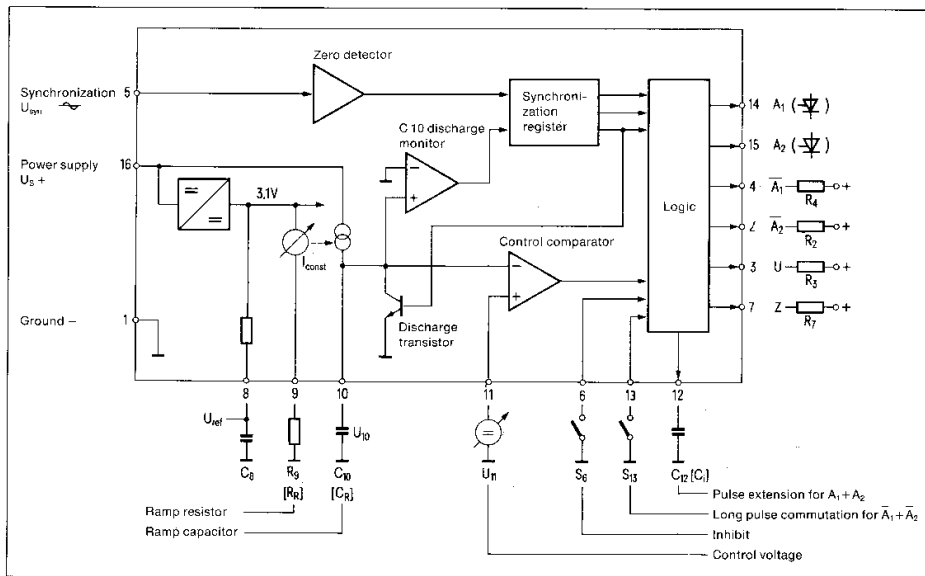


Fig. 1 Block diagram of integrated phase control TCA 780

Figura 2.21 Diagrama de blocos do TCA785.

Fig. 2 Pulse level diagram of TCA 780

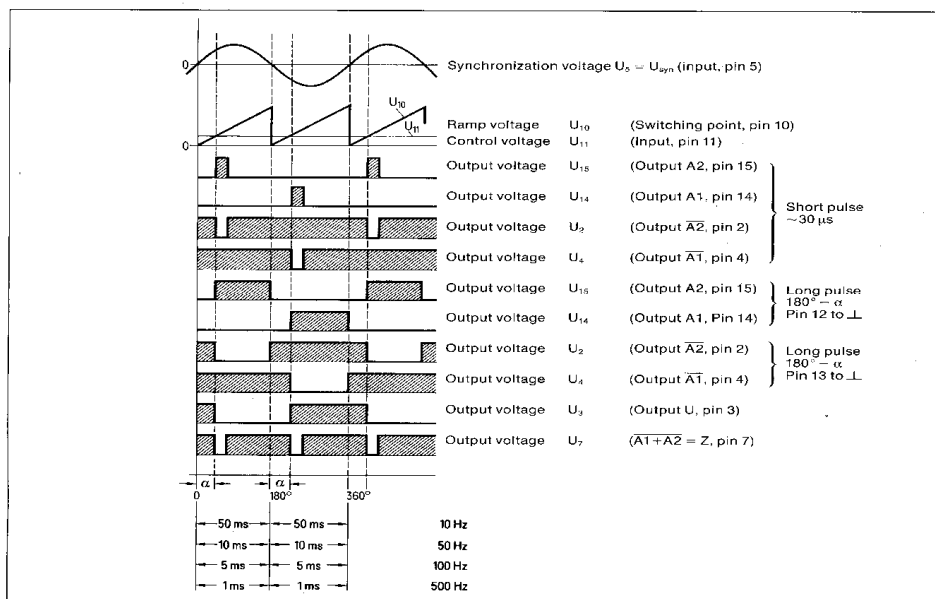


Figura 2.22. Formas de onda do TCA 785.

