

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

### MÓDULO 1

## RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS E FATOR DE POTÊNCIA

### ASPECTOS TEÓRICOS

Neste Módulo o estudante terá contato com o conversor de potência do tipo CA-CC, ou seja, um retificador. Serão estudados retificadores não controlados, ou seja, os que utilizam apenas diodos, verificando os comportamentos para diferentes tipos de cargas conectadas no lado CC do retificador. Serão analisados conversores monofásicos e trifásicos. Será também discutida a questão e a importância do "Fator de Potência" enquanto indicativo de *qualidade* da energia elétrica.

Na parte experimental tem-se, além do conteúdo específico deste módulo, a introdução ao uso de equipamentos e métodos de medição que serão utilizados durante o curso.

#### 1.1 Retificadores não controlados monofásicos

O fornecimento de energia elétrica é feito, essencialmente, a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada, devido, principalmente, à facilidade de adaptação do nível de tensão por meio de transformadores.

Em muitas aplicações, no entanto, a carga alimentada exige uma tensão contínua. A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados *retificadores*.

Os retificadores podem ser classificados segundo a sua capacidade de ajustar o valor da tensão de saída (controlados x não controlados); de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, hexafásico, etc.); em função do tipo de conexão dos elementos retificadores (meia ponte x ponte completa).

Os retificadores não controlados, tema desta experiência, são aqueles que utilizam diodos como elementos de retificação.

Os diodos de potência diferem dos diodos de sinal por terem uma capacidade superior em termos de nível de tensão de bloqueio (podendo atingir até alguns kV, num único dispositivo), e poderem conduzir correntes de até alguns kA.

Nas aplicações em que a tensão alternada é a da rede, tais diodos não precisam ter seu processo de desligamento muito rápido, uma vez que a frequência da rede é baixa (50 ou 60 Hz).

Usualmente topologias em meia ponte não são aplicadas. A principal razão é que, nesta conexão, a corrente média da entrada apresenta um nível médio diferente de zero. Tal nível contínuo pode levar elementos magnéticos presentes no sistema (indutores e transformadores) à saturação, o que é prejudicial ao sistema. Topologias em ponte completa absorvem uma corrente média nula da rede, não afetando, assim, tais elementos magnéticos.

A figura 1.1 mostra o circuito e as formas de onda com carga resistiva para um retificador monofásico com topologia de meia-ponte, também chamado de meia-onda.

A figura 1.2 mostra topologias de onda completa, considerando os três tipos básicos de carga: resistiva, capacitiva e indutiva.

Com carga resistiva (fig. 1.2.a) as formas de onda da tensão e da corrente na saída do retificador e na carga são as mesmas, como mostrado na figura 1.3. A corrente de entrada apresenta-se com a mesma forma e fase da tensão.

O retificador com carga capacitiva (fig. 1.2.b) faz com que a tensão de saída apresente-se alisada, elevando o seu valor médio em relação à carga resistiva. O capacitor carrega-se com a tensão de pico da entrada (desprezando a queda nos diodos). Quando a tensão de entrada se torna menor do que a tensão no capacitor os diodos ficam bloqueados e a corrente de saída é fornecida

exclusivamente pelo capacitor, o qual vai se descarregando, até que, novamente, a tensão de entrada fique maior, recarregando o capacitor. A forma de onda da corrente de entrada é muito diferente de uma senóide, apresentando pulsos de corrente nos momentos em que o capacitor é recarregado, como mostrado na figura 1.4.

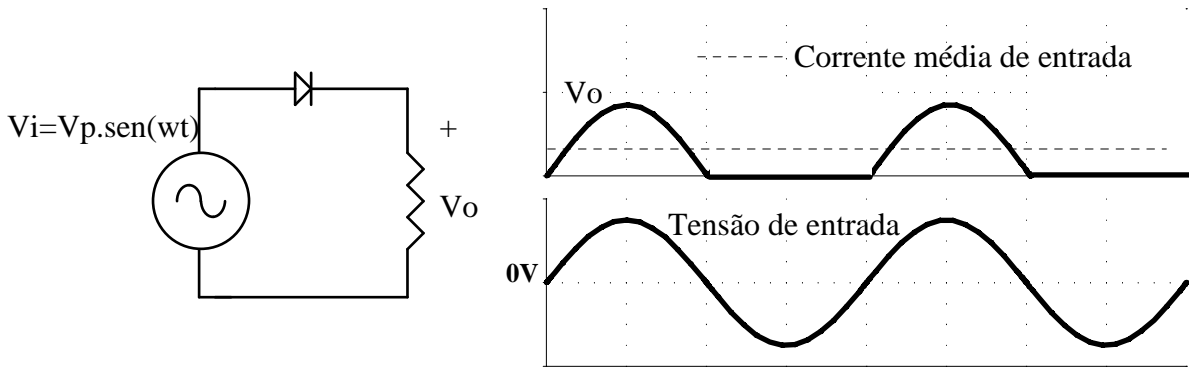


Figura 1.1 Topologia e formas de onda (com carga resistiva) de retificador monofásico não controlado, meia-onda.

Para o retificador com carga indutiva (fig. 1.2.c), a carga se comporta como uma fonte de corrente. Dependendo do valor da indutância, a corrente de entrada pode apresentar-se quase como uma corrente quadrada, como mostrado na figura 1.5. Para valores reduzidos de indutância, a corrente tende a uma forma que depende do tipo de componente à sua jusante. Se for apenas uma resistência, tende a uma senóide. Se for um capacitor, tende à forma de pulso, mas apresentando uma taxa de variação ( $di/dt$ ) reduzida.

