

PEA2502 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

RETIFICADOR TRIFÁSICO EM PONTE CONTROLADO

W. KAISER 02/2009

1. OBJETIVOS

Estudo do funcionamento de uma ponte trifásica a tiristores controlada e semicontrolada.

2. INTRODUÇÃO

Os retificadores trifásicos de uma forma geral são utilizados para médias e altas potências, sendo a ponte a configuração mais importante pelas vantagens que oferece quanto ao aproveitamento de transformadores, simetria e modularidade.

Um retificador controlado, como conjunto, é um conversor a tiristores que transforma corrente alternada em corrente unidirecional, cujo nível é controlado através de um comando manual (malha aberta) ou automático, utilizando um ou mais elos de realimentação.

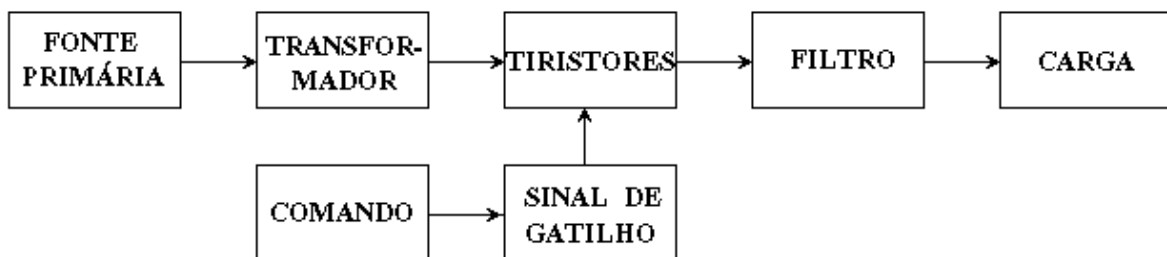


Fig. 1 - Diagrama de blocos de um retificador controlado

No equacionamento dos retificadores será utilizada a simbologia apresentada na seqüência:

- α - ângulo de disparo;
- E_o - tensão CC média em vazio com ângulo $\alpha = 0^\circ$;
- E_{cc} - tensão CC média em carga;
- E - tensão média normalizada ($E = E_{cc}/E_o$);
- E_m - valor de pico da tensão fase-neutro em vazio;
- $E_{m_{linha}}$ - valor de pico da tensão fase-fase (de linha) em vazio $E_{m_{linha}} = \sqrt{3} \cdot E_m$;
- X_c - impedância da fonte por fase (reatância de comutação);
- I_{cc} - corrente CC média na carga;
- I_s - valor de pico da corrente CA de curto circuito entre 2 fases ($I_s = E_{m_{linha}}/2X_c$);
- I - valor médio da corrente CC normalizada ($I = I_{cc}/I_s$);
- μ - ângulo de comutação;

3.1. PONTE TRIFÁSICA TOTALMENTE CONTROLADA

Admitindo-se semicondutores ideais, corrente CC constante (indutância de filtro elevada) e o retificador operando na região de comutação simples (condução simultânea de no máximo três dispositivos) pela teoria idealizada valem as seguintes relações:

$$\mathbf{E}_{cc} = \mathbf{Eo}_{3F2C} \cdot \cos \alpha - \left[\frac{3}{\pi} \cdot \mathbf{X}_c \right] \cdot \mathbf{I}_{cc} \text{ e } \mathbf{Eo}_{3F2C} = \frac{3}{\pi} \cdot \mathbf{Em}_{linha} \quad (1)$$

Adotando-se \mathbf{Eo}_{3F2C} e $\mathbf{Is} = \frac{\mathbf{Em}_{linha}}{2 \cdot \mathbf{Xc}}$ como valores de base para a tensão e a corrente CC respectivamente, os valores normalizados para $\mathbf{E} = \mathbf{Ecc}/\mathbf{Eo}_{3F2C}$ e $\mathbf{I} = \mathbf{Icc}/\mathbf{Is}$ obedecem as seguintes relações:

$$\mathbf{E} = \cos \alpha - 0,5 \cdot \mathbf{I} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \frac{\cos \alpha + \cos(\mu + \alpha)}{2} \quad (3)$$

As equações (1),(2) e (3) são válidas somente no intervalo $0 \leq \mu \leq \pi/3$, no qual ocorre comutação simples. Para $\mu > \pi/3$ as comutações passam a ser múltiplas e o seu equacionamento é complexo.