2.5 Referências bibliográficas

- [2.1] SCR Manual
Grafham, D.R. e Golden, F.b., editors
General Electric, 6o ed., 1979, USA.
- [2.2] SCR Designers Handbook
Rice, L.R., editor
Westinghouse Electric Co., 1970, USA
- [2.3] Firing System and Overvoltage Protection for Thyristor Valves in Static VAR Compensators
Hausles, M. e outros
Brown Boveri Review, 4-1987, pp. 206-212

Leituras complementares

J. A. Pomilio, “Componentes Semicondutores de Potência”, Apostila do curso IT302 – Eletrônica de Potência I.

Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap1.pdf>

J. A. Pomilio, “Conversores CA/CC – Retificadores”, Apostila do curso IT744 – Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Disponível em:

<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap4.pdf>

Parte Experimental:

1ª Aula

Material:

- Fonte CC com 2 saídas ajustáveis independentes (Minipa 3003)
- Transformador isolador (220 V x 110 V – 300 VA)
- Osciloscópio duplo traço (digital)
- Multímetro (RMS verdadeiro)
- Circuito de teste
- Lâmpada 25 W/127 V
- Contator trifásico

2.6 Procedimentos iniciais

O circuito de teste (figura 2.21) deve ser alimentado através do transformador isolador (220V x 110V). O lado de 110 V alimenta o circuito, enquanto o lado de 220 V vai ligado à rede (em 127 V). Esta redução de tensão é necessária para adequar-se à tensão de armadura do motor CC que será utilizado como carga. Além disso, deste modo é possível realizar medições com o osciloscópio, mesmo que este esteja aterrado.

Para evitar acidentes, sempre que for alterar o ponto de teste ou algum componente, é conveniente desenergizar o circuito (desligando o contator). *Recorde-se que o osciloscópio só pode ter um ponto de referência para os 2 canais.*

2.7 TCA 785

Conecte as fontes CC (ajustada em 12 V) e CA (através do transformador) ao circuito de teste. A chave deve estar na posição MA (malha aberta). As próximas medidas devem ser feitas em relação ao ponto 0. Sem conectar a carga, verificar os sinais produzidos pelo TCA 785. Ajuste o sincronismo do osciloscópio (*trigger*) para sincronizar-se com a rede (AC).

- a) Sinal de sincronismo (ponto 5), observando-o conjuntamente com a tensão de entrada (ponto 1). Explique a forma deste sinal e como é obtido.
- b) Rampa (ponto 10), observando-os conjuntamente com a tensão de entrada (ponto 1). Meça a frequência deste sinal, verifique seu sincronismo com a tensão da rede.
- c) Observe conjuntamente a rampa (ponto 10) com o sinal do ponto 11 (tensão de controle em malha aberta). Varie o **potenciômetro** e verifique os limites máximo e mínimo da tensão no ponto 11.
- d) Varie o **trimpot** e explique sua influência sobre a rampa Explique como é gerada esta rampa. Ajuste uma tensão de pico da rampa que seja *menor* do que a máxima tensão de controle (ponto 11).
- e) Pulsos de saída (pontos 14 e 15). Observe cada uma destas saídas conjuntamente com a rampa (ponto 10). Varie o potenciômetro e veja a alteração no ângulo de disparo. Estes sinais, após amplificação pelos transistores, são aplicados aos transformadores de pulso, cujos secundários estão ligados entre *gate* e catodo dos tiristores.

2.8 Medidas com carga resistiva

Ajuste o potenciômetro para a máxima tensão no ponto 11 (máximo ângulo de disparo). Conecte a lâmpada nos terminais da carga.

- a) Observe simultaneamente os pontos 15 (pulso de disparo) e 7 (corrente de linha). Varie a tensão de controle (potenciômetro). Anote e comente.
- b) No TCA785, a relação entre a tensão de controle e o ângulo de disparo é linear, uma vez que o sinal de comparação é uma rampa. Variando a tensão de controle em intervalos de 0,5 V, e medindo a tensão média de saída (entre os pontos 2 e 3), obtenha a característica de transferência estática do conversor. Este resultado é válido quando a carga for resistiva. Utilize um multímetro para medir a tensão no ponto 11. No relatório, após traçar a curva, explique por que a relação não é linear?

