

CAPÍTULO 5

CIRCUITOS DE DISPARO

5.1. INTRODUÇÃO

Para iniciar a condução o tiristor deve ser disparado. Portanto, é necessário um esquema adequado para prover os pulsos de disparo necessário, com temporização correta.

Os circuitos de disparo devem satisfazer os seguintes requisitos:

- Prover um pulso de forma e dimensão apropriada para cada tiristor, no instante em que deva começar a condução.
- Proporcionar controle do ângulo de atraso para os pulsos sobre o intervalo necessário.
- Introduzir pequeno ou nenhum retardo entre o sinal de controle e a tensão de saída do retificador.
- Manter o tempo adequado entre os pulsos dos tiristores

das diferentes fases (e obviamente não haver diferença de tempo entre os pulsos dos tiristores do mesmo ramo).

Existem relativamente poucos tipos básicos diferentes de circuitos de controle de disparo. Os principais são:

1. Cruzamento por coseno;
2. Cruzamento por rampa;
3. Controle integral;
4. Controle de disparo de fase.

Em seguida são apresentados os dois primeiros métodos em virtude de serem os freqüentemente utilizados nos conversores de excitatrizes estáticas.

5.2. MÉTODOS DE DISPARO DE CRUZAMENTO POR COSENO

Para uma relação proporcional entre a tensão de controle E_c e o coseno do ângulo de disparo ($\cos \alpha \approx E_c$), no modo de operação com continuidade de corrente, a relação resultante entre E_c e a tensão média no campo da máquina é linear, ou seja,

$$\alpha = \arccos(E_c) \quad (5.1)$$

$$E_{fd} \approx E_d \cdot E_c \quad (5.2)$$

A relação desejada, Equação 5.1, entre o ângulo de disparo e a tensão de referência analógica pode ser realizada por meio do método de controle de cruzamento por coseno. O princípio bá

sico, bastante simples, é determinar o ponto de disparo para cada tiristor do ponto de cruzamento de uma "cosenóide" de sincronização com a tensão de controle. A cosenóide de sincronização é derivada da tensão de CA da entrada do conversor, a sua fase é tal que seu pico ocorre no menor ângulo de comutação possível do tiristor ($\alpha = 0^\circ$). Deste modo, a relação de cosseno entre o ângulo de disparo e a tensão de controle é naturalmente linear, já que com esta relação, o conversor controlado torna-se essencialmente um amplificador.

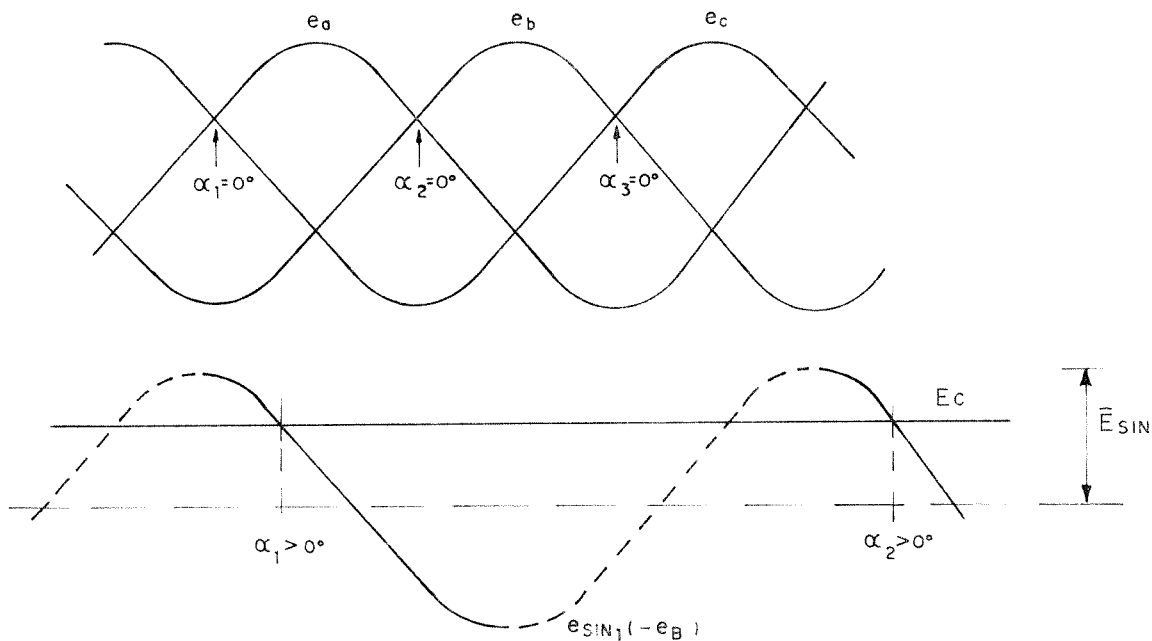


Figura 5.1 - Princípio básico do método de controle de cruzamento por cosseno

O esquema de controle de cruzamento por cosseno está ilustrado pelas formas de onda da Figura 5.1. Cada pulso de disparo é iniciado no ponto em que a cosenóide sincronizada torna-se instantaneamente igual a tensão de controle. Isto é quando

$$\hat{E}_{\sin} \cdot \cos \alpha_i = E_c \quad (5.3)$$

onde

\hat{E}_{\sin} - é o valor de pico da tensão de sincronização.