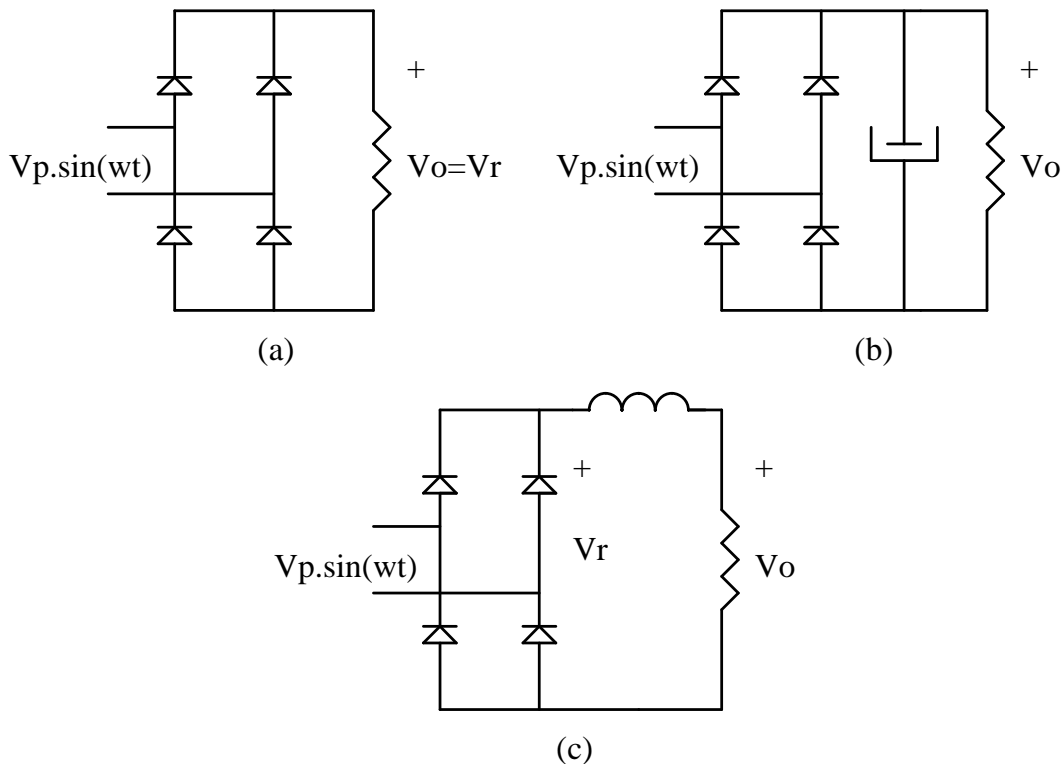


Figura 1.2 Retificadores monofásicos não controlados, de onda-completa.

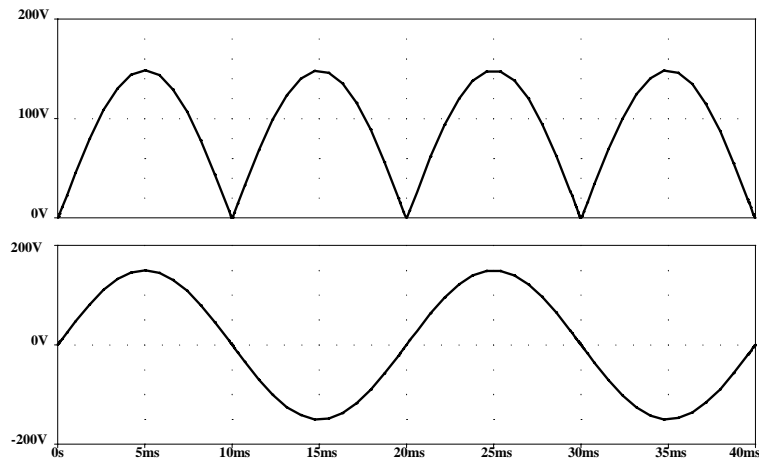


Figura 1.3. Formas de onda para retificador com carga resistiva.

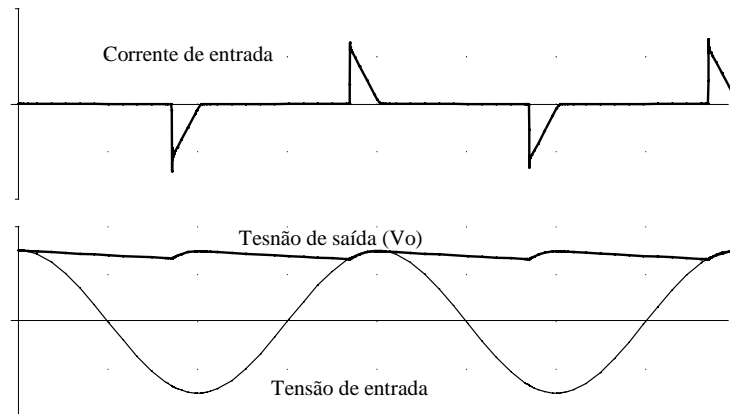


Figura 1.4 Formas de onda para retificador monofásico não controlado, onda completa, com carga capacitiva.

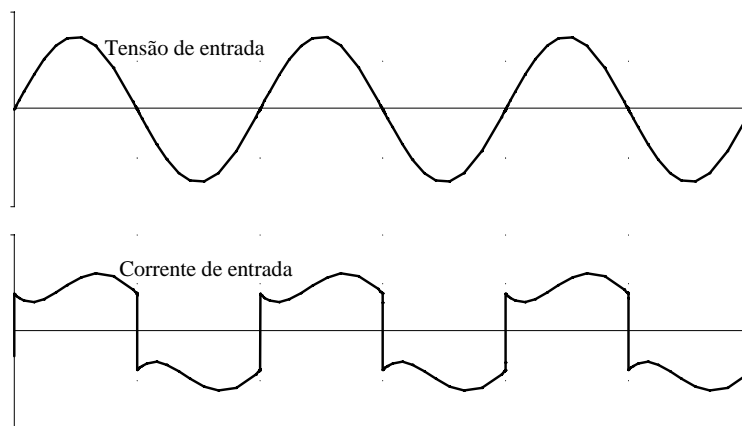


Figura 1.5. Formas de onda para retificador monofásico, onda-completa, não controlado, alimentando carga indutiva.

### 1.2 Retificadores não controlados com entrada trifásica

Quando a potência da carga alimentada se eleva, normalmente são utilizados retificadores trifásicos a fim de, distribuindo a corrente entre as três fases, evitar desequilíbrios que poderiam ocorrer caso a corrente fosse consumida de apenas uma ou duas fases.

Neste caso a corrente é fornecida, a cada intervalo de 60 graus, por apenas duas das três fases. Poderão conduzir aquelas fases que tiverem, em módulo, as duas maiores tensões. Ou seja, a fase que for mais positiva, poderá levar o diodo a ela conectado, na semiponte superior, à condução. Na semiponte inferior poderá conduzir o diodo conectado à fase com tensão mais negativa.

### 1.3 Comutação

Para qualquer tipo de retificador, nos instantes que ocorre a transferência de corrente de um par de diodos para outro, caso exista alguma indutância presente na conexão de entrada, esta transição não pode ser instantânea.

Quando a alimentação é feita por meio de transformadores este fenômeno se acentua, embora ocorra sempre, uma vez que as linhas de alimentação sempre apresentam alguma característica indutiva. Em tais situações, que representam os casos reais, durante alguns instantes estão em condução simultânea o diodo que está entrando em condução e aquele que está sendo desligado. Isto significa, do ponto de vista da rede, um curto-circuito aplicado após as indutâncias de entrada,  $L_i$ . A tensão efetiva na entrada do retificador será a **média** das tensões presentes nas fases. Tal distorção é mostrada na figura 1.6, num circuito trifásico alimentando carga indutiva. A soma das correntes pelas fases em comutação é igual à corrente drenada pela carga.

