

RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS MONOFÁSICOS

ASPECTOS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

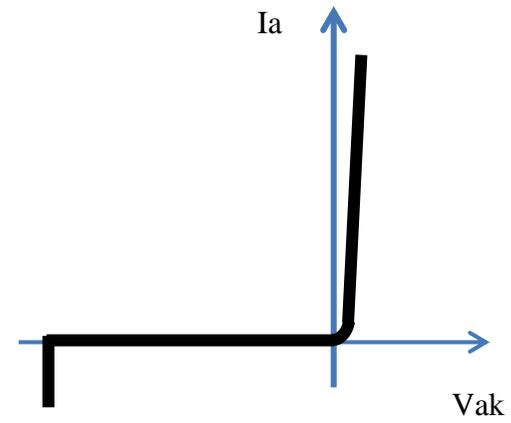
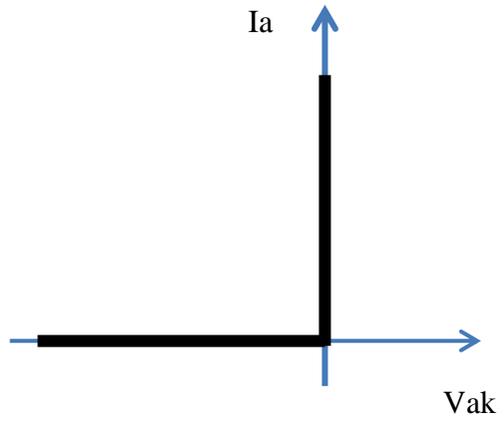
Neste tópico o estudante terá contato com o conversor de potência do tipo CA-CC, ou seja, um **retificador**. Serão estudados retificadores não controlados, ou seja, os que utilizam apenas diodos, verificando os comportamentos para diferentes tipos de cargas conectadas no lado CC do retificador. Serão analisados conversores monofásicos.

Serão também discutidas grandezas para quantificar e comparar o comportamento dos retificadores tanto do lado de saída (CC) quanto de entrada (CA). Em especial será analisado o "Fator de Potência" enquanto indicativo de *qualidade* da energia elétrica.

Praticamente toda distribuição de eletricidade se faz em corrente alternada, principalmente pela facilidade de adequação dos níveis de tensão patrocinados pelos transformadores.

Por outro lado, praticamente todos os equipamentos eletrônicos operam a partir de corrente contínua. Por essa razão, a conversão CA-CC é essencial para a operação das cargas eletrônicas que, atualmente, representam a quase totalidade das cargas residenciais e comerciais (dispositivos de iluminação, computadores, monitores de vídeo, aparelhos de condicionamento de ar, etc.) e uma parcela crescente dos equipamentos industriais.

Diodo Ideal x Diodo Real



1.1 Retificadores não controlados monofásicos

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 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).

Topologias em meia ponte não são aplicadas acima de alguns poucos Watts. Nesta conexão, a corrente média da entrada apresenta um nível médio diferente de zero. Tal nível contínuo pode levar elementos magnéticos (indutores e transformadores) à saturação, o que é prejudicial ao sistema.

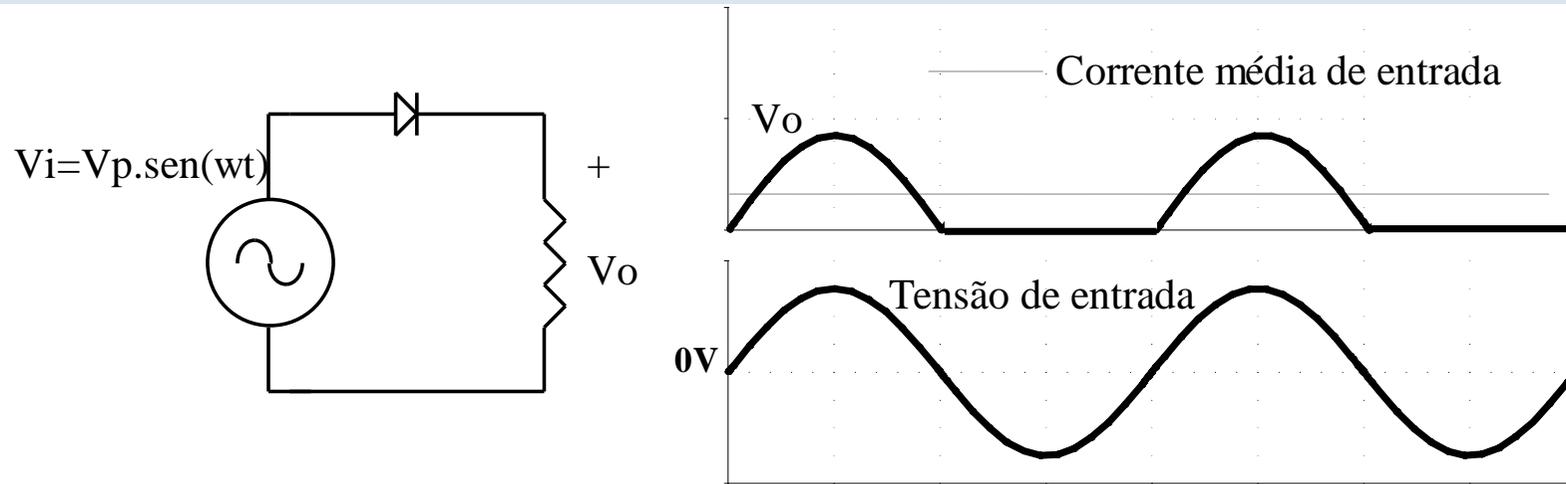


Figura 1.1 Topologia e formas de onda (com carga resistiva) de retificador monofásico não controlado, meia-onda.