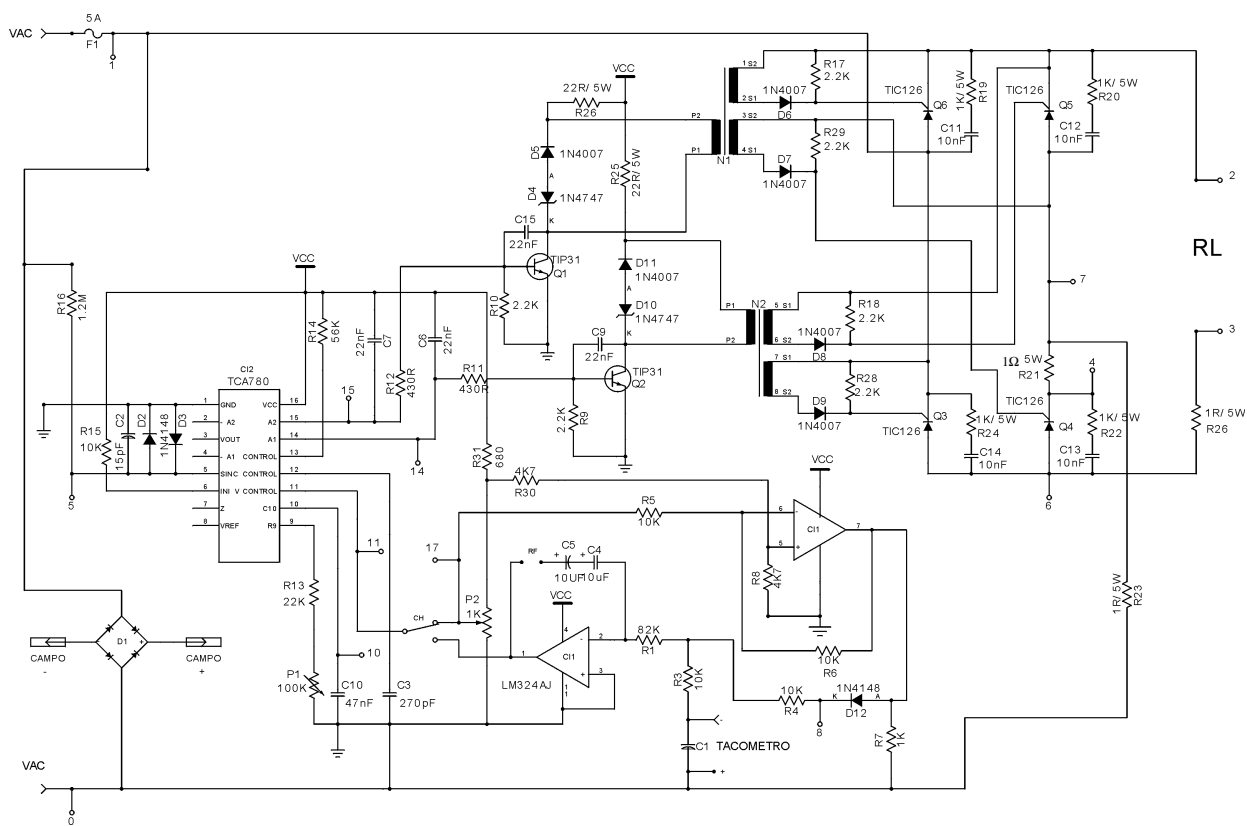


Figura 2.23 Circuito de teste.

Parte Experimental:

2ª Aula

Material:

- Fonte CC com 2 saídas ajustáveis independentes (Minipa 3003)
- Transformador isolador (220V x 110V – 300VA)
- Osciloscópio duplo traço (digital)
- Multímetro (RMS verdadeiro)
- Bancada de motores com motor CC e motor CA
- Circuito de teste
- Lâmpada 25W/127V
- Tacômetro
- Contator trifásico

2.9 Procedimentos iniciais

O circuito de teste (figura 2.21) deve ser alimentado através do transformador isolador (220 V x 110 V). Deste modo é possível realizar medições com o osciloscópio, mesmo que este esteja aterrado.