Quando termina o intervalo de comutação, a tensão retorna à sua forma normal (neste caso em que o  $di/dt$  em regime é nulo).

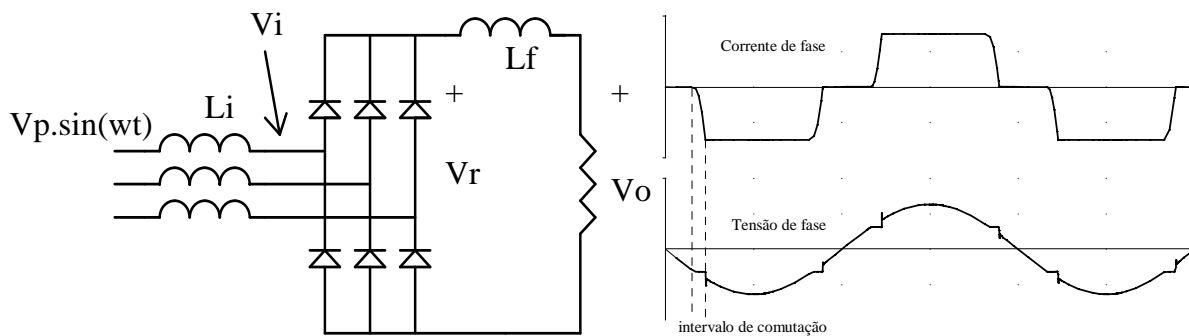


Figura 1.6. Topologia de retificador trifásico, não controlado, com carga indutiva. Formas de onda típicas, indicando o fenômeno da comutação.

Quando a carga é capacitiva, as indutâncias de entrada atuam no sentido de reduzir a derivada inicial da corrente, como mostrado na figura 1.7. Neste caso, como a corrente apresenta-se variando, as mesmas indutâncias apresentarão uma queda de tensão, de modo que a tensão  $V_i$  mostra-se significativamente distorcida. Como a corrente circula, em cada intervalo, apenas em duas fases, não se configura o fenômeno da comutação.

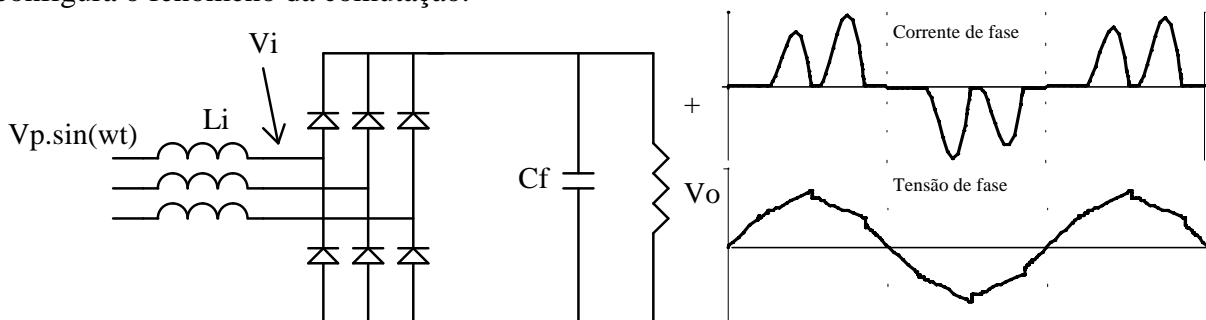


Figura 1.7. Topologia de retificador trifásico, não controlado, com carga capacitiva e formas de onda típicas, indicando o fenômeno da distorção da tensão devido à distorção da corrente.

## 1.4 Desempenho de retificadores

### 1.4.1 Lado CC

O que normalmente se deseja no lado CC de um retificador é que a tensão apresente o nível médio especificado com uma ondulação (*ripple*) dentro de limites dados pela aplicação.

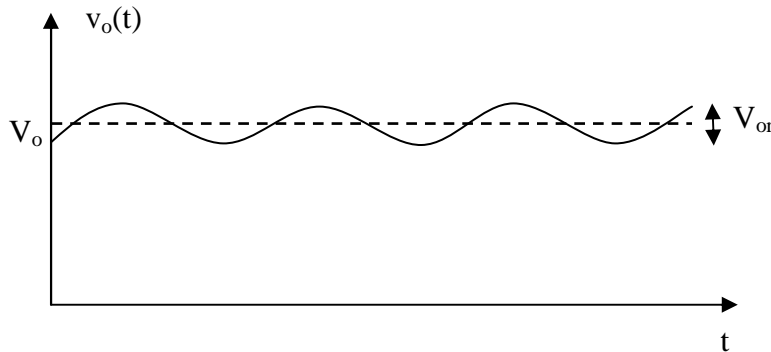


Figura 1.8 Forma de onda esquemática da tensão de saída de um retificador

Definições:

$V_o$ : valor médio da tensão de saída

$V_{or}$ : Valor pico-a-pico apenas da ondulação da tensão de saída

$V_{oCA}$ : Valor eficaz apenas da ondulação da tensão de saída

$V_{oef}$ : Valor eficaz da tensão de saída (inclui valor médio e ondulação)

$$V_{oef} = \sqrt{V_o^2 + V_{oCA}^2}$$

#### 1.4.1.1 Fator de Forma da tensão de saída

$$FF_o = \frac{V_{oef}}{V_o}$$

Quanto mais  $FF_o$  se aproxima da unidade, mais bem filtrada é a tensão de saída.

#### 1.4.1.2 Fator de “ripple”

$$FR = \frac{V_{oCA}}{V_o}$$

Quanto mais o  $FR$  se aproxima de zero, melhor a filtragem da tensão de saída.

Ambos os fatores estão, obviamente, relacionados. No entanto, pode-se encontrar seja uma ou a outra definição nas especificações de uma fonte CC.

### 1.4.2 Rendimento

Rendimento é a relação entre a potência ativa de saída e a potência ativa na entrada do conversor. Ou seja, seu complemento representa as perdas do conversor. Uma vez que as perdas dependem da corrente, o valor é especificado à potência nominal. Em inglês usa-se o termo “efficiency”.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i}$$

No lado CC, sob a hipótese de que a ondulação da tensão seja pequena (menor que 10%), a potência ativa pode ser calculada com pequeno erro a partir do valor médio  $V_o$ . Caso a ondulação seja elevada, um valor mais preciso se obtém utilizando o valor eficaz,  $V_{\text{of}}$ .

### 1.4.3 Lado CA

#### 1.4.3.1 Fator de Potência

A atual regulamentação brasileira do fator de potência estabelece que o mínimo fator de potência (FP) das unidades consumidoras é de 0,92, com o cálculo feito por média horária. O consumo de reativos além do permitido (0,425 varh para cada Wh) é cobrado do consumidor. No intervalo entre 6 e 24 horas isto ocorre se a energia reativa absorvida for indutiva e das 0 às 6 horas, se for capacitiva [1.1].