Substituindo-se (2) em (3) obtém-se uma relação entre α , μ e \mathbf{I} , expressa pela equação (4), cuja representação gráfica é apresentada na fig. 2.

$$\mathbf{I} = \cos \alpha - \cos(\mu + \alpha) \quad (4)$$

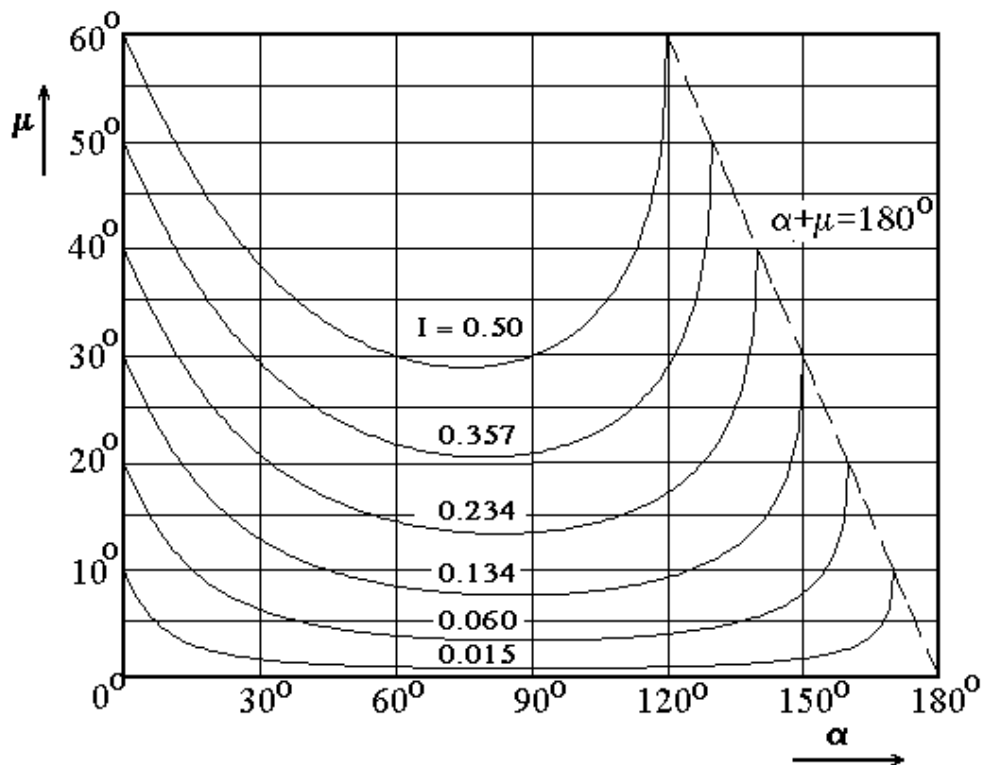


Fig. 2 - Curva $\mu = f(\alpha, I)$

O fator de potência de uma ponte pode ser aproximado pela expressão:

$$FP = \frac{I_{RMS\ fund}}{I_{RMS\ total}} \cdot \cos \varphi \cong \frac{\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{cc}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_{cc}} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (5)$$

3.2. PONTE TRIFÁSICA SEMICONTROLADA

A ponte trifásica híbrida é constituída por três tiristores com ânodo (catodo) comum e três diodos com catodo (ânodo) comum, incluindo-se um diodo de continuidade para evitar problemas com perda de controle no caso de cargas fortemente indutivas. A tensão em vazio na saída do retificador em função do ângulo de disparo, é dada por:

$$E = \frac{3}{2\pi} \cdot E_{m\ linha} \cdot [1 + \cos \alpha] \quad (6)$$

Os fenômenos de comutação na ponte híbrida são complexos devido a assimetria resultante do controle em apenas um semi-ciclo (positivo ou negativo) das tensões da rede.

4. CIRCUITO DE POTÊNCIA

A fig. 3 apresenta o arranjo didático onde serão realizadas as medições das características dos retificadores. O arranjo é constituído de uma fonte de alimentação utilizando três transformadores monofásicos ligados convenientemente para se obter, na sua saída, uma tensão trifásica com valor eficaz de linha igual a 31 V.

