

1. NORMAS RELATIVAS À CORRENTE DE LINHA: HARMÔNICAS DE BAIXA FREQUÊNCIA E INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA CONDUZIDA

1.1 Efeito de harmônicas em componentes do sistema de energia elétrica

A razão de serem impostas limitações referentes à presença de componentes harmônicas na corrente é a **preservação da qualidade da tensão**. O que todos os consumidores/cargas conectados a um mesmo Ponto de Acoplamento Comum (PAC) compartilham é a tensão. A totalidade das cargas conectadas à rede de distribuição de energia é projetada para ser alimentada em tensão. Esta é, pois, a grandeza elétrica a ser preservada, em todas suas características (forma, amplitude e frequência).

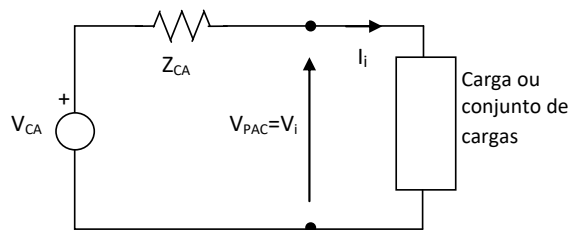


Figura 1.1 Fonte CA com impedância equivalente vista a partir do PAC.

A fonte V_{CA} normalmente é suposta uma fonte senoidal ideal (no caso de redes CA), enquanto a impedância Z_{CA} modela a queda de tensão que ocorre, em regime permanente, quando alguma carga for conectada no PAC.

É possível utilizar a modelagem por impedância **apenas** quando se considera uma frequência específica. Assim, caso a carga produza uma corrente com diversas componentes espectrais, haverá um circuito equivalente para cada frequência, com o devido ajuste no valor das impedâncias.

O grau com que harmônicas, de tensão ou de corrente, podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

Motores e geradores

Um dos efeitos de harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental (como o 5º harmônico). Alguns pares de componentes (por exemplo, 5ª e 7ª) podem produzir oscilações mecânicas em sistemas devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Além disso, tem-se aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

Transformadores

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Harmônicos na tensão aumentam as perdas ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas cobre. O efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência. Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

Cabos de alimentação

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados excitem as ressonâncias da linha de transmissão, podem aparecer elevadas sobre-tensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

Capacitores

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

Equipamentos eletrônicos

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza os cruzamentos com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação, distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar, seu funcionamento. Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com o aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

1.2 Fator de Potência

A atual regulamentação brasileira do fator de potência [1.1] estabelece que o mínimo fator de potência (FP) das unidades consumidoras é de 0,92. O cálculo do FP deve ser feito por média horária. O consumo de reativos além do permitido (0,425 VARh por 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.

Para verificação do FP, os registros das grandezas deverão ser feitos por instrumentos de medição adequados, preferencialmente eletrônicos, empregando o princípio da amostragem digital e aprovados pelo órgão responsável pela conformidade metrológica (INMETRO).

Ainda segundo os documentos da ANEEL, o valor do fator de potência deverá ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q) ou das respectivas energias (EA, ER), utilizando-se as seguintes fórmulas:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad \text{ou} \quad FP = \frac{Ea}{\sqrt{Ea^2+Er^2}} \quad (1.1)$$

Do ponto de vista da concessionária, o FP é definido para a *Unidade Consumidora*, ou seja, é uma verificação do impacto do conjunto de cargas internas a um consumidor.

O PRODIST define o fator de potência como uma relação que depende da potência ou da energia reativa, como mostra a eq. (1.1). No entanto, não especifica como tal grandeza deve ser medida, o que é um grande problema para formas de onda não senoidais e em casos de redes trifásicas desequilibradas.

A ANEEL define energia elétrica reativa como “aquela que circula entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em quilovoltampère-reactivo-hora (kvarh)” [1.2]. Em tal contexto, todas as componentes espectrais da corrente e que não possuem respectiva harmônica na tensão, deveriam ser incluídas dentro de tal parcela. Formalmente esse é um procedimento temerário, senão errado. Isso significa que o conceito de energia reativa deve ser revisto.

Observe-se que se trata de um padrão que é aplicável a redes de distribuição, inclusive de baixa tensão, na qual, sabidamente, há forte distorção na corrente, além de desequilíbrios expressivos entre as fases.

Em situações vigentes no passado em que os consumidores conectados às redes de distribuição simplesmente consumiam energia da rede, essas definições se mantiveram minimamente adequadas (salvo os problemas apontados, principalmente para redes não ideais). No entanto, a partir do momento em que os consumidores também passam a produzir potência ativa, é necessário rever a aplicação do FP como uma figura de mérito que pode, inclusive, penalizar indevidamente o consumidor. Por essas razões, a ANEEL vedou a aplicação de penalização aos consumidores de grupo B^a, sendo aplicável apenas aos consumidores de grupo A^b [1.3]. Tal exclusão do grupo B se deve à dificuldade formal de aplicar as atuais (2016) definições para o cálculo do FP.