No entanto, tais definições foram estabelecidas considerando que a corrente tem uma forma senoidal, o que não é a realidade em situações em que se tem um retificador (carga não linear) conectado à rede.

O baixo fator de potência é penalizado, pois implica em uma “ocupação” da rede física com passagem de corrente sem que, junto à carga, se realize o correspondente trabalho (potência ativa). Dado que o sistema é essencialmente remunerado pela energia ativa consumida (Wh), a imposição de limites mínimos de FP representa o objetivo de uso da infraestrutura para, efetivamente, produzir trabalho útil.

Considere, para efeito das definições posteriores, o esquema:

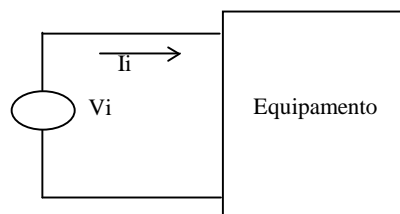


Figura 1.9 Circuito genérico utilizado nas definições de FP

#### Definição de Fator de Potência

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente de um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem, desde que periódicas (período T).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{ief} \cdot I_{ief}}$$

Note-se que a realização deste cálculo a partir de medidores digitais é extremamente simples. A partir da amostragem da tensão e da corrente, determina-se a potência instantânea pelo produto de ambas as amostras. O cálculo da potência ativa é simplesmente resultante da divisão do valor acumulado de potência ativa (portanto tem-se uma medida de energia ativa) pelo número de amostras em um período.

Para obter a potência aparente, preliminarmente são calculados os valores eficazes e depois se faz o produto:

$$V_{ief} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} v_i^2 \cdot dt} \quad I_{ief} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_i^2 \cdot dt}$$

Em um sistema com **formas de onda senoidais**, a equação anterior torna-se igual ao cosseno da defasagem entre as ondas de tensão e de corrente:

$$FP_{\text{seno}} = \cos \phi$$

Quando apenas a tensão de entrada for senoidal, o FP é expresso por:

$$FP_{V_{\text{seno}}} = \frac{I_1}{I_{\text{ief}}} \cdot \cos \phi_1$$

Neste caso, a potência ativa de entrada é dada pela média do produto da tensão (senoidal) por todas as componentes harmônicas da corrente (não senoidal). Esta média é nula para todas as harmônicas exceto para a fundamental, devendo-se ponderar tal produto pelo cosseno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente.

Desta forma, o fator de potência é expresso como a relação entre o valor eficaz da componente fundamental da corrente e a corrente eficaz de entrada, multiplicada pelo cosseno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente.

A relação entre as correntes é chamada de *fator de forma da corrente* (FFi) e o termo em cosseno é chamado de *fator de deslocamento da fundamental* (FD). Ou seja, no caso de tensão senoidal, o fator de potência é o produto do fator de forma da corrente pelo fator de deslocamento da fundamental.

$$FP_{V_{\text{seno}}} = \text{FFi} \cdot \text{FD}$$

Por sua vez, o valor RMS da corrente de entrada também pode ser expresso em função das componentes harmônicas:

$$I_{\text{ief}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Define-se a Taxa de Distorção Harmônica (TDH, também chamada de Distorção Harmônica Total - DHT) como sendo a relação entre o valor RMS das componentes harmônicas da corrente e a fundamental:

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Assim, o FP pode ser reescrito como:

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + \text{TDH}^2}}$$

É evidente a relação entre o FP e a distorção da corrente absorvida da linha. Neste sentido, existem normas internacionais que regulamentam os valores máximos das harmônicas de corrente que um dispositivo ou equipamento pode injetar na linha de alimentação.

Observe que, do ponto de vista do procedimento de cálculo do FP, é muito mais simples utilizar a definição que qualquer outro método.

Quando a forma de onda da corrente se apresenta com simetria de ¼ de onda, ou seja, quando entre 90° e 180° a forma repete, de modo espelhado, o que ocorreu entre 0° e 90° (o mesmo valendo para o semiciclo negativo), pode-se afirmar que a componente fundamental da cruza o zero nos mesmos instantes que a corrente. Com isso é possível determinar “por inspeção”, ou seja, pela observação da forma de onda, o *fator de deslocamento da fundamental*.

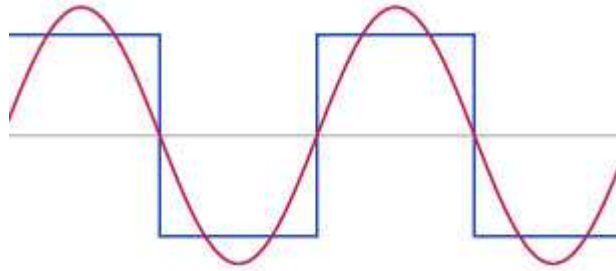


Figura 1.10 Onda quadrada e sua componente fundamental.

#### 1.4.3.2 Fator de Crista

É a relação entre o máximo valor instantâneo atingido pela corrente ( $I_{ip}$ ) e o valor eficaz.

$$FC = \frac{I_{ip}}{I_{ief}}$$

Assim, uma onda senoidal tem  $FC=1,41$ ; onda quadrada tem  $FC=1$ .

Essa grandeza é utilizada em algumas aplicações, pois o valor elevado de FC significa que o circuito apresenta um valor instantâneo de corrente muito maior do que o valor eficaz, o que tem implicações sobre o dimensionamento dos componentes que devem conduzir tal corrente.

#### 1.4.4 A necessidade de modernização da legislação

A legislação brasileira (considerando as definições da ANEEL) é anacrônica, uma vez que não usa a potência aparente na definição do FP. Ao invés disso, coloca no denominador “a raiz quadrada da potência (ou energia) ativa ao quadrado somada com a potência (ou energia) reativa ao quadrado”, ou seja:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

O principal problema desta formulação é que não existe uma definição precisa do que seja “potência reativa” em situações não senoidais. Note que a definição a partir da potência aparente se aplica a qualquer forma de onda, desde que periódica.

A pergunta é, portanto, por que a legislação não faz uso da definição de potência aparente para definir o Fator de Potência?

A resposta tem a ver com a realidade tecnológica dos primórdios da eletrificação. No início do século passado foram desenvolvidos medidores de potência ativa para tarifação dos usuários. Tais medidores eletromecânicos (“relógios”) se baseiam na produção de um movimento de rotação de um disco metálico o qual, associado a um mecanismo de engrenagens, aciona um contador, registrando, efetivamente, a integral no tempo da potência elétrica, ou seja, a energia ativa (kWh). Tal equipamento ainda é utilizado na maioria das unidades consumidoras no Brasil.