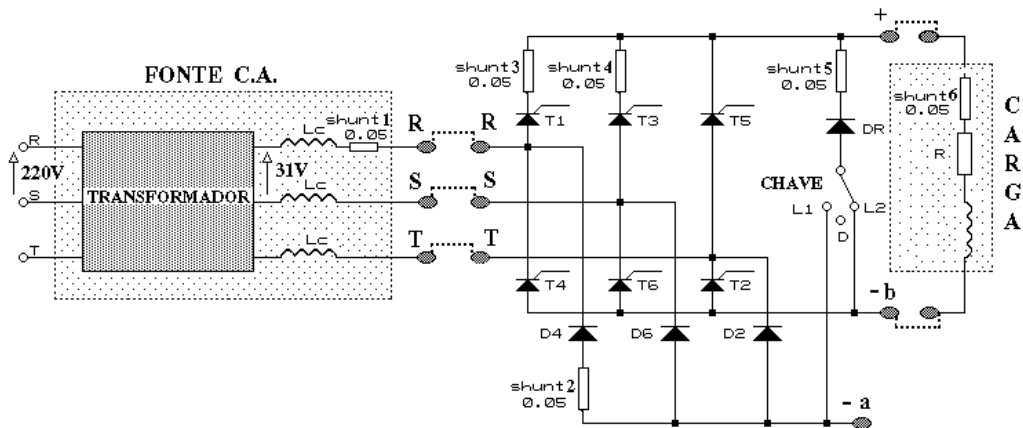


Fig. 3 - Esquema básico do arranjo experimental

O bloco fonte representa um sistema CA com corrente de curto-circuito limitada pela reatância dos indutores, para permitir a visualização dos efeitos de comutação. A fonte de alimentação é conectada, através de fios de ligação, a uma ponte trifásica a tiristores controlada. O controle foi implementado utilizando-se três CIs TCA 785, com inclinação de rampa fixa e controle de nível através de um único potenciômetro (figura 4). Cada tiristor recebe dois pulsos de gatilhamento: i) o primeiro no instante previsto, determinado pelo ângulo α e ii) o segundo, denominado de confirmação, encontra-se defasado de 60° do primeiro e corresponde ao início da comutação subsequente que ocorre no semi-ciclo oposto e envolve as outras duas fases da alimentação. Para realização do sincronismo, foram utilizados transformadores de sincronismo, cujo primário é alimentado pelas tensões de linha (antes da reatância de comutação), adequadamente escolhidas para permitir uma variação do ângulo de disparo de $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 180^\circ$.