Existem também especificações de FP para aparelhos individuais, normalmente estabelecidos pela ABNT e reguladas pelo INMETRO. Como exemplo, tem-se os reatores para lâmpadas fluorescentes tubulares acima de 60 W, que têm que apresentar $FP \geq 0,95$ [1.4].

Qualquer que seja a situação, a avaliação do FP requer uma análise conjunta da tensão CA com a corrente resultante, seja de uma Unidade Consumidora, seja de uma carga individual. Consideremos, para efeito das definições posteriores o esquema da figura 1.1.

1.2.1 Definição de Fator de Potência

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, **independentemente das formas** que as ondas de tensão e corrente apresentem. Os sinais variantes no tempo devem ser periódicos.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (1.2)$$

Em um sistema com **formas de onda senoidais**, a equação 1.1 torna-se igual ao cosseno da defasagem entre as ondas de tensão e de corrente:

$$FP_{\text{seno}} = \cos \phi \quad (1.3)$$

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

$$FP_{V_{\text{seno}}} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cdot \cos \phi_1 \quad (1.4)$$

Neste caso, a potência ativa de entrada é dada pelo produto da tensão (senoidal) por todas as componentes harmônicas da corrente (não-senoidal). Este produto é nulo para todas as harmônicas

^a Grupo B: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo B1 – residencial; b) subgrupo B2 – rural; c) subgrupo B3 – demais classes; e d) subgrupo B4 – Iluminação Pública.

^b Grupo A: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômnia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV; b) subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV; c) subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV; d) subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV; e) subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV; e f) subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

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 RMS da componente fundamental da corrente e a corrente RMS de entrada, multiplicado pelo cosseno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente.

A relação entre as correntes é chamada de *fator de forma* e o termo em cosseno é chamado de *fator de deslocamento*.

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

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1.5)$$

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

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.6)$$

Assim, o FP pode ser reescrito como:

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DTH^2}} \quad (1.7)$$

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.

1.3 Norma IEC 61000-3-2: Limites para emissão de harmônicas de corrente (≤ 16 A por fase)

A IEC é a organização mundial que prepara e publica padrões internacionais para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e afins. A IEC também gerencia sistemas de avaliação da conformidade, que certifica que os equipamentos, sistemas ou componentes estejam em conformidade com seus padrões internacionais.

A norma IEC 61000-3-2 [1.5], incluindo as alterações feitas pela emendas recentes, 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, pois esta norma tem aplicação principalmente na comunidade européia, onde as tensões fase-neutro encontra-se na faixa especificada.

Os equipamentos são separados em 4 classes:

Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada; aparelhos de uso doméstico, excluindo os classe D; ferramentas, exceto as portáteis; “dimmers” para lâmpadas incandescentes; equipamentos de áudio e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.

Classe B: Ferramentas portáteis.

Classe C: Dispositivos de iluminação.

Classe D: Computadores pessoais, monitores de vídeo e aparelhos de televisão, caso a corrente de entrada apresente a forma mostrada na figura 1.2. 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).

Para equipamentos da Classe C e potência menor ou igual a 25 W, a conformidade se dá pela obediência aos limites da Tabela ou ainda, caso a terceira harmônica da corrente, expressa em percentagem da corrente fundamental, seja inferior a 86% e a quinta harmônica não exceda 61%. Também a forma de onda da corrente de entrada deve ser tal que atinja o nível de corrente de 5% antes de 60° , tenha o seu valor máximo antes de 65° e não caia abaixo dos 5% do máximo da corrente antes de 90° , com referência a qualquer cruzamento de zero da tensão, como ilustra a Figura 1.2. O objetivo de tais restrições é garantir que a corrente “se espalhe” ao longo do semiciclo. Isso pode ser obtido, tipicamente, com uma redução na capacitância de filtragem em retificadores com filtro capacitivo.