Topologias em ponte completa absorvem uma corrente média nula da rede, não afetando o funcionamento dos elementos magnéticos.

No retificador sem filtro as formas de onda da tensão e da corrente na saída do retificador e na carga são as mesmas. A corrente de entrada apresenta-se com a mesma forma e fase da tensão. Não é comum esse arranjo, pois, em geral, deseja-se uma tensão CC de baixo *ripple*.

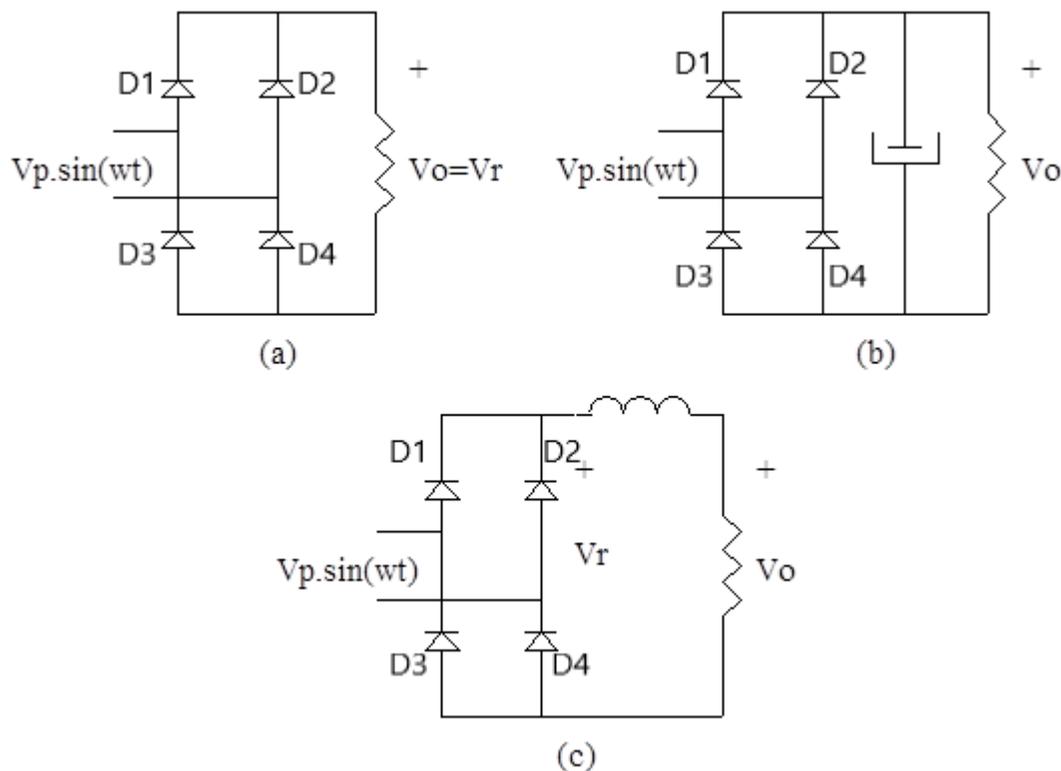


Figura 1.2 Retificadores monofásicos não controlados, de onda-completa.

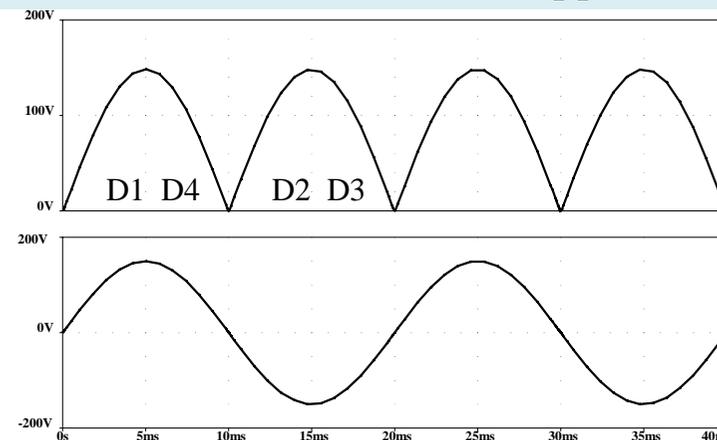


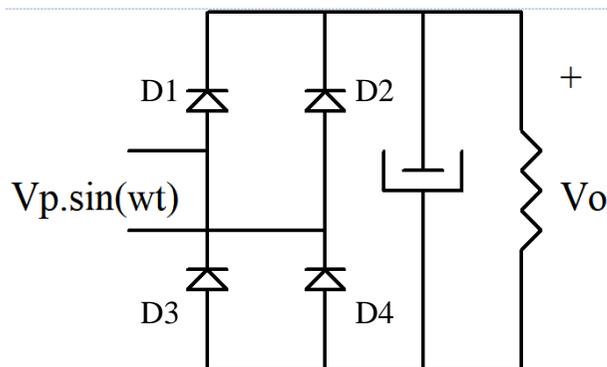
Figura 1.3. Formas de onda para retificador com **carga resistiva**.