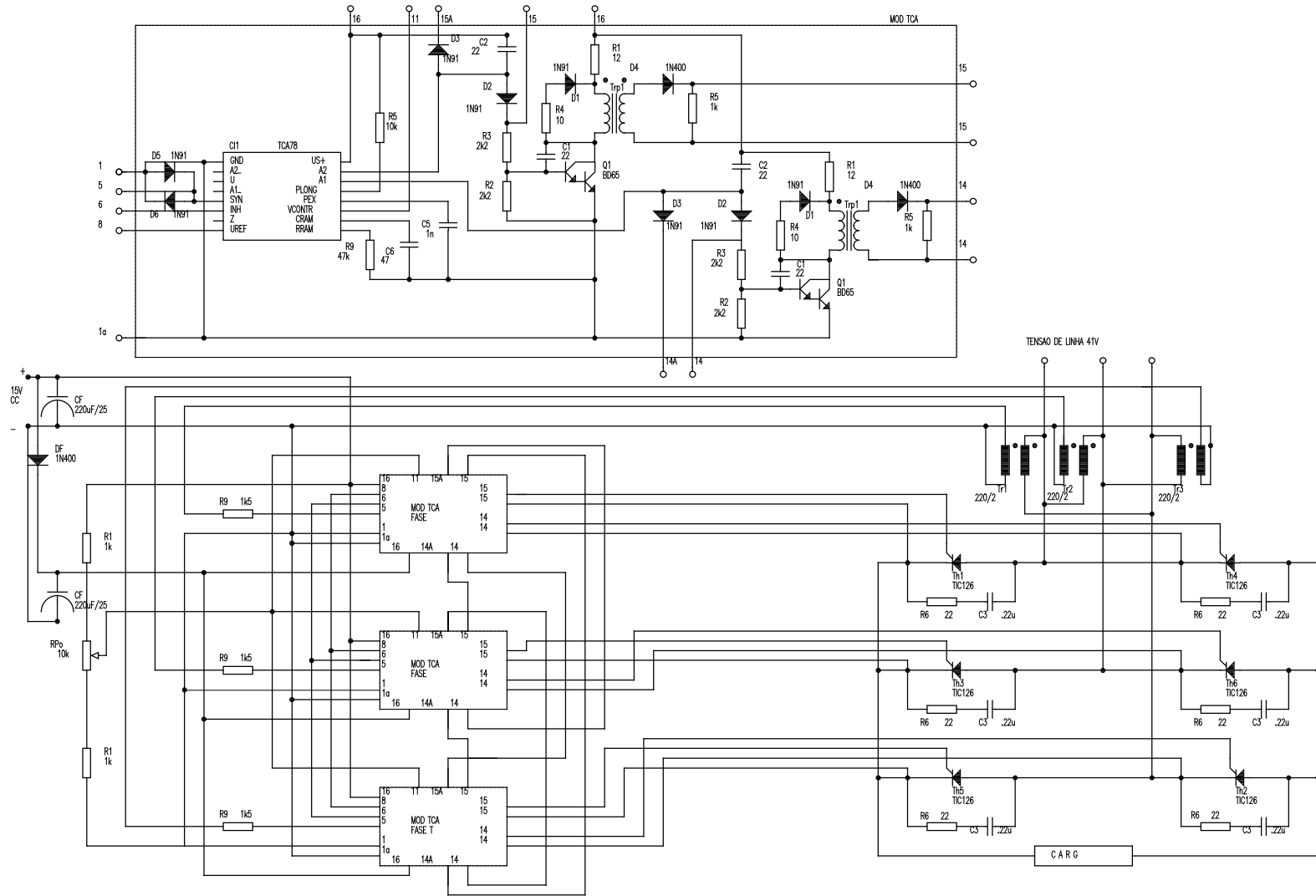


Fig. 4. - Diagrama esquemático dos circuitos de potência e controle

Como carga deve ser utilizado apenas o módulo disponível que permite a implementação de cargas resistivas e resistivo-indutivas e um reostato de fio de 50 W. As medições de corrente são efetuadas sobre shunts, sendo neste caso recomendada a utilização de uma ponta de prova de osciloscópio sem atenuação (x1), ou um multímetro digital para medições de valores médios ou eficazes.

5. PARTE PRÁTICA

A parte prática é dividida em duas partes: a) análise do retificador trifásico em ponte totalmente controlado e b) análise do retificador trifásico em ponte semicontrolado.

5.1. Determinação da reatância interna por fase da fonte.

Ligar o arranjo didático na rede, observando a **seqüência de fase correta** conforme indicações no cabo de ligação. Obter o espectro e medir o valor de pico da forma de onda da tensão de linha entre as fases R e S com a fonte em vazio. Em seguida colocar em curto circuito as duas fases da fonte e, utilizando uma ponta de prova de ganho unitário (atenuação x1), medir o valor de pico da corrente no shunt. Calcular o valor da reatância de comutação por fase e comparar com o valor nominal. (A indutância do reator externo ligado a cada fase é de 11.7 mH).

5.2. Ponte trifásica totalmente controlada

5.2.1. Carga resistivo-indutiva (RL).

Desligar a fonte da rede através da botoeira da bancada. Colocar a **chave**, localizada na base do arranjo experimental ao lado do potenciômetro, na **posição "trifásico"**. Interligar as fases **R**, **S** e **T** dos módulos da fonte e do retificador.

Mantendo o diodo de retorno **DR** fora do circuito (**chave na posição D**), ligar uma carga RL ($R=30\ \Omega$, $L=130\ \text{mH}$) entre as saídas + e -**b** do retificador e ajustar o ângulo de disparo em aproximadamente $\alpha=60^\circ$ (Lembre-se que o ângulo de disparo é medido a partir da passagem por zero da tensão de linha. Portanto basta medir simultaneamente as tensões de linha V_{TR} e a tensão sobre o tiristor **T1** ou a corrente de linha).

Registrar as formas de onda abaixo. Utilize o cursor do osciloscópio para medir os ângulos de disparo e comutação.

Ponta de prova canal 1	Ponta de prova canal 2
Corrente na fase R e espectro	Tensão de linha V_{TR}
Tensão sobre T1	Tensão de linha V_{TR}
Tensão sobre T1	Corrente em T1
Corrente de carga. (tensão sobre o resistor de carga)	Tensão CC na saída do retificador

B) Medir com multímetro:

- b1) o valor médio da tensão na carga;
- b2) o valor médio da corrente na carga (tensão sobre o resistor);

C) Análise das medições:

- c1) Indicar os ângulos de disparo e comutação em cada um dos registros efetuados. Comparar o ângulo de comutação com o valor calculado. Justificar eventuais desvios;
- c2) Explicar trecho a trecho as deformações da tensão de linha na entrada do retificador;
- c3) Confrontar o valor médio da tensão na carga medido com o valor teórico calculado.