A Expressão 5.3 para $\hat{E}_{\sin} = 1$ produz a relação desejada:

$$\alpha_i = \arccos(E_c)$$

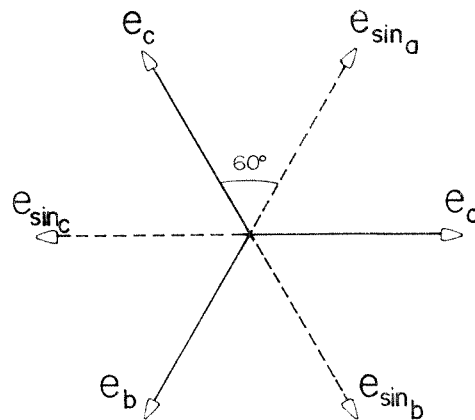


Figura 5.2 - Relação fasorial das cosenóides de sincronização para um retificador de 3 pulsos

A Figura 5.1 ilustra o instante de disparo para um retificador de três pulsos. Neste caso a onda de sincronização deve estar 60° adiantada da respectiva fase a ser disparada, ou seja, a onda de sincronização para disparo das fases A, B e C estarão em fase com $-E_b$, $-E_c$ e $-E_a$ respectivamente, conforme mostrado no diagrama da Figura 5.2. Entretanto, na prática, os sinais em fase com $-E_b$, $-E_c$ e $-E_a$ são obtidos a partir de E_c , E_a e E_b atrasados de 60° por um filtro de 1ª ordem. Esta filtra

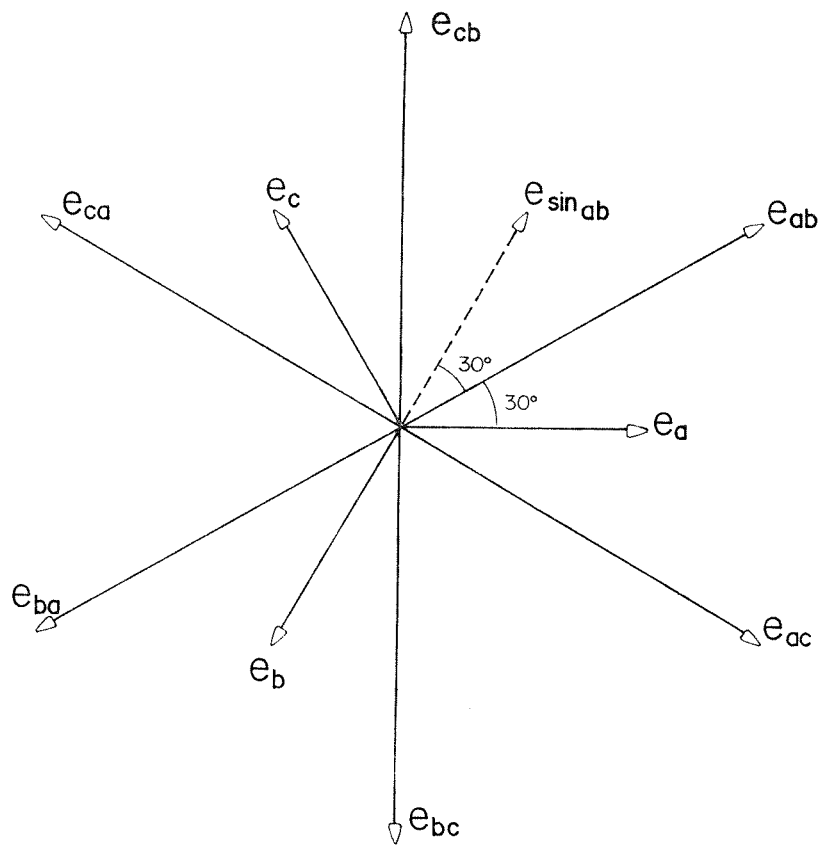


Figura 5.3 - Relação fasorial das cosenóides de sincronização para um retificador de 6 pulsos

gem é desejável para eliminar a presença de harmônicos que alterem a forma de onda do sinal de sincronização.