Nas instalações industriais, nas quais se controla a demanda de potência reativa, o medidor eletromecânico segue o mesmo procedimento, mas com uma alteração construtiva que resultava no movimento do disco na presença de corrente defasada de  $90^\circ$  da respectiva tensão.

Com isso, as concessionárias obtêm as energias ativa e reativa, determinando o fator de potência.

Por outro lado, a obtenção da potência aparente exige a medição dos valores eficazes de tensão e corrente. Isso também é facilmente feito com medidores eletromecânicos do tipo “ferro móvel”. No entanto, realizar o produto de ambas as variáveis (analógicas), não é tão simples.



As formas de medição, atualmente, são completamente diferentes, uma vez que os medidores eletrônicos (digitais) são capazes de processar algoritmos quaisquer e, portanto, podem fazer os cálculos que representam exatamente o que se deseja medir.

O que urge é a modernização da legislação brasileira, superando procedimentos antiquados e errados que não mais possuem justificativa conceitual ou tecnológica.

### 1.5 Normas IEC 61000-3-2: Distúrbios causados por equipamento conectado à rede pública de baixa tensão

Esta norma [1.2] refere-se às limitações das harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação. Aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, conectado a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V. Para tensões inferiores, os limites não foram estabelecidos. A Emenda 14, de janeiro de 2001 inseriu algumas alterações nas definições das classes e nos métodos de medidas, devendo vigorar a partir de 2004. Em 2006 tem-se uma nova edição e, em 2009, novas emendas foram adicionadas. As emendas normalmente se referem à inclusão de procedimentos classificatórios de equipamentos ou à definição de novos procedimentos de testes.

Em todas essas versões os equipamentos são classificados em quatro classes:

**Classe A:** Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.

**Classe B:** Ferramentas portáteis e equipamentos de soldagem não profissionais.

**Classe C:** Dispositivos de iluminação com potência acima de 25 W.

- Para potência igual ou inferior a 25 W e exclusivamente para lâmpadas de descarga, aplicam-se os limites da classe A ou ainda: a terceira harmônica da corrente, expressa como uma porcentagem da corrente fundamental, não pode exceder 86% e a quinta harmônica não deve exceder a 61%. Além disso, a forma de onda da corrente de entrada deve estar em conformidade com a figura 3.9. Isto é, deve superar os 5% de limiar de corrente antes ou em  $60^\circ$ , ter seu pico, antes ou em  $65^\circ$  e não cair abaixo do limiar de 5% de corrente antes de  $90^\circ$ , com referência a qualquer cruzamento por zero da fundamental da tensão de alimentação.
- Reguladores de intensidade para lâmpadas incandescentes (*dimmer*), aplicam os limites da classe A.

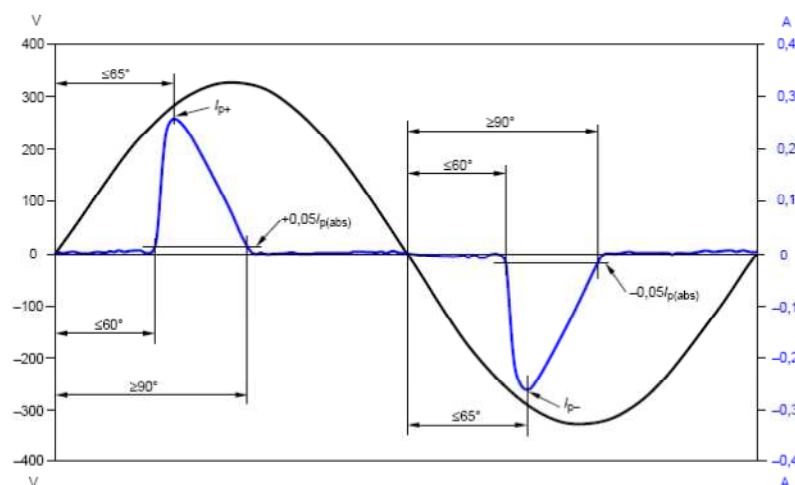


Figura 1.9 Forma de onda referência de corrente para dispositivo de iluminação com lâmpada de descarga e potência menor ou igual a 25 W.

**Classe D:** Equipamentos de TV, computadores pessoais e monitores de vídeo. A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida esta feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento).

A Tabela I indica os valores máximos para as harmônicas de corrente

Tabela I: LIMITES PARA AS HARMÔNICAS DE CORRENTE

Ordem da Harmônica (n)	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente[A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (≤ 600 W) [mA/W]	Classe D máximo
Harmônicas Ímpares					
3	2,30	3,45	30.FP	3,4	2,30
5	1,14	1,71	10	1,9	1,14
7	0,77	1,155	7	1,0	0,77
9	0,40	0,60	5	0,5	0,40
11	0,33	0,495	3	0,35	0,33
13	0,21	0,315	3	0,296	0,21
15≤n≤39	2,25/n	3,375/n	3	3,85/n	2,25/n
Harmônicas Pares					
2	1,08	1,62	2		
4	0,43	0,645			
6	0,3	0,45			
8≤n≤40	1,83/n	2,76/n			

FP: fator de potência

### 1.5.1 Desvantagens do baixo fator de potência (FP) e da alta distorção da corrente

Consideremos aqui aspectos relacionados com o estágio de entrada de fontes de alimentação. As tomadas da rede elétrica doméstica ou industrial possuem uma corrente (RMS) máxima que pode ser absorvida (tipicamente 15A nas tomadas domésticas).

A figura 1.9 mostra uma forma de onda típica de um circuito retificador alimentando um filtro capacitivo. Notem-se os picos de corrente e a distorção provocada na tensão de entrada, devido à impedância da linha de alimentação. O espectro da corrente mostra o elevado conteúdo harmônico, cujas harmônicas excedem as especificações da norma IEC 61000-3-2.

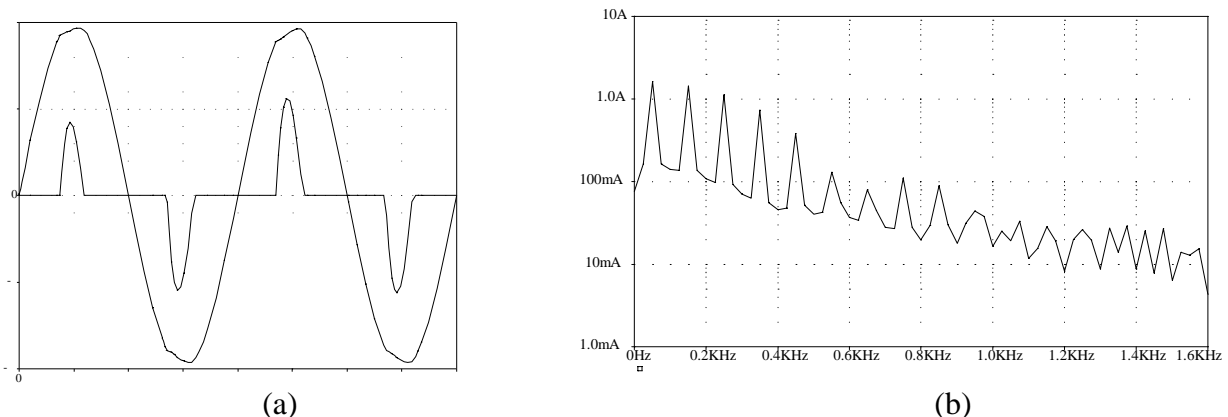


Figura 1.9 (a) Corrente de entrada e tensão de alimentação de retificador alimentando filtro capacitivo. (b) Espectro da corrente.