- c4) Medir o fator de potência e confrontar com o valor obtido pela expressão (5). Justificar eventuais desvios.

5.2.2. Carga resistiva.

Mantendo o mesmo ângulo de disparo, colocar a indutância da carga em curto-circuito tornando a carga resistiva ($R=30\ \Omega$). Registrar as formas de onda de corrente e tensão de linha e comparar com as medições do item anterior. Comentar diferenças.

5.2.3. Característica E x I com carga RL.

Mantendo o ângulo de disparo em $\alpha=60^\circ$ inserir novamente o indutor na carga e substituir a resistência por $10\ \Omega$. Medir com um multímetro os valores médios de corrente e tensão CC, bem como sua resistência total de carga. Com osciloscópio medir o ângulo μ . Calcular os valores de E, I e μ e comparar com os valores teóricos. Comentar e justificar eventuais desvios. Repita o procedimento para um resistor de $5\ \Omega$.

5.2.4. Característica $\mu = f(\alpha)$.

Levantar a curva $\mu = f(\alpha)$ para $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ mantendo a corrente de carga fixa em $I_{cc} = 600\ \text{mA}$. Para medir a corrente, utilize um multímetro digital medindo a tensão sobre o shunt do módulo de carga. Para ajustar a corrente em cada ponto, varia-se a resistência de carga inserindo o reostato de $50\ \Omega$ fornecido em série com uma associação conveniente dos resistores discretos do módulo de carga.

Comparar a curva experimental com os valores teóricos obtidos a partir da expressão (4) (figura 2), comentando eventuais desvios. Explicar o aspecto da curva obtida.

5.3. Ponte trifásica semicontrolada

Desligar a fonte da rede através da botoeira da bancada. Inserir o diodo de retorno **DR** no circuito (**chave na posição L1**) e ligar uma carga **RL** ($R=30\ \Omega$, $L=130\ \text{mH}$) entre as saídas + e - **a** do retificador.

5.3.1. Registro de formas de onda.

A) Registrar as formas de onda da tensão e corrente na carga para $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ e 120° . Em cada registro indique os ângulos de disparo e comutação.

B) Mantendo a carga do item anterior, ajustar o ângulo de disparo em $\alpha=120^\circ$ e registrar as formas de onda abaixo:

Ponta de prova canal 1	Ponta de prova canal 2
Corrente na fase R e espectro	Tensão de linha V_{SR}
Corrente na fase R	Tensão sobre D4
Corrente na fase R	Tensão sobre T1
Corrente em DR	Tensão sobre DR

C) Análise das medições:

c1) Indicar os ângulos de disparo e comutação em cada um dos registros efetuados. Identifique e associe a cada ângulo de comutação quais semicondutores conduzem simultaneamente.;

c2) A partir da corrente no diodo de retorno calcular o valor da indutância de carga e comparar com o valor nominal ($L= 130\ \text{mH}$) fornecido. Qual a função do diodo de retorno na ponte híbrida e quais situações podem ser críticas?

c3) Explicar trecho a trecho as deformações da tensão de linha na entrada do retificador;

c4) Comparar os espectros da corrente de linha das pontes controlada e semicontrolada.

5.3.2. Registrar as formas de onda da corrente e tensão de linha CA para $\alpha=50^\circ$ e $\alpha=70^\circ$.
Variar o ângulo α numa faixa de 55 até 65 graus e comentar o fenômeno observado.

6. RELATÓRIO

O relatório deverá conter as formas de onda e gráficos acompanhados de uma análise da consistência dos dados experimentais baseada nas previsões teóricas. As explicações solicitadas devem acompanhar os registros de forma de onda correspondente, facilitando a leitura e a utilização do relatório como material de estudo.

6.1 Análise teórica

Elaborar um diagrama, que relacione os pulsos de disparo (inclusive o pulso de confirmação) de cada um dos tiristores para $\alpha = 30^\circ$, com as suas respectivas tensões de sincronismo. Desenhar as formas de onda das tensões de fase e linha que achar convenientes, admitindo seqüência de fase positiva. Indicar quais as tensões de sincronismo necessárias para cada um dos CIs TCA 785 Para que serve o pulso de confirmação? (Sugestão: Analise o caso de uma carga resistiva).