Na ponte retificadora de seis pulsos a seqüência de disparo é E_{ab} , E_{ac} , E_{bc} , E_{ba} , E_{ca} e E_{cb} , Figura 5.3. Neste caso as ondas de sincronização devem estar 30° adiantadas das respectivas fases a serem disparadas. Assim, para a seqüência acima, as ondas de sincronização estariam em fase com $-E_b$, $-E_c$, $-E_a$, $-E_b$, E_c e E_a respectivamente. Estas relações fasoriais são obtidas a partir dos sinais E_c , E_a , E_b , $-E_c$, $-E_a$ e $-E_b$ atrasados de 60° para a filtragem de harmônicos.

Uma característica natural do método de sincronização de cruzamento por cosenóide é que se as amplitudes das cosenóides de sincronização sofrem variações relacionadas com variações nas amplitudes das tensões de corrente alternada de alimentação do conversor, para uma tensão de controle fixa, a tensão média no campo do gerador permanece constante (teoricamente). A razão para isto é que qualquer variação na amplitude das ondas de sincronização, resulta em um ajuste automático do ângulo de disparo que é o mesmo que manter uma tensão média constante nos terminais do lado de CC do conversor.

5.3. MÉTODO DE DISPARO DE CRUZAMENTO POR RAMPA

Neste caso, a rampa é comparada a um sinal de CC, e o pulso é gerado no ponto de cruzamento, Figura 5.4. A rampa é normalmente um sinal de tensão que eleva-se linearmente sempre

que é detectado o cruzamento por zero da onda de sincronização. Em geral, o controle do ângulo de disparo é efetivado mantendo-se a amplitude da rampa e variando-se o sinal de controle.

No retificador controlado de seis pulsos a tensão de sincronização para o tiristor entre as fases A e B, por exemplo, é a própria tensão E_{ab} com defasagem de 60° devido a filtragem de harmônicos que possam mascarar o cruzamento por zero da onda de sincronização.

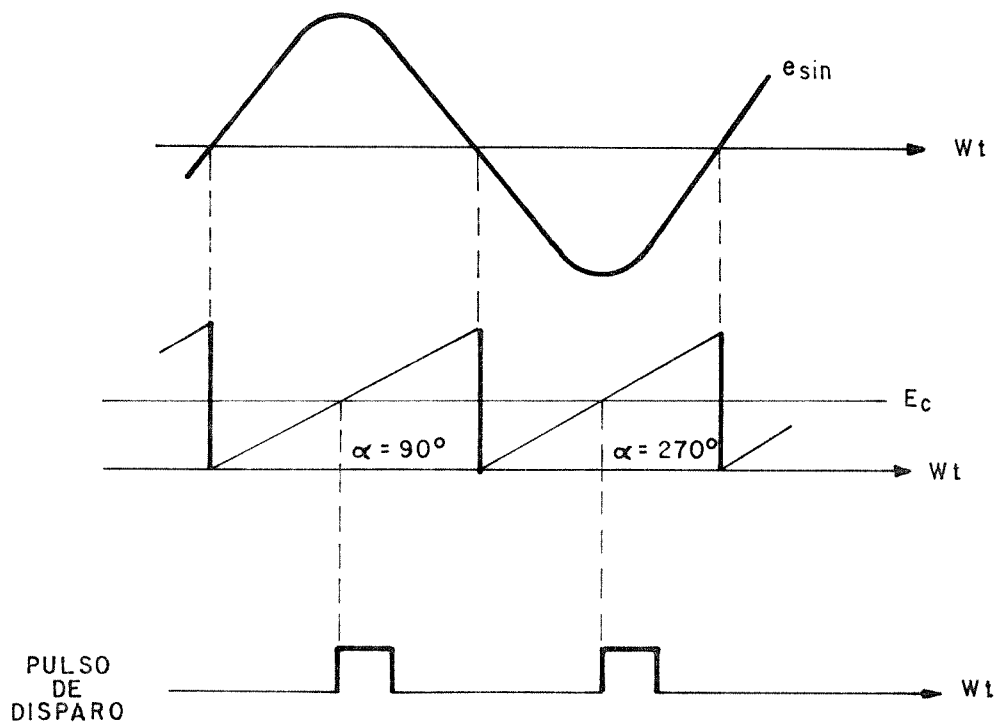


Figura 5.4 - Método de disparo de cruzamento por rampa

A rampa linear resulta em uma função de transferência não linear entre o sinal de controle E_c e $E_{d0}(\alpha)$. Neste caso, pode-se obter uma função de transferência linear através do condicionamento do sinal de controle a uma característica de

coseno obtida por segmentos de reta devidamente ajustadas, Figura 5.5.