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_p \text{sen}\theta \cdot d\theta = \frac{2V_p}{\pi}$$

$$V_{oef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_p \text{sen}\theta)^2 d\theta} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$V_{oef} \geq V_o$$

O retificador com filtro capacitivo faz com que a tensão de saída seja alisada, elevando o valor médio. 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.



Qual o valor médio da tensão V_o ?

Como determinar o valor do capacitor?

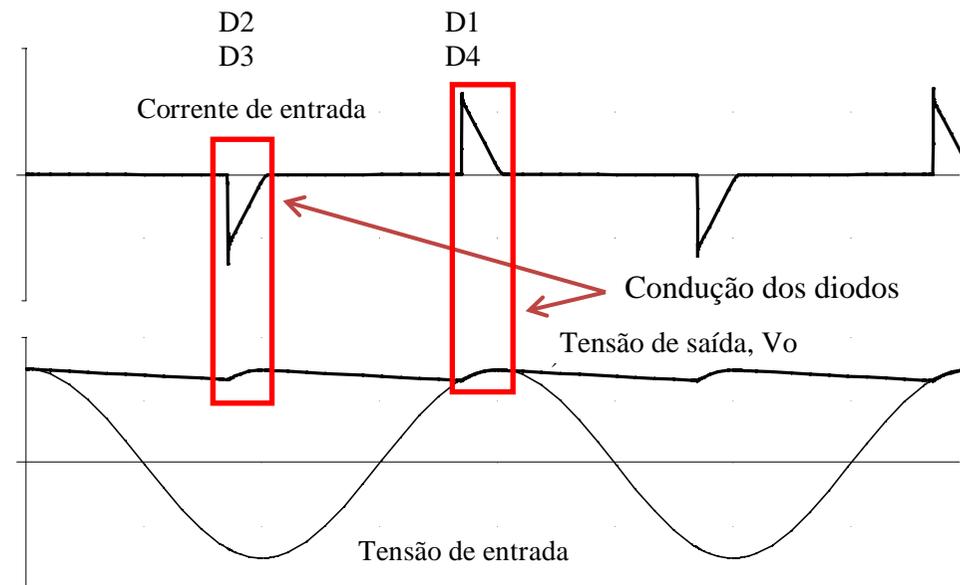
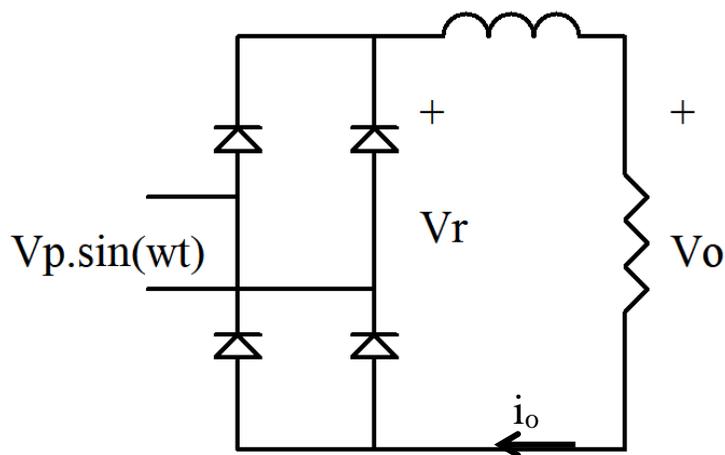


Figura 1.4 Formas de onda para retificador monofásico não controlado, onda completa, com

carga capacitiva.

Para o retificador com filtro indutivo (fig. 1.2.c), o lado CC se comporta aproximadamente 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 em relação ao filtro capacitivo simples.



Qual a forma da tensão V_r se $i_o > 0$?
Qual o valor médio da tensão de saída, V_o , neste caso em que $i_o > 0$?