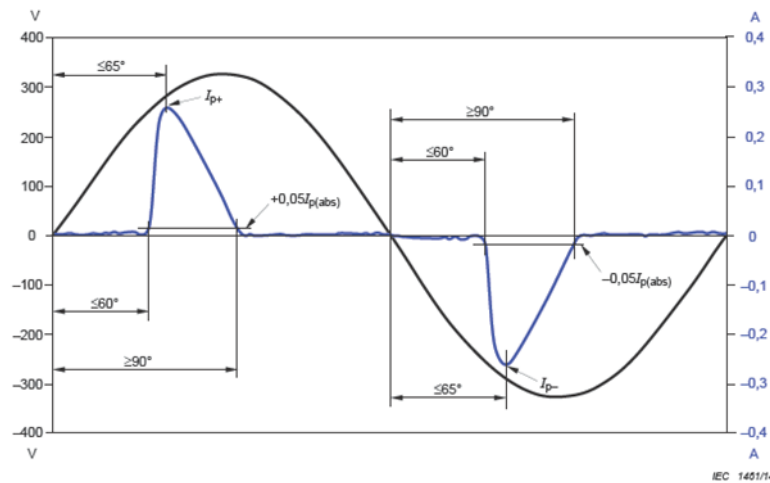


Figura 1.2 Forma de onda da corrente para verificação de conformidade de equipamento Classe C, com potência igual ou menor que 25 W.

A inclusão apenas destes aparelhos como classe D deve-se ao fato de seu uso se dar em larga escala e ser difundido por todo sistema. Outros equipamentos poderão ser incluídos nesta categoria caso passem a apresentar tais características.

Os valores de cada harmônica são obtidos após a passagem do sinal por um filtro passa-baixas de primeira ordem com constante de tempo de 1,5 s. Aplica-se a transformada discreta de Fourier (DFT), com uma janela de medição entre 4 e 30 ciclos da fundamental, com um número inteiro de ciclos. Calcula-se a média aritmética dos valores da DFT durante todo período de observação. Este período varia de acordo com o tipo de equipamento, tendo como regra geral um valor que permita a repetibilidade dos resultados.

A medição da potência ativa é feita de maneira análoga, devendo-se, no entanto, tomar o máximo valor que ocorrer dentro do período de observação. Este é o valor que um fabricante deve indicar em seu produto (com uma tolerância de +/- 10%), conjuntamente como fator de potência (para classe C). Caso o valor medido seja superior ao indicado, deve-se usar o valor medido.

Para cada harmônica medida da forma descrita, o valor deve ser inferior a 150% do limite da Tabela I, em qualquer situação de operação do aparelho.

As correntes harmônicas com valor inferior a 0,6% da corrente de entrada (medida dentro das condições de ensaio), ou inferiores a 5 mA não são consideradas.

Foi definida a corrente harmônica parcial de ordem ímpar, para componentes entre a 21^a e a 39^a como sendo:

$$I_{21-39} = \sqrt{\sum_{n=21,23\dots}^{39} I_n^2} \quad (1.8)$$

Para a componente de ordem 21 ou superior (ímpar), o valor individual para cada uma delas, pode exceder o limite em mais 50% desde que a corrente harmônica parcial de ordem ímpar medida não exceda o valor teórico (obtido com os valores da tabela), nem excedam o limite individual de 150% do valor da tabela.

A Tabela I indica os valores máximos para os harmônicos de corrente, no fio de fase (não no de neutro).

Os valores limites para a classe B são os mesmos da classe A, acrescidos de 50%.

Tabela I: Limites para os Harmônicos de Corrente

Ordem do Harmônico n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente[A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>75W, <600W) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,30	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \cdot \frac{15}{n}$	$0.225 \cdot \frac{15}{n}$	3	$3,85/n$
Harmônicos Pares				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \cdot \frac{8}{n}$	$0.35 \cdot \frac{8}{n}$		

FP: fator de potência

1.4 Recomendação IEEE para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência: IEEE-519

Esta recomendação (não é formalmente uma norma) produzida pelo IEEE [1.6] descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Seu enfoque é diverso daquele da IEC, uma vez que os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), e não em cada equipamento individual. A filosofia é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Quanto maior for a corrente de curto-circuito (I_{cc}) em relação à corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

A grandeza TDD - Total Demand Distortion - é definida como a distorção harmônica da corrente, em % da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 minutos). Isto significa que a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo.

Harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores das componentes ímpares. Distorções de corrente que resultem em nível CC não são admissíveis.

Tabela II: Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV)

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga (I_o - valor da componente fundamental)						
Harmônicas ímpares:						
I_{cc}/I_o	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabela III: Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Subdistribuição (69001V a 161kV)

Limites para harmônicas de corrente de cargas não-lineares no PAC com outras cargas						
Harmônicas ímpares:						
I_{cc}/I_o	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Tabela IV: Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e co-geração isolados.

Harmônicas ímpares:						
I_{cc}/I_o	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	THD(%)
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para as tensões menores (nível de distribuição). Estabelece-se um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total.

Tabela V: Limites de distorção de tensão

	Distorção individual	THD
69kV e abaixo	3%	5%
69001V até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1%	1,5%

1.5 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica ANEEL

Os objetivos dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, são:

- Estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

- Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição (redação definida na Ver. 8, vigente a partir de 2017).
- Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por:

- a) consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) produtores de energia;
- c) distribuidoras;
- d) agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão - DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema – ONS.