Consideremos os dados comparativos da tabela II [1.3]

Tabela II: COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA DE SAÍDA

	Convencional	Com correção de FP
Potência disponível	1440 VA	1440 VA
Fator de potência	0,65	0,99
Eficiência do corretor de fator de potência	100%	95%
Eficiência da fonte	75%	75%
Potência disponível	702 W	1015 W

Nota-se que o baixo fator de potência da solução convencional (filtro capacitivo) é o grande responsável pela reduzida potência ativa disponível para a carga alimentada.

Podem ser citadas como desvantagens de um baixo FP e elevada distorção os seguintes fatos:

- A máxima potência ativa absorvível da rede é fortemente limitada pelo FP;
- As harmônicas de corrente exigem um sobre-dimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular);
- A componente de 3<sup>a</sup> harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito maior do que o normal;
- O achatamento da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau-funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede;
- As componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema de potência, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados à linha.

### 1.5.2 Melhoria do Fator de Potência

É possível realizar circuitos retificadores que apresentem uma corrente de entrada senoidal ou que, no mínimo, esteja dentro dos limites da norma [1.3 a 1.10]. Tais soluções podem ser passivas (empregando apenas indutores e capacitores) ou ativas (empregando pelo menos um transistor de potência e outros circuitos associados).

As soluções passivas são, em geral, volumosas, pesadas (devido ao indutor), além de produzirem ruído acústico. Sua vantagem é a confiabilidade.

As alternativas ativas permitem maior densidade de potência (menores volume e massa), além de possibilitarem o controle da tensão CC. Estes retificadores com alto fator de potência são atualmente empregados, por exemplo, em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes tubulares.

### 1.6 Referências Bibliográficas

- [1.1] Mauro Crestani, "Com uma terceira portaria, o novo fator de potência já vale em Abril". *Eletricidade Moderna*, Ano XXII, n° 239, Fevereiro de 1994
- [1.2] International Electrotechnical Commission: EN 61000-3-2:2006+A2:2009: "Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current < 16 A per phase)".
- [1.3] J. Klein and M. K. Nalbant: "Power Factor Correction – Incentives, Standards and Techniques". *PCIM*, June 1990, pp. 26-31
- [1.4] S. B. Dewan: "Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply". *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-17, no. 3, May/June 1981
- [1.5] A. R. Prasad, P. D. Ziogas and S. Manias: "A Novel Passive Waveshaping Method for Single-Phase Diode Rectifier". *Proc. of IECON '90*, pp. 1041-1050
- [1.6] Laís A. Vitoi, Jose A. Pomilio, Danilo I. Brandao, "Analysis of 12-Pulse Diode Rectifier Operating in Aircraft Systems with Constant Frequency", *Proc. 13<sup>th</sup> Brazilian Power Electronics Conference, COBEP 2017, Juiz de Fora, MG, November 2017.*

- [1.7] I. Suga, M. Kimata, Y. Ohnishi and R. Uchida: “New Switching Method for Single-phase AC to DC converter”. IEEE PCC ‘93, Yokohama, Japan, 1993.
- [1.8] B. Mammano and L. Dixon: “Choose the Optimum Topology for High Power Factor Supplies”. PCIM, March 1991, pp. 8-18.
- [1.9] J. H. A. G. Marafão, J. A. Pomilio e G. Spiazzi: “Improved Three-Phase High-Quality Rectifier with Line Commutated Switches”, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, No. 3, May 2004, Pages 640-648.
- [1.10] J. A. Pomilio: “Pré-reguladores de Fator de Potência”, Publicação FEE 03/95, acessível em <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/pfp>

### **Leituras Complementares**

S. M. Deckmann e J. A. Pomilio, “Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas”, Apostila da disciplina IT012 – Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica”, Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>

S. M. Deckmann e J. A. Pomilio, “Normatização e Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica”, Apostila da disciplina IT012 – Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica”, Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a2.pdf>

## Parte Experimental: 1ª aula

**Atenção, nas experiências a serem realizadas nesta disciplina, utilizam-se comumente tensões de alimentação da rede (127/220 V). Por esta razão é necessário cuidado no manuseio dos circuitos, pois os potenciais presentes são perigosos.**

*Material:*

- Circuito de teste;
- Cabos trifásicos;
- Contator;
- Transformador de isolamento;
- Osciloscópio digital com capacidade de realizar FFT e multiplicação, com saída USB;
- Carga resistiva 1k $\Omega$ /200W.

O circuito de teste está mostrado na figura 1.17.

As diferentes chaves colocadas na placa permitem a inclusão ou retirada de elementos do circuito, de modo a possibilitar a análise de seus efeitos sobre o mesmo.