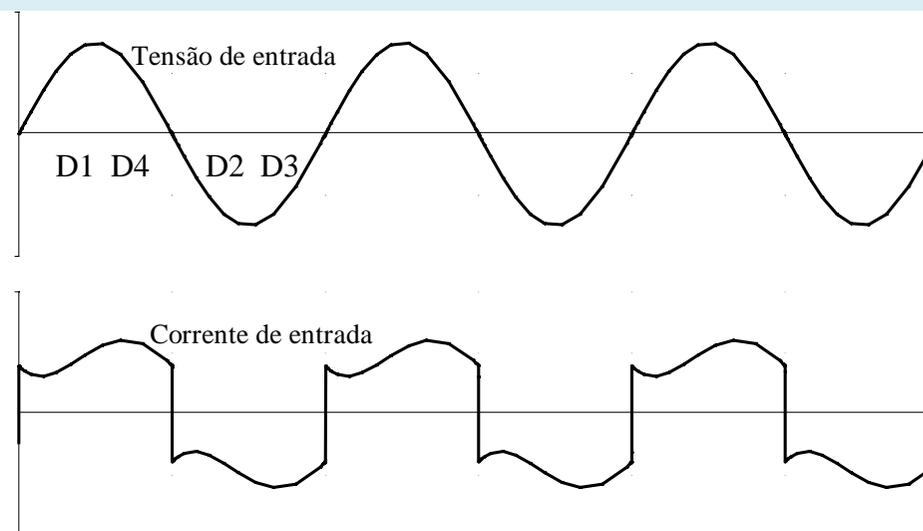
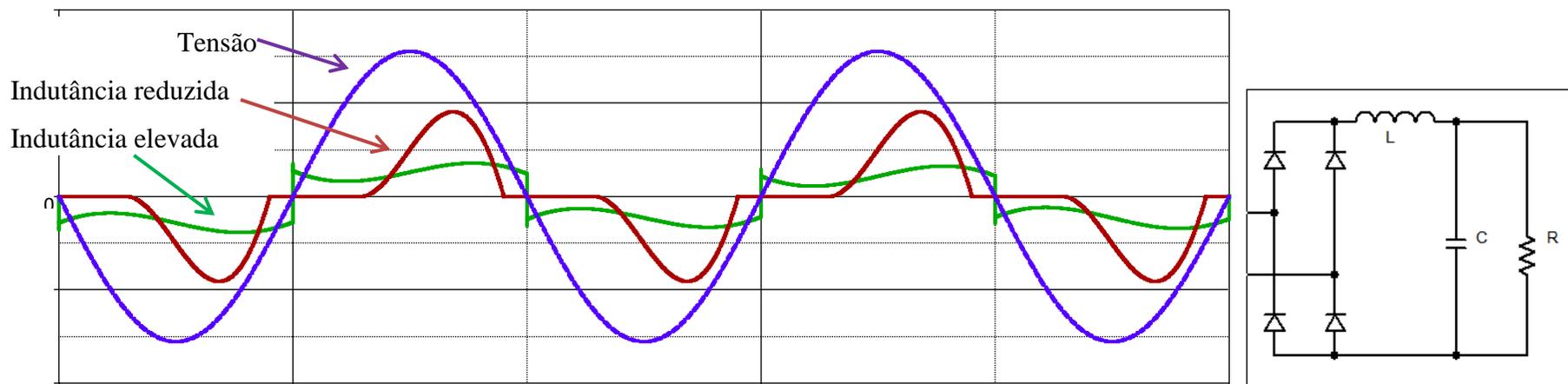


Figura 1.5. Formas de onda para retificador monofásico, onda-completa, não controlado, alimentando carga indutiva.

Na análise de circuitos com indutância, é importante lembrar que a tensão nos terminais de um indutor (com resistência desprezível) é dada pela derivada da corrente ($v_L=L.di/dt$), de modo que nem sempre a identificação da tensão em uma malha é obtida apenas pela inspeção (observação) do ramo que contém o indutor.

Em geral busca-se identificar um ramo da malha que não contenha indutores para a análise do circuito.

É possível utilizar um filtro LC, de modo que seja aplicada à carga uma tensão de baixa ondulação, enquanto o lado CA se beneficie de uma menor distorção na corrente. Essa é uma solução mais utilizada em retificadores trifásicos, uma vez que seu uso no caso monofásico exige indutâncias muito elevadas para ter uma melhoria razoável na forma da corrente.



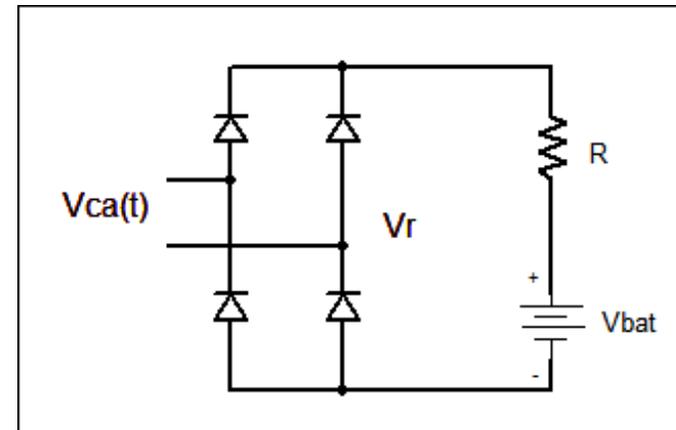
Como seriam as formas de onda das tensões V_r e V_o caso a corrente seja como a indicada como “corrente reduzida”?