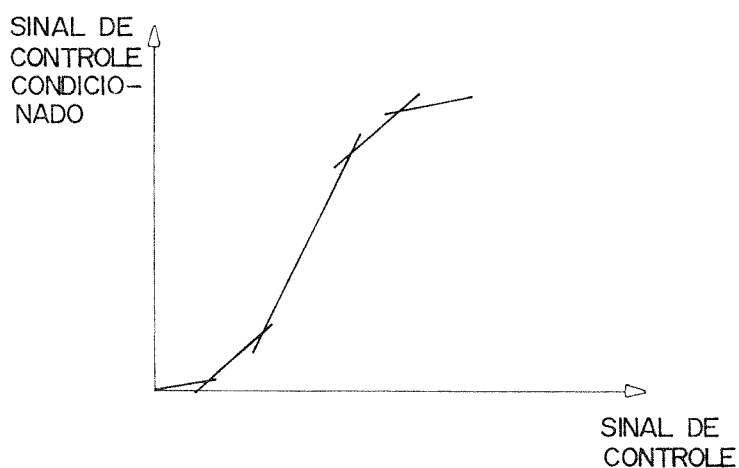


Figura 5.5 - Característica de arcoseno obtida a partir de segmentos de reta

5.4. PULSOS DE DISPARO

Os pulsos de disparo devem, obviamente, ser de dimensão e formato apropriado para o gatilho do tiristor. Um disparo apropriado depende em parte da rapidez do tempo de subida do pulso, que geralmente, está na faixa de 0,1 a 1,0 μ s. Os tiristores podem disparar em 1,0 μ s até possivelmente 50 μ s. Entretanto, como a corrente de gatilho necessária para o disparo é função do tempo de aplicação do pulso e atinge a saturação em aproximadamente 100 μ s, utiliza-se no mínimo esta duração.

O enrolamento de campo das máquinas síncronas é uma carga substancialmente indutiva para a ponte retificadora, mesmo pulsos de 2 ms não garantirão o estabelecimento da corrente de campo. Em uma carga indutiva, a corrente eleva-se lentamente e pode não atingir o valor de *holding* antes do término do pulso. O tiristor, então, bloqueia e interrompe a corrente. Na próxima fase a ser disparada ocorre o mesmo processo e a corrente não se estabelece na carga.

Para garantir o estabelecimento de corrente no enrolamento de campo, é necessário um pulso com extensão de 120° para os retificadores trifásicos em ponte, ou seja, a extensão do pulso é igual ao período de condução de um ramo. Estes pulsos longos também podem ser adiantados para $\alpha = 0^\circ$ sem que haja perigo de falha de condução devido a uma tensão de anodo baixa. Por outro lado, os pulsos longos são mais difíceis de serem gerados e necessitam muito mais potência do circuito de disparo.

5.5. PRINCÍPIO DE UM CIRCUITO GERADOR DE PULSO

A Figura 5.6 mostra um diagrama funcional simplificado de um gerador de pulso, para disparo de um dos ramos de um retificador controlado, baseado no método de disparo de cruzamento por coseno. A combinação de dois ou seis canais deste permite disparar uma ponte retificadora monofásica totalmente controlada ou trifásica totalmente controlada, respectivamente.

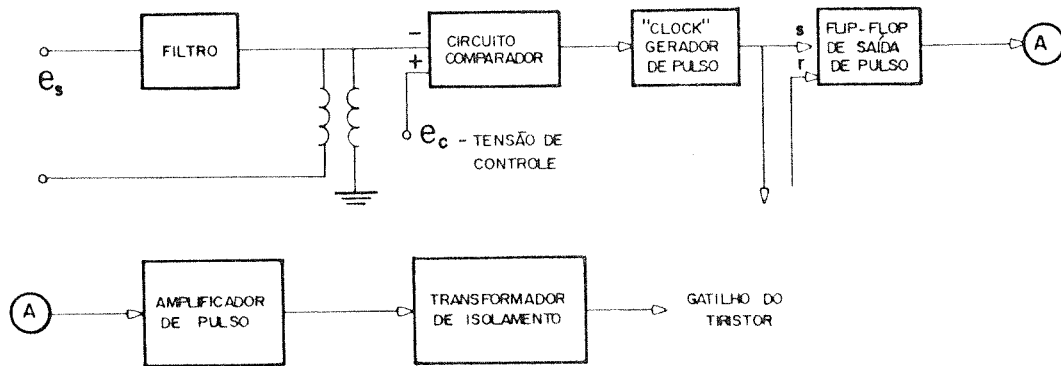


Figura 5.6 - Diagrama funcional simplificado de um gerador de pulso usando o princípio de cruzamento por cosseno