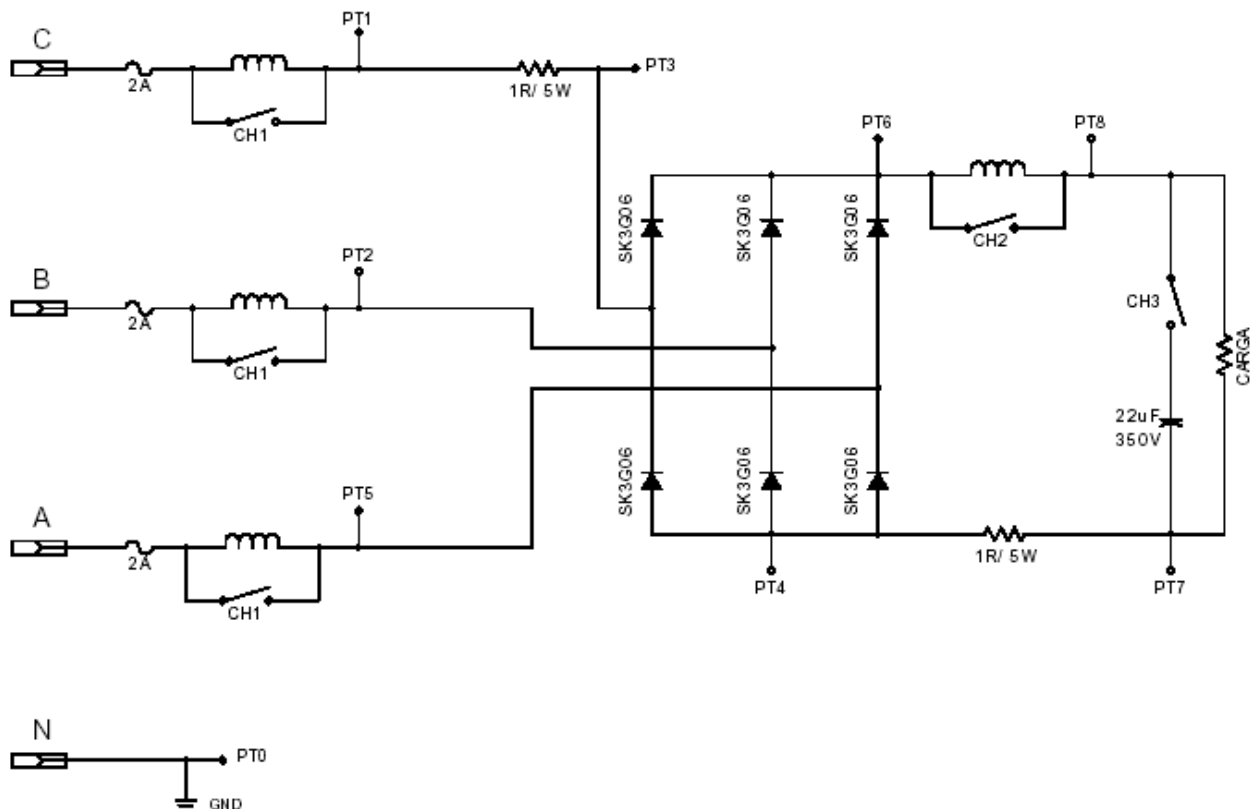


Figura 1.17. Diagrama elétrico do circuito de teste.

### Procedimentos iniciais:

Dado que serão observados sinais relativos à tensão da rede e como o osciloscópio (e a impressora) estão referenciados ao terra (onde também está conectado o neutro), torna-se necessário "**levantar o terra**" dos equipamentos a fim de ser possível visualizar tensões em qualquer ponto do circuito de teste.

Assim, *o osciloscópio deve ser alimentado através do transformador de isolamento*. Isto garante que o terminal de terra da ponta de prova pode ser conectado a qualquer potencial do circuito. Recorde-se, no entanto, que apenas 1 ponto de referência pode ser usado. Ou seja, a visualização simultânea de 2 canais pode ser feita desde que os sinais possuam um ponto em comum.

A entrada trifásica deve ser feita através do contator. A **última conexão a ser feita é a da tomada trifásica!** Sempre que for alterar os pontos de medida, **desligue o contator!**

## I. Testes com entrada monofásica

Uma entrada monofásica será obtida utilizando as fases B e C da rede, ou seja, desconecte a fase A e o neutro. Faça isso soltando o cabo na **saída do contator**. Conecte a carga (  $1k\Omega/200W$ ) nos terminais apropriados.

### a) Característica de saída

A tensão de saída será observada entre os pontos 8 (positivo) e 4. A corrente será observada no ponto 7, também em relação ao ponto 4. A queda de tensão sobre o resistor de  $1\Omega$  (sobre o qual se observa a corrente) é desprezível para efeito da medida da tensão.

#### a.1) Carga resistiva

Com as chaves CH1, CH2 **fechadas** (curto-circuitando as indutâncias) e CH3 **aberta** (sem o capacitor), observe tensão e corrente na saída. Meça o valor médio da tensão e a frequência de ondulação da tensão.

#### a.2) Filtro capacitivo

Feche a chave CH3. Isto conecta um capacitor à saída. Qual o valor médio da tensão de saída? E o valor pico a pico da ondulação de tensão? Observe e comente as formas da tensão e da corrente.

#### a.3) Filtro LC

Abra a chave CH2 (isso coloca o indutor de saída no circuito), mantendo CH3 fechada. Qual o valor médio da tensão de saída? Meça o valor pico a pico da ondulação de tensão. Observe as formas de onda e comente as diferenças.

### b) Características de entrada.

A tensão de entrada será observada entre os pontos 2 e 1 (positivo em 2, "terra" em 1). A corrente será observada no ponto 3.

#### b.1) Carga resistiva

Com as chaves CH1 e CH2 fechadas, e CH3 aberta, observe tensão e corrente na entrada.

Utilizando a função FFT – Fast Fourier Transform, observe o espectro da **tensão** de entrada. Ajuste uma escala horizontal de modo que o espectro mostre, pelo menos, até a 9<sup>a</sup> harmônica. Certifique-se que você está observando o espectro desde a frequência zero!

#### b.2) Filtro capacitivo

Feche a chave CH3, conectando o capacitor à saída. Observe e comente as formas da tensão e da corrente de entrada. Determine o FP.

Utilizando a função FFT (se disponível no osciloscópio), observe o espectro da **corrente** de entrada. Comente as diferenças em relação ao item anterior.

### *b.3) Filtro LC*

Abra a chave CH2 (mantendo CH3 fechada). Observe as formas de onda, Determine o FP e comente as diferenças em relação ao item anterior.

Utilizando a função FFT (se disponível no osciloscópio), observe o espectro da **corrente** de entrada. Comente as diferenças em relação ao item anterior.

## **PREPARAÇÃO PARA A 2ª AULA DO MÓDULO 1:**

Apresente os resultados relativos ao exercício preparatório da 1ª experiência

## Parte Experimental: 2ª aula

Atenção, nas experiências a serem realizadas nesta disciplina, utilizam-se comumente tensões de alimentação da rede (127/220 V). Por esta razão é necessário cuidado no manuseio dos circuitos, pois os potenciais presentes são perigosos.

Material:

- Circuito de teste;
- Cabos trifásicos;
- Contator;
- Transformador de isolamento;
- Osciloscópio digital com capacidade de realizar FFT e multiplicação, com saída USB;
- Resistência 1k $\Omega$ /200W.

O circuito de teste está mostrado na figura 1.17.

As diferentes chaves colocadas na placa permitem a inclusão ou retirada de elementos do circuito, de modo a possibilitar a análise de seus efeitos sobre o mesmo.