Supondo V_{bat} constante, quais as formas de V_r e das correntes nos lados CA e CC do circuito ao lado? Despreze a queda nos diodos.

Considerando $V_p = 2V_{bat}$, qual o valor médio da tensão V_r ?

Por que não é válida a equação $V_o =$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_p \sin \theta \cdot d\theta = \frac{2V_p}{\pi}?$$



1.2 Desempenho de retificadores

1.2.1 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.

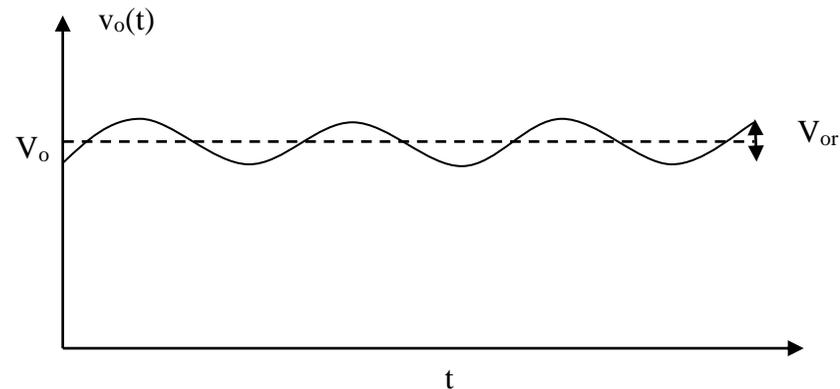


Figura 1.8 Forma de onda esquemática da tensão de saída de um retificador

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

1.2.1.1 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.

1.2.1.2 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.

Pode-se encontrar tanto uma quanto a outra definição nas especificações de uma fonte CC.

1.2.2 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”.

A diferença entre a **potência ativa** de entrada, lado CA (fornecida pela fonte) e potência de saída, lado CC (absorvida pela carga), ambas em Watts, são as **perdas** do conversor.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} < 1.$$

No caso ideal, sem perdas, $P_o = P_i$ e o rendimento é unitário

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 dos valores médios de I_o e V_o .

Caso a ondulação seja elevada e a carga seja resistiva, um valor preciso se obtém utilizando o valor eficaz, V_{of} .

Caso a carga se comporte como uma corrente contante de valor I_o , com ondulação desprezível, a potência de saída (em Watts) deve ser calculada utilizando o valor médio ou o valor eficaz da tensão de saída? Por que?

1.2.3 Lado CA

1.2.3.1 Fator de Potência - FP

A discussão que segue se aplica à determinação do FP de um equipamento. É possível também definir, similarmente, o FP de uma instalação ou conjunto de equipamentos.

Considere, para efeito das definições posteriores, o esquema:

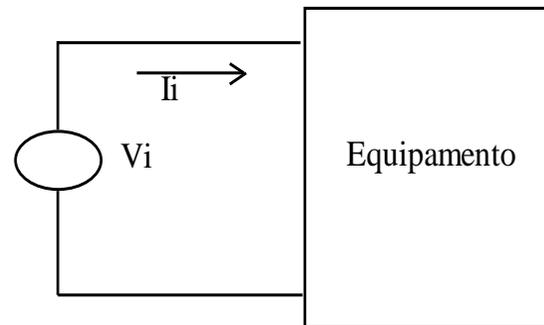


Figura 1.9 Circuito genérico utilizado nas definições de FP

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).

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

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 uma quantidade inteira de ciclos da rede.

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

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

Exclusivamente em um circuito com **formas de onda senoidais**, o fator de potência torna-se igual ao cosseno da defasagem entre as ondas de tensão e de corrente.

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

Essa condição (corrente senoidal) é pouco comum em cargas eletrônicas e não ocorre nos retificadores não controlados. No lado de baixa tensão das redes de distribuição a distorção da corrente (afastamento da forma senoidal) é muito significativo, o que inviabiliza o uso dessa fórmula simplificada.

Se a tensão puder ser considerada senoidal (baixa distorção), o FP pode ser dado por:

$$FP_{V_{seno}} = \frac{I_1}{I_{ief}} \cdot \cos \phi_1, \quad I_1 \text{ é o valor eficaz da componente fundamental.}$$

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.

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.

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

O valor RMS da corrente pode ser expresso em função das componentes harmônicas:

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

Define-se a Taxa de Distorção Harmônica (TDH, ou Distorção Harmônica Total – DHT, ou ainda THD – *Total Harmonic Distortion*) como a razão do valor RMS das componentes harmônicas pela fundamental:

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

Note-se que não é preciso conhecer cada harmônica individualmente, bastando extrair a fundamental.

Assim, o FP pode ser reescrito como:

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

Do ponto de vista do procedimento de cálculo do FP, é muito mais simples utilizar a definição ($FP=P/S$) que **resulta sempre o valor correto**, do que qualquer outro método.

Quando a forma de onda da corrente se apresenta com simetria de $\frac{1}{4}$ 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 oposto), pode-se afirmar que a componente fundamental 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 componente fundamental* da corrente em relação à tensão (suposta senoidal).