No circuito da Figura 5.6 a tensão de sincronização E_{sin} é obtida, através de um filtro e um transformador de isolamento, da tensão de entrada do conversor, a aplicada ao terminal negativo de entrada do comparador; a tensão de controle E_c é aplicada ao outro terminal. Quando E_{sin} é maior do que E_c a saída do comparador é zero. Quando E_{sin} é menor que E_c a saída do comparador é positiva e com um valor adequado para produzir um pulso sincronizado no circuito de pulso, Figura 5.7. O pulso sincronizado habilita o bi-estável de saída de pulso, iniciando assim um pulso de disparo neste canal que pode ser amplificado para adequar sua potência àquela necessária ao disparo do tiristor. O bi-estável de saída de pulso é reconduzido a condição anterior, nível nulo na saída, pelo pulso sincronizado (clock) do canal relativo a próxima fase a ser disparada. Assim, a extensão do pulso de disparo é automaticamente ajustada

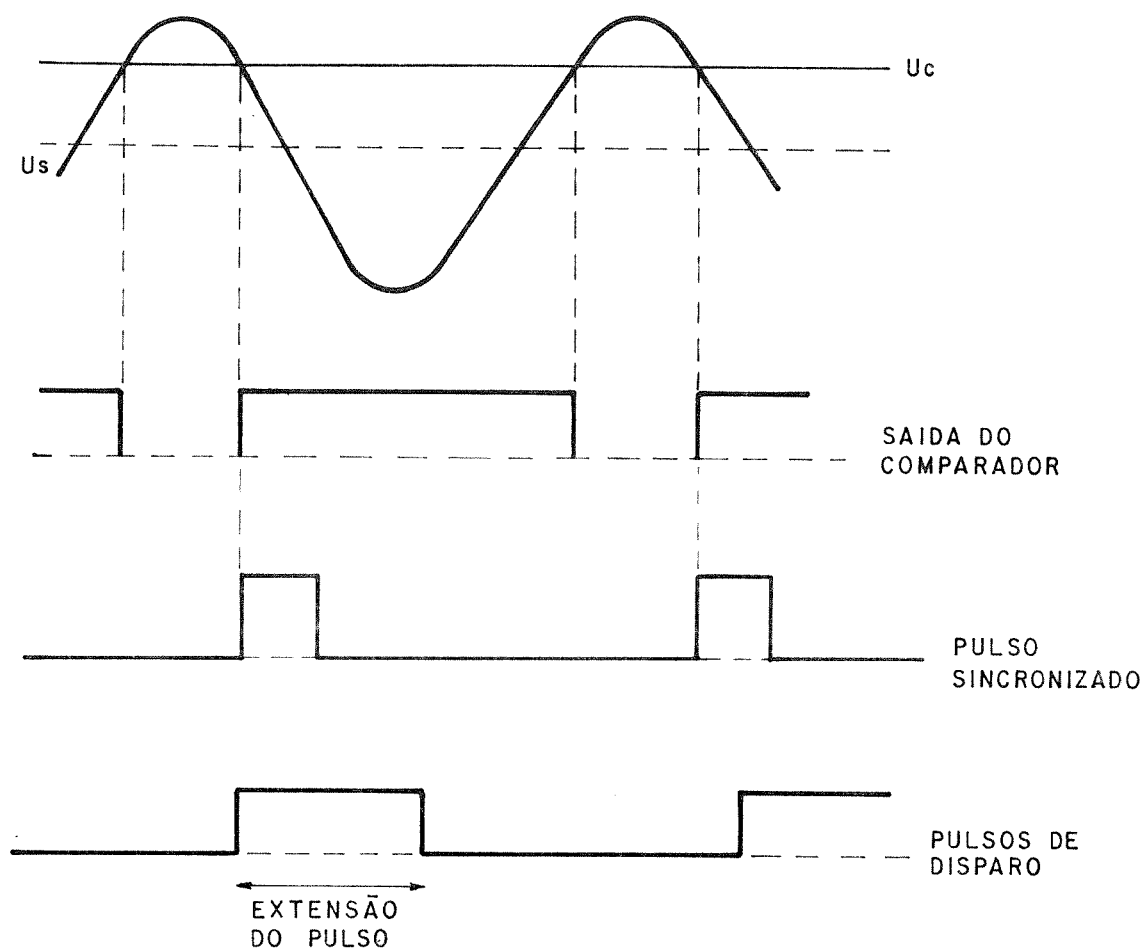


Figura 5.7 - Princípio de funcionamento do método de cruzamento por coseno

para cobrir o período de tempo completo entre instantes de disparo consecutivos, independente do ângulo de disparo. No retificador trifásico de onda completa, por exemplo, o pulso de disparo do tiristor 1 é bloqueado pelo pulso de disparo do tiristor 3 que por sua vez é bloqueado pelo pulso do tiristor 5. Da mesma forma nos tiristores ligados ao polo negativo da ponte o pulso para o tiristor 2 é bloqueado pelo do tiristor 4 que por sua vez é bloqueado pelo pulso de disparo do tiristor 6 e assim sucessivamente.