Uma vez que o motor CC utilizado é de 90 V, será usado um transformador para reduzir a tensão CA a um nível adequado. Para tanto, conecte a tensão fase-neutro (127 V) no lado de 220 V. O circuito será conectado no lado de 110 V. Isto fará com que a tensão CA na entrada do retificador apresente aproximadamente 90 V de pico.

Para evitar acidentes, sempre que for alterar o ponto de teste ou algum componente, é conveniente desenergizar o circuito (desligando o contator). *Recorde-se que o osciloscópio só pode ter um ponto de referência para os 2 canais.*

2.10 Carga RLE (motor de corrente contínua): operação em Malha Aberta (MA)

a) Conecte os terminais de armadura do motor CC na saída do retificador controlado. O enrolamento de campo deve ser conectado na saída do retificador a diodo, disponível na placa de testes.

b) O motor CA, acoplado ao eixo do motor CC, será usado como um freio eletromagnético para o motor CC. Conecte os terminais do *motor CA* à outra saída da *fonte CC*. Eleve a tensão e limite a corrente de modo que circule 1,5 A (a fonte faz esta medição automaticamente). Reduza a tensão ou desconecte o motor CA. **Quando for necessário frear o motor, este é o ajuste que deve ser aplicado.** Ligue o tacômetro e conecte a saída de realimentação à placa de testes.

c) Observe simultaneamente a tensão (ponto 2) e a corrente (ponto 3) (coloque a referência dos canais do osciloscópio no ponto 6) sobre a carga. Anote e comente as diferentes formas de onda que se observa para velocidades de 400, 1800 e 3600 rpm (ou a máxima velocidade que conseguir ajustar). Verifique o ângulo de disparo em cada caso. O ângulo de disparo é medido em relação ao cruzamento por zero da tensão de alimentação.

d) Para a velocidade de 1800 rpm, ligue (rapidamente, para simular um degrau de carga) a alimentação do motor CA, que atua como freio. Observe, anote e comente as alterações na tensão, corrente e velocidade do motor CC.

e) Coloque o osciloscópio na saída analógica do tacômetro (a referência é o ponto 0). Utilize uma base de tempo longa que permita observar o comportamento transitório da velocidade. Comente os resultados.

2.10.1 Carga RLE (motor CC): operação em Malha Fechada (MF)

Na operação em MF, a tensão de controle não vem mais diretamente do potenciômetro, mas sim da saída do controlador.

O compensador utilizado será do tipo PI (fig. 2.24), sendo possível ajustar o valor do ganho proporcional, por meio da troca do resistor R_f . A função de transferência do compensador é:

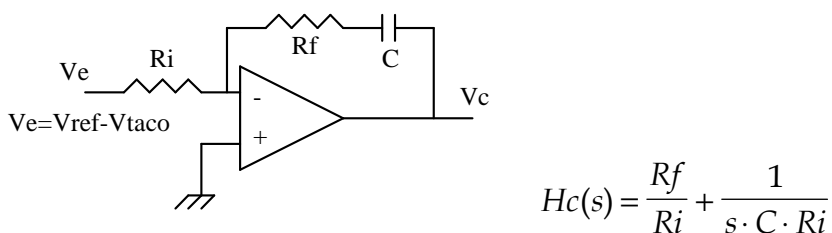


Figura 2.24 Compensador PI

- Desligue o contator. Conecte a saída analógica do tacômetro à placa de testes, obedecendo à convenção de cores dos bornes. Ajuste o potenciômetro para que a tensão que determina a referência de velocidade (ponto 8) seja aproximadamente zero. Coloque um resistor R_f de 220k nos pinos disponíveis junto ao CI dos amplificadores operacionais. Isto implementa um controlador tipo Proporcional+Integral. Passe a chave para a posição de malha fechada (MF). Ligue o contator. **Poderá haver um transitório devido à condição inicial de tensão no capacitor do compensador.**
- Observe simultaneamente os sinais nos pontos 8 (referência de velocidade) e no tacômetro (-), em relação ao ponto 0. A tensão do tacômetro deve ser negativa. Varie a referência até a velocidade estabilizar em 1800rpm.
- Ligue a fonte CC do freio (ajustada previamente em 1,5 A). Observe, registre e comente a resposta do sistema (velocidade, usando a saída analógica do tacômetro e tensão de controle - ponto 11) a este degrau de carga.
- Desligue o motor e a carga (fonte CC). Troque o resistor R_f por um de 10k (o que diminui o ganho proporcional). Repita o procedimento anterior. Observe, registre e comente a resposta do sistema (velocidade e tensão de controle - ponto 11) a este degrau de carga.