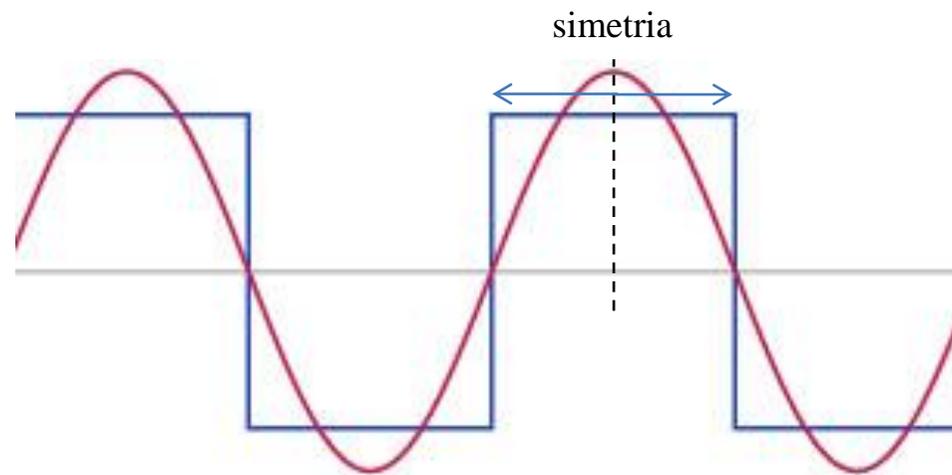
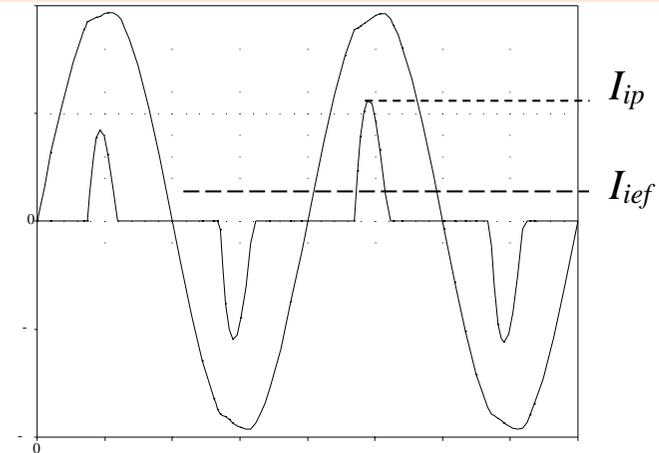


Figura 1.10 Onda quadrada e sua componente fundamental.

Fator de Crista

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

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



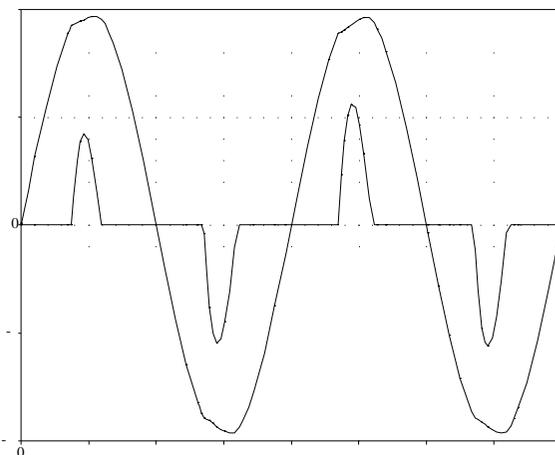
Assim, uma onda senoidal tem $FC=1,41$; onda quadrada tem $FC=1$.

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.

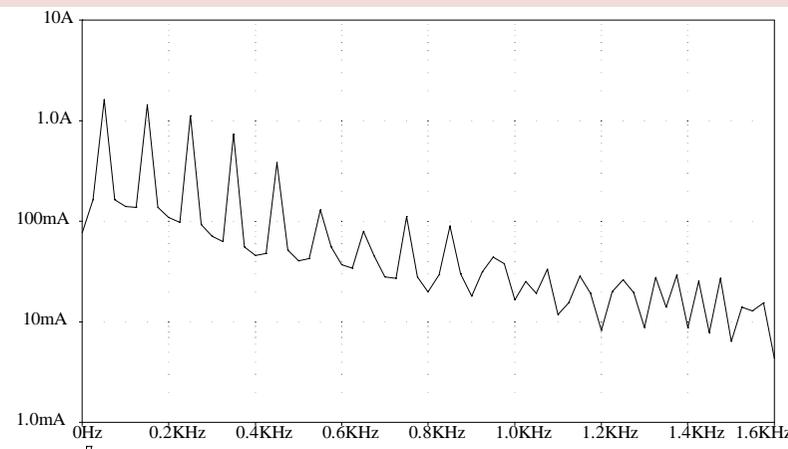
Desvantagens do baixo fator de potência (FP) e da alta distorção da corrente

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 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.



(a)



(b)

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

COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA DE SAÍDA SEM E COM CORREÇÃO DO FP

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

O baixo fator de potência da solução com filtro capacitivo limita a potência ativa disponível.