No método de disparo de cruzamento por rampa, a estrutura do circuito de disparo difere basicamente no circuito comparador, Figura 5.8. Neste caso, o gerador de rampa é inserido entre a tensão de sincronização e o comparador. Este circuito gera uma rampa de amplitude constante a cada cruzamento por zero da tensão de sincronização. Os demais elementos do circuito de disparo podem ser os mesmos da Figura 5.6.

5.6. CONTROLE DOS LIMITES DO ÂNGULO DE DISPARO

Tem sido considerado que a operação do circuito gerador de pulsos é tal que os pulsos de disparo são produzidos em qualquer ponto entre 0° e um ângulo limite levemente menor que 180° . Na prática, pode haver uma tendência, sob algumas condições, para o ângulo de disparo ser movido para fora dos limites da faixa de controle permissível. Na ausência de um controle de limites de ângulo de disparo, isto pode ocasionar a perda ou a inefetividade dos pulsos, com conseqüentes falhas de comutação no conversor; geralmente, o resultado é um modo de operação intolável, se não catastrófico.

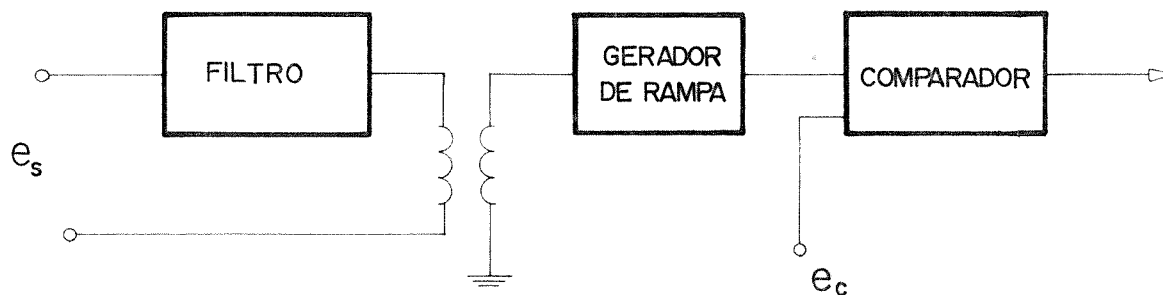


Figura 5.8 - Diagrama fasorial simplificado de um gerador de pulso pelo princípio do cruzamento por rampa

Na prática é, então, essencial incorporar alguns dispositivos ao circuito de geração de pulsos para garantir que o ângulo de disparo não exceda os limites da faixa de controle segura.

Para os circuitos de disparo baseados no cruzamento por coseno e cruzamento por rampa um método simples de garantir que o ângulo de disparo esteja dentro da faixa desejada é ajustar um limite na possível faixa de variação da tensão de controle vista pelo circuito comparador, de modo que esta tensão esteja sempre dentro dos níveis pico a pico da onda de sincronização. Desta forma é garantido que sempre há um ponto de cruzamento entre as tensões de sincronização e de controle, e por isso não deve haver falta de pulsos. Ao mesmo tempo pode-se obter uma garantia contra falhas de comutação ajustando-se adequadamente o nível limite de tensão de referência na região de operação inversora ($\alpha > 90^\circ$).

Embora satisfatório para o cruzamento por rampa, este método tem suas limitações quando aplicado ao cruzamento por coseno, devido ao fato de que qualquer deslocamento na tensão do limitador, assim como na tensão efetiva de comparação (devido a variações de temperatura, etc.), bem como qualquer variação na amplitude de tensão de sincronização, são refletidas como variações correspondentes nos limites da faixa de controle dos ângulos de disparo. Evidentemente, é viável se projetar um circuito limitador bastante sofisticado que seja, pelo menos parcialmente, auto compensado contra estes efeitos. Entretanto, devido à tendência inerente a deslocamentos nos circuitos analógicos deste tipo deve-se permitir ajustar os limites nominais da faixa de controle dentro de uma margem segura dos limites teóri-

cos. Os efeitos de deslocamento são minimizados utilizando-se circuitos digitais.

5.7. CIRCUITO DE ISOLAMENTO DE PULSOS

Devido aos níveis diferentes de isolamento de tensão entre o circuito de carga do conversor e os circuitos de controle e também para se evitar curto-circuito na fonte de alimentação do regulador é necessário o uso de transformador de pulso, atuando como um elo de isolamento entre os tiristores do circuito gerador de pulso. Provendo-se vários secundários separados no transformador de pulso, é possível produzir pulsos de disparo simultâneos para vários tiristores. Esta característica é útil quando se emprega conexões em série ou em paralelo, ou, por exemplo, quando é necessário disparar simultaneamente pares de tiristores localizados em ramos diferentes do conversor (ponte retificador de onda completa monofásica, por exemplo).