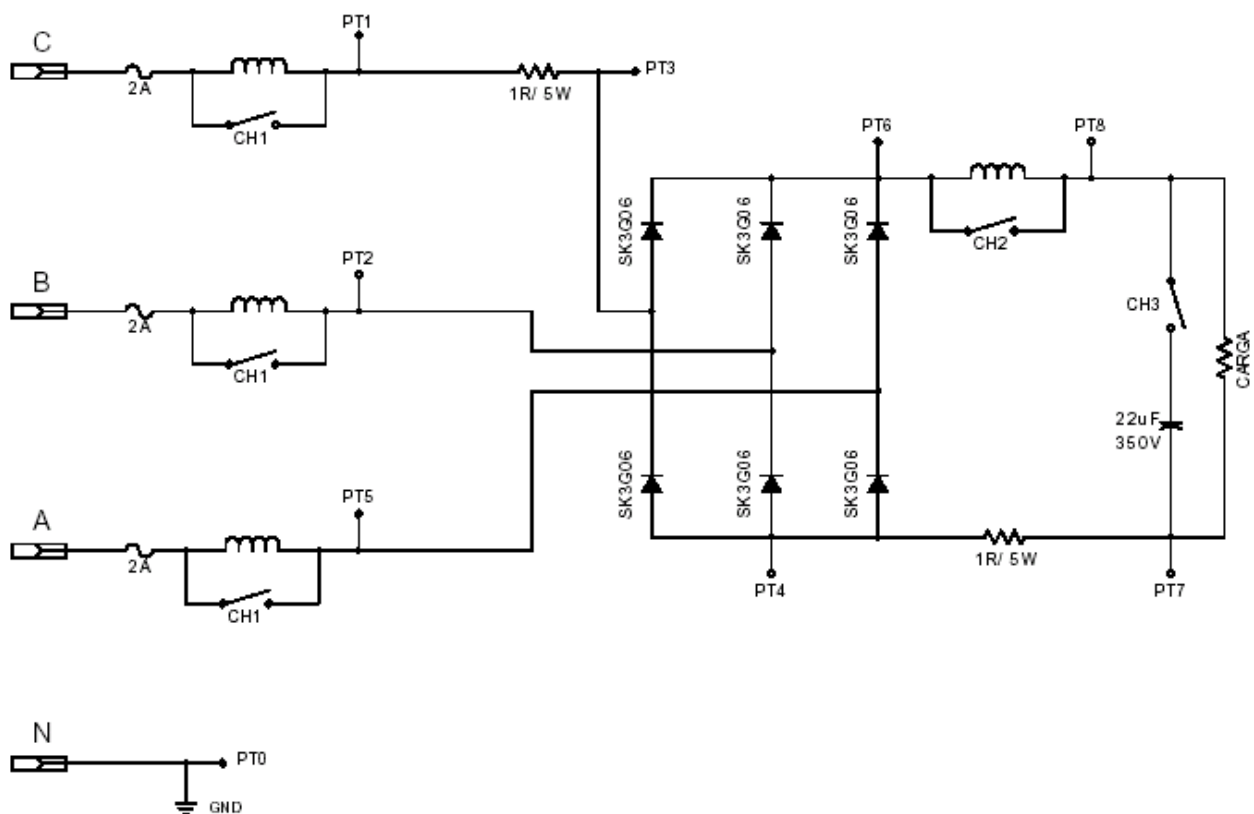


Figura 1.17. Diagrama elétrico do circuito de teste.



### Procedimentos iniciais:

Dado que serão observados sinais relativos à tensão da rede e como o osciloscópio (e a impressora) estão referenciados ao terra (onde também está conectado o neutro), torna-se necessário "**levantar o terra**" dos equipamentos a fim de ser possível visualizar tensões em qualquer ponto do circuito de teste.

Assim, *o osciloscópio e a impressora devem ser alimentados através do transformador de isolamento*. Isto garante que o terminal de terra da ponta de prova pode ser conectado a qualquer potencial do circuito. Recorde-se, no entanto, que apenas 1 ponto de referência pode ser usado. Ou seja, a visualização simultânea de 2 canais pode ser feita desde que os sinais possuam um ponto em comum.

A entrada trifásica deve ser feita através do contator. **A última conexão a ser feita é a da tomada trifásica!** Sempre que for alterar os pontos de medida, **desligue o contator!**

## II. Testes com entrada trifásica

Conecte a alimentação das três fases e do neutro.

### c) Característica de saída

A tensão de saída será observada entre os pontos 8 (positivo) e 4. A corrente será observada no ponto 7, também em relação ao ponto 4. A queda de tensão sobre o resistor de  $1\Omega$  é desprezível.

#### c.1) Carga resistiva

Com as chaves CH1 e CH2 fechadas, e CH3 aberta, observe tensão e corrente na saída. Meça o valor médio da tensão e a frequência da ondulação da tensão. Comente comparativamente com o caso monofásico.

#### c.2) Filtro capacitivo

Feche a chave CH3. Isto conecta um capacitor à saída. Meça o valor médio da tensão de saída e sua ondulação (pico a pico). Observe e comente as formas da tensão e da corrente de saída.

#### c.3) Filtro LC

Abra a chave CH2 (mantendo CH3 fechada). Observe as formas de onda e comente as diferenças. Qual o valor pico a pico da ondulação de tensão? Por que a inclusão do indutor é mais eficiente na redução da ondulação da tensão do que no caso monofásico?

#### c.4) "Inrush" de corrente - Filtro C

Com a chave CH1, CH2 e CH3 fechadas, observe a forma do *impulso inicial de corrente*, ou seja, *aquele que carrega o capacitor quando o contator é fechado*. Meça e comente o valor do pico de corrente. Para facilitar a visualização, procure um ajuste adequado no comando de "trigger" do osciloscópio.

c.5) Abra a chave CH2, repita o item anterior. Explique a causa da sobre-tensão observada na saída.

### d) Características de entrada.

A tensão de entrada será observada entre os pontos 1 e 0 - neutro (positivo em 0 e ref. em 1). A corrente será obtida no ponto 3. Esta é a tensão *de fase*.

*d.1) Carga resistiva*

Com as chaves CH1, CH2 fechadas e CH3 aberta, observe tensão e corrente na entrada. Determine o fator de potência.

*Recorde-se que o FP é a relação entre a potência ativa e a potência aparente. A potência ativa pode ser obtida por meio do osciloscópio, fazendo-se o produto dos sinais de tensão e corrente e obtendo-se o valor médio em 1 ciclo.*

Explique porque, apesar da carga ser resistiva, o FP não é unitário?

*d.2) Filtro capacitivo*

Feche a chave CH3, conectando o capacitor à saída. Observe e comente as formas da tensão e da corrente de entrada. Meça o FP.

*d.3) Comutação dos diodos*

Abra a chave CH3 (retirando o capacitor) e feche CH2 (curto-circuitando o indutor). O retificador alimenta uma carga puramente resistiva. Abra a chave CH1 (conectando indutâncias em série com a entrada do retificador). Observe e justifique a alteração na tensão.

**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 até o início da próxima aula de laboratório.

**PREPARAÇÃO PARA A 2ª EXPERIÊNCIA:**

Apresente os resultados relativos ao exercício preparatório da 2ª experiência