Desvantagens de baixo FP e elevada distorção da corrente:

- 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 de condução (efeito pelicular);
- A componente de 3^a harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito elevada, já que é uma componente de “sequência zero”;
- O achatamento da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau funcionamento de 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.

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

Esta norma se refere às limitações das harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação. Aplica-se a equipamentos que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, conectado a uma rede de baixa tensão, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V.

O objetivo de limitar a distorção da corrente é preservar a forma da tensão, uma vez que é a diferença de potência que todos os consumidores de uma mesma rede compartilham.

A emenda da norma que entrou em vigor em 2018 apresenta diversos detalhes que procuram adaptar a norma aos novos equipamentos e tecnologias. Ou seja, uma norma não pode ser estática, pois tem que acompanhar a evolução tecnológica. Os equipamentos são classificados em quatro classes:

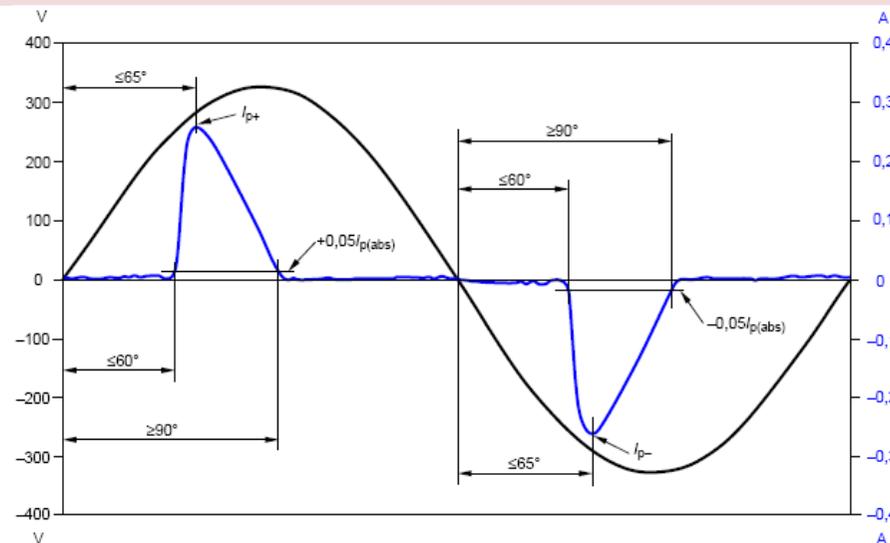
Classe D: Equipamentos de TV, computadores pessoais, monitores de vídeo e refrigeradores com acionamento de compressor em velocidade variável. A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida esta feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo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

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

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

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

- Para potência igual ou inferior a 25 W existem diferentes formas de verificação da conformidade, uma delas é verificar a forma da onda de corrente, que deve respeitar todos os limites indicados na figura a seguir:



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

LIMITES PARA AS HARMÔNICAS DE CORRENTE

Ordem da Harmônica (h)	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente[A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (≤ 600 W) [mA/W]	Classe D máximo [A]
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
$15 \leq h < 39$	2,25/h	3,375/h	3	3,85/h	2,25/n
Pares					
2	1,08	1,62			
4	0,43	0,645			
6	0,3	0,45			
$8 \leq h < 40$	1,83/h	2,76/h			

FP: fator de potência

Melhoria do Fator de Potência

É possível realizar circuitos retificadores com uma corrente de entrada senoidal ou com baixa distorção. 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, na maioria das luminárias LED, em alguns modelos de aparelhos de TV, etc.



Formas de onda de tensão (verde) e corrente (amarelo) de luminária LED com melhoria de FP.