O projeto do transformador de saída de pulso apresenta problemas, por ter que satisfazer especificações conflitantes. Assim, uma condição importante é que o acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário seja o mais "ajustado" possível, de modo a manter a indutância de dispersão baixa, e garantir que o tempo de subida do pulso de saída não seja significativamente prejudicado pelo próprio transformador de saída. Uma segunda condição, conflitante, é que o nível de isolamento entre os enrolamentos deve ser relativamente alto, de modo que as diferenças de potencial entre os enrolamentos, aplicadas como

um resultado da operação normal do circuito conversor, possam ser suportadas.

5.7.1. ARRANJOS DOS CIRCUITOS ISOLADORES DE PULSO

O circuito de isolamento de pulso mais simples compreende um transformador de pulso, conectado diretamente ao coletor de um transistor de saída, como na Figura 5.9. Quando o transistor é levado a saturação, a tensão E_{CC} é aplicada ao primário do transformador de pulso; isto ocasiona um pulso de tensão correspondente ao secundário do transformador, que está conectado ao gatilho do tiristor a ser disparado. Quando o transistor é bloqueado, a corrente de magnetização circulando no primário do transformador é desviada pelo diodo, D; em consequência, a tensão no enrolamento é invertida, e o fluxo no núcleo do transformador é extinto por esta tensão reversa, que corresponde a queda no sentido direto do diodo.

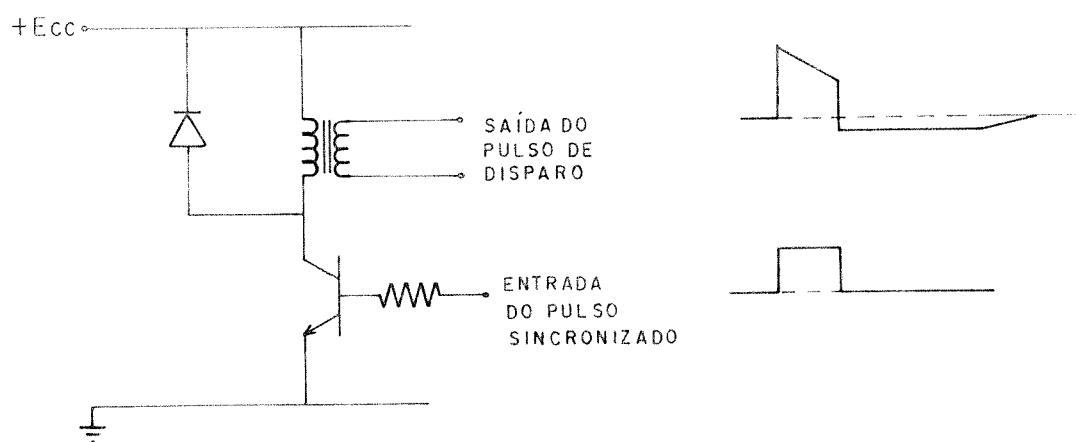


Figura 5.9 - Estágio de saída do circuito simples de isolamento de pulso

Este circuito simples, embora bastante utilizado, possui certos inconvenientes. Primeiro, a corrente de magnetização do transformador é unidirecional; assim o fluxo no núcleo do transformador também é unidirecional, e a utilização do núcleo é baixa. Como resultado da componente de corrente contínua, geralmente é necessário usar um núcleo com entreferro; isto resulta em uma corrente de magnetização relativamente grande, e esta corrente tem que ser suportada pelo transistor de chaveamento, além da componente de corrente normal de saída. Devido a estas considerações, de modo a manter as dimensões físicas do transformador de pulso dentro de limites razoáveis, este circuito simples para o estágio de saída de isolamento de pulso geralmente só é utilizado para transmitir pulsos de curta duração. Deste modo, este circuito não é bem utilizado com pulsos de disparo de 120° , que na maioria das vezes é a extensão utilizada nos retificadores das excitatrizes estáticas.

Um meio de produzir pulso de disparo longo com um transformador de pulso pequeno, é excitar o transformador com uma onda quadrada de alta frequência. Esta onda de tensão quadrada é retificada no secundário do transformador, fornecendo um pulso de disparo contínuo.

A Figura 5.10 mostra, de forma simplificada, um estágio de saída de pulso utilizando um oscilador de onda quadrada para transmitir um pulso longo ao gatilho do tiristor, por meio de um transformador de pulso de alta frequência.

O circuito é projetado para que o oscilador seja acionado e bloqueado de acordo com o sinal de comando. O pulso de disparo de saída é, para propósitos práticos, completamente con

tínuo, e sua duração corresponde precisamente à duração do sinal de entrada do oscilador.

Um arranjo alternativo é utilizar um único oscilador, continuamente operando, para todos os canais de saída de pulso de disparo. A saída deste oscilador é chaveada para os vários transformadores de pulso na seqüência desejada. O arranjo está mostrado simplificadaamente na Figura 5.11.