2.11 Circuito do tacômetro

O circuito utilizado no tacômetro (figura 2.25) é bastante simples, e não apresenta maiores preocupações com precisão absoluta, no entanto, presta-se bastante bem aos objetivos desta experiência.

O sensor de velocidade é composto por um disco metálico com 60 furos. A detecção é feita por meio de um acoplador ótico, o qual envia o sinal para a placa do tacômetro. Este sinal passa por um comparador, a fim de fornecer, à sua saída, pulsos retangulares e uniformes.

Os pulsos são contados por 3 contadores (de 0 a 9). A cada intervalo de 100ms (estabelecido por um oscilador) faz-se uma leitura. Os valores lidos são armazenados por três "latches". Nas saídas dos "latches" estão conectados decodificadores para "display" de 7 segmentos e

conversores DA. Nas saídas dos CDA têm-se amplificadores operacionais que fazem as somas e ponderações necessárias para a obtenção da saída analógica, necessária para a realimentação. Nos "displays" tem-se uma indicação da velocidade em *dezenas de rpm*.

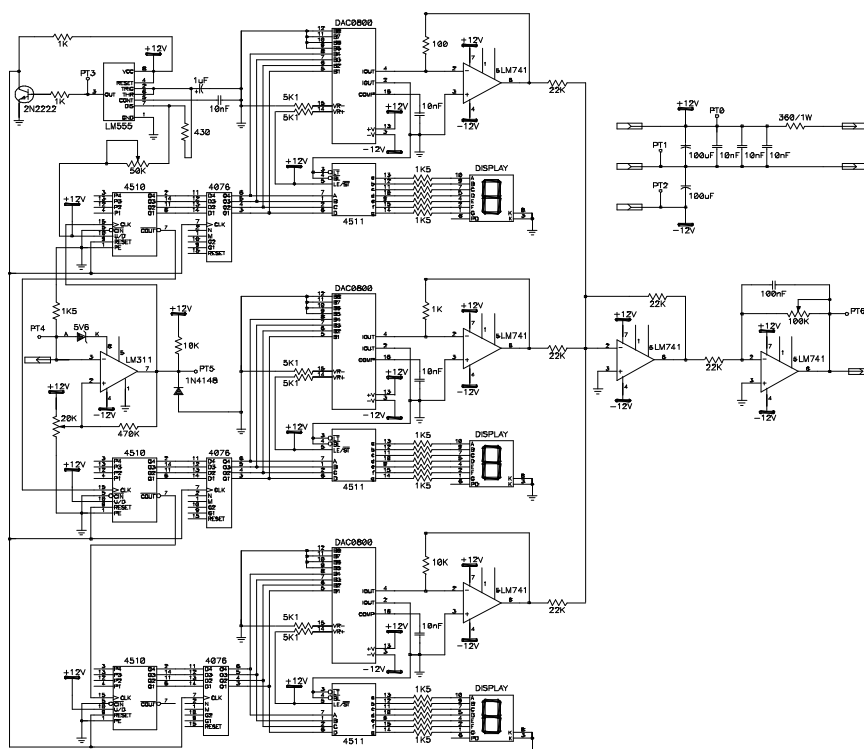


Figura 2.25 Circuito do tacômetro.

RELATÓRIO:

Apresente as formas de onda e *comente* os resultados obtidos na Parte Experimental, incluindo os resultados da 1ª e da 2ª aula.

O relatório deve ser entregue no início da próxima aula.

PREPARAÇÃO PARA A 3ª EXPERIÊNCIA:

Apresente os resultados relativos ao exercício preparatório da 3ª experiência