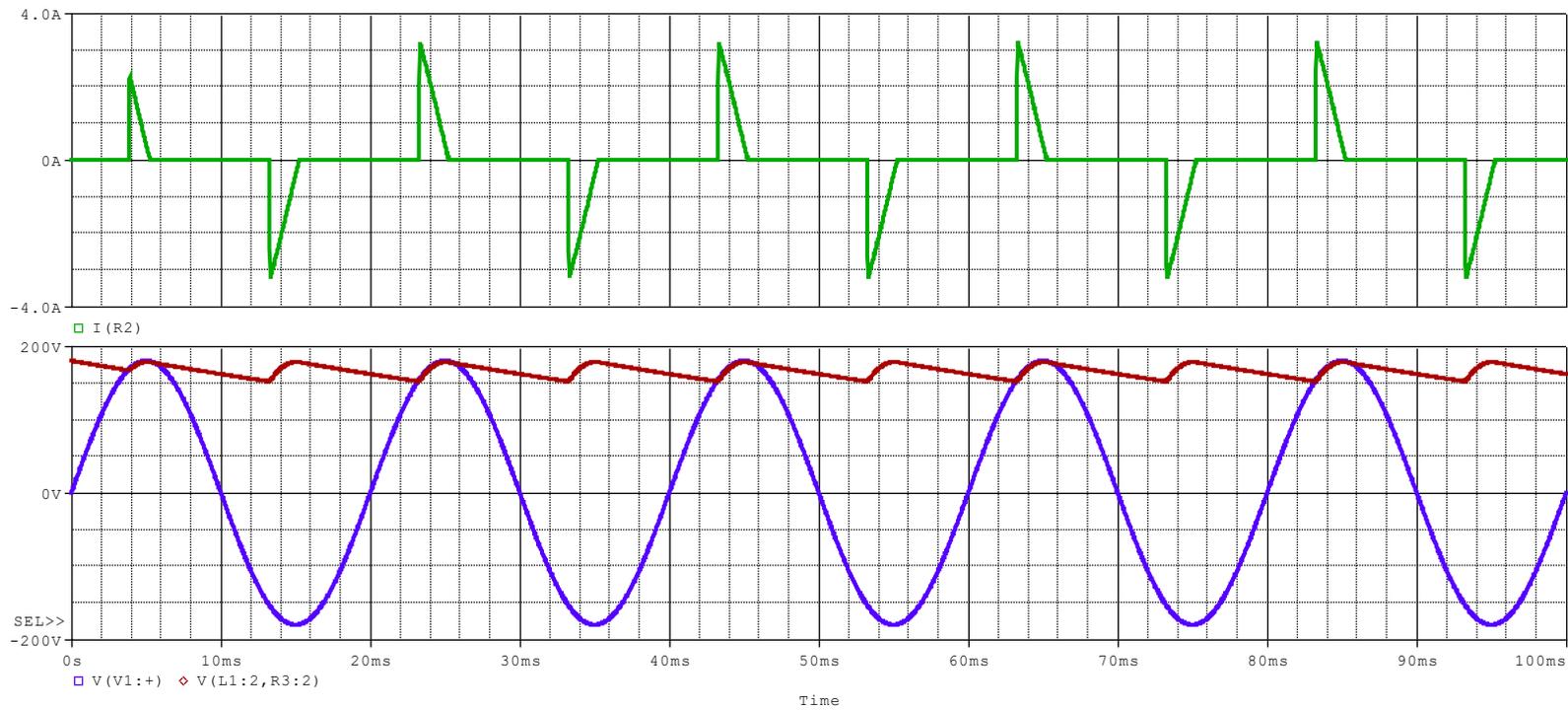
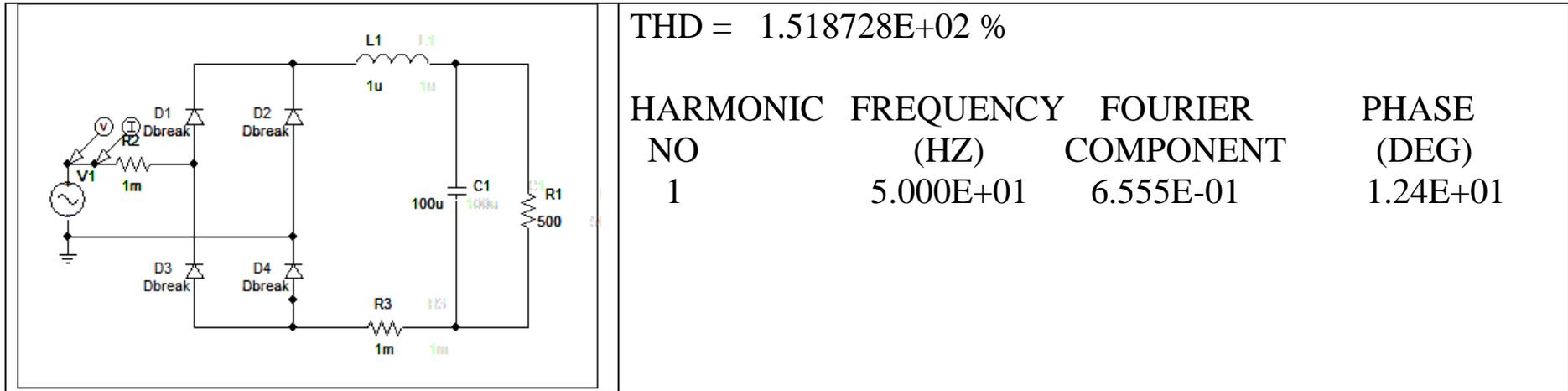
Circuito de alimentação da luminária com melhoria de FP (retificador monofásico com filtro CLC de entrada, seguido de conversor CC-CC do tipo *buck*).

Questão:

Discuta as consequências quantitativas (aumenta, diminui, não se altera) e qualitativas (melhora, piora, não se altera) do **aumento** do valor do capacitor de um retificador monofásico com filtro capacitivo, mantida a potência de saída, em relação às seguintes grandezas:

Fator de <i>ripple</i> da tensão de saída						
Fator de crista da corrente de entrada						
Fator de potência						
DHT						

Para verificar suas respostas, que tal fazer uma simulação?



C=500uF

THD== 2.288135E+02 %

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	PHASE (DEG)
1	5.000E+01	6.987E-01	8.136E+00