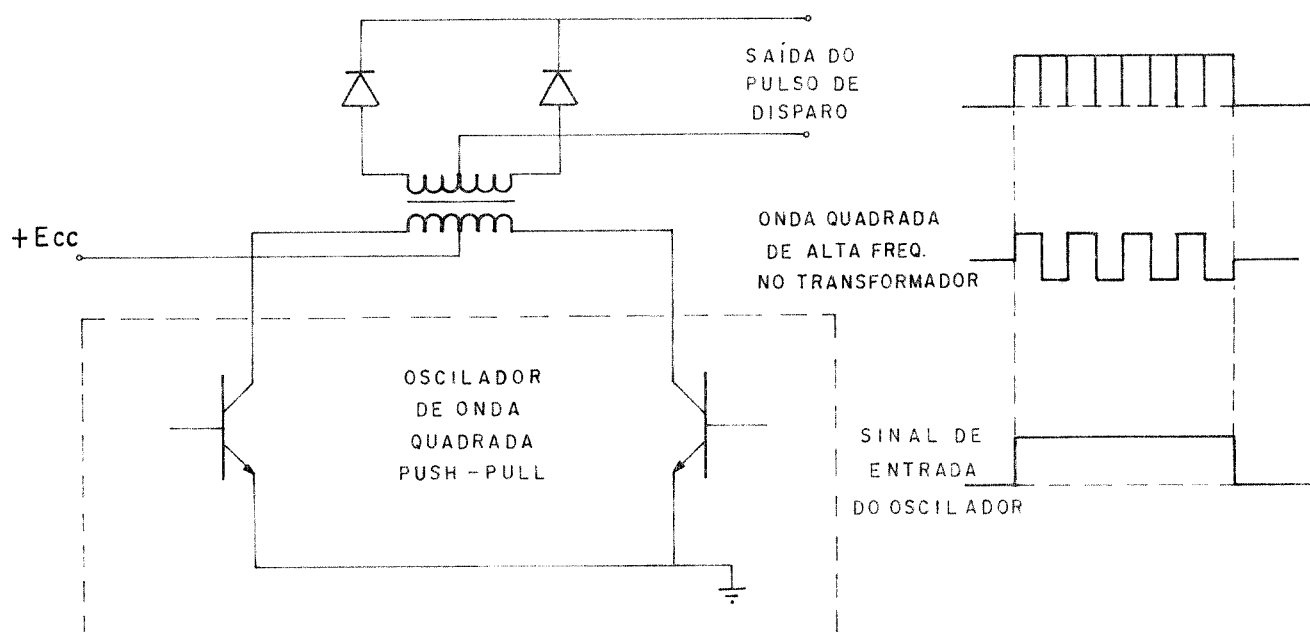


Figura 5.10 - Representação simplificada de um estágio de saída de pulso, utilizando oscilador de alta frequência

Como este esquema utiliza somente um oscilador para todos os canais de saída, o circuito geralmente é mais simples e de menor custo que o esquema de osciladores individuais da Figura 5.10.

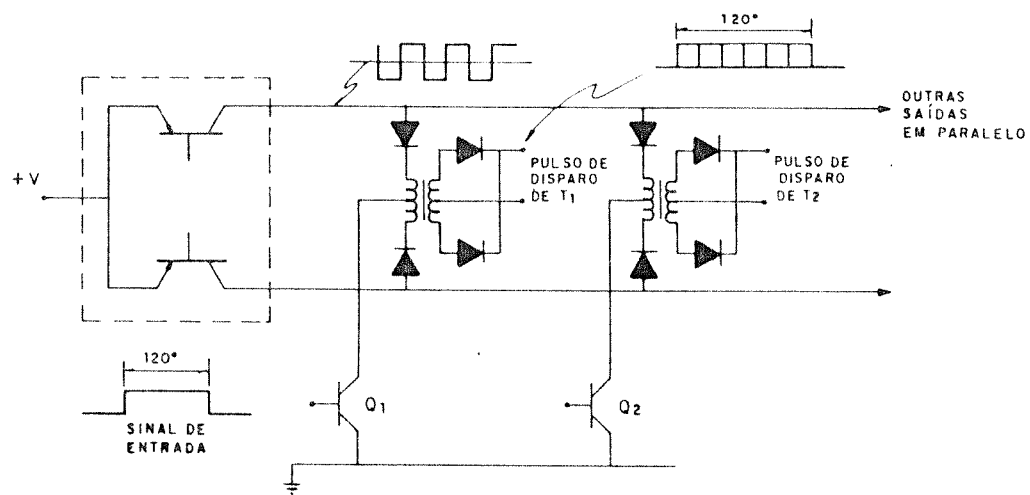


Figura 5.11 - Representação simplificada do estágio de saída de pulsos utilizando um único oscilador para todos os canais de saída