Os aspectos de qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) variação de frequência.

Observe-se que o PRODIST trata exclusivamente de definições relacionadas à qualidade da tensão suprida aos consumidores. Não trata, pois do comportamento da corrente a qual, apenas indiretamente, tem que ser considerada ao se quantificar o Fator de Potência.

No Brasil, as poucas limitações em relação ao comportamento da corrente estão presentes nas normas do INMETRO que regulam equipamentos específicos. Um das poucas restrições atuais se referem a dispositivos de iluminação, acima de um limiar de potência, que devem apresentar FP elevado (maior de 0,95), o que implica em baixa distorção da corrente.

1.5.1 Definições dos equipamentos de medição

A Revisão 8 (2017) do Módulo 8 do PRODIST trouxe importantes atualizações em relação aos procedimentos de medição. As versões anteriores traziam definições extremamente inadequadas à correta avaliação de vários distúrbios. Este fato foi superado com a adoção das definições do padrão IEC 61000-4-30. Por exemplo, nas versões antigas, os equipamentos de medição para verificação de tensão de regime permanente deveriam atender os seguintes requisitos mínimos:

- a) taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
- b) conversor A/D (analógico/digital) de sinal de tensão: 12 bits;
- c) precisão: até 1% da leitura.

Com as mudanças decorrentes da Rev. 8 e a adoção da IEC 61000-4-30 (ou eventualmente de normas brasileiras específicas), foi estabelecido que os equipamentos destinados à avaliação da

qualidade da energia devem ser capazes de identificar e mensurar a totalidade dos eventos definidos, realizando o processamento de acordo com o prescrito na norma.

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências desde a componente fundamental até, pelo menos, a 40ª ordem harmônica. Nas versões anteriores o limite mínimo era a 25ª harmônica.

A revisão 8 introduziu mudanças nas definições e quantificações relacionadas à distorção harmônica da tensão. Um primeiro aspecto é a separação das componentes espectrais em três grupos, com as respectivas definições de DTT (Distorção Total de Tensão):

- DTT_p : Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3;
- DTT_i : Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3;
- DTT_3 : Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

O cálculo é especificado até uma ordem harmônica genérica h_{max} . Na especificação da instrumentação indica-se que a medição deve ser feita, no mínimo, até a 40ª harmônica.

Os limites são especificados utilizando o percentil de conformidade de 95%, ou seja, admite-se que os limites sejam ultrapassados em 5% das 1008 amostras coletadas para o processamento digital, conforme indica a Tabela 5.8. Caso a medição seja feita por transformador de potencial (TP) em conexão V (delta aberto), os valores de DTT_3 são 50% dos indicados na Tabela.

Tabela VI: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_{i95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Ao indicar apenas limites de DTT a ANEEL deixa de considerar o efeito (presente em todas as demais regulamentações) de relevância do aumento da impedância do alimentador com a frequência. Considerando apenas o limite $DTT_{i95\%} = 10\%$ ($V_n \leq 1 \text{ kV}$), tal distorção pode, em tese, ser devida exclusivamente a componentes de ordem elevada (17ª, por exemplo).

Outro fator é o impacto degenerativo que a distorção da tensão causa em capacitores, lembrando que para um capacitor, a corrente cresce com a ordem harmônica da tensão. Assim, 10% de 25ª harmônica produz corrente cinco vezes maior em um capacitor do que 10% de quinta harmônica. Consequentemente, as perdas por efeito Joule são 25 vezes maiores.

Outro aspecto relevante na nova regulamentação são os níveis elevados de DTT admitidos em todas as faixas de tensão. Observe-se que os valores são mais elevados do que os estabelecidos pelo IEEE e pela IEC.

1.6 Normas relativas às limitações de níveis de Interferência Eletromagnética Conduzida pela rede

Dois tipos de interferência podem ser considerados: a conduzida pela rede de alimentação e a irradiada.

Diferentes normas, nacionais (FCC - EUA) e internacionais (CISPR - IEC), determinam os valores limites admissíveis para o ruído eletromagnético produzido pelo equipamento. Os apísase da comunidade europeia e o Reino Unido adotam o padrão da IEC, produzindo, respectivamente, as Normas Europeias (EN) e as British Standard (BS) No Brasil, a adoção de normas específicas sobre este assunto está em discussão, seguindo-se, em princípio, as normas CISPR.

Tais normas, além dos limites de sinal irradiado ou conduzido, determinam os métodos de medida, os equipamentos de teste e classificam os produtos a serem testados em função de suas características próprias e do local onde devem ser utilizados (CISPR 16) [1.7]. Os limites mais severos referem-se a produtos utilizados em ambiente "doméstico" (classe B), o que significa, que são alimentados por uma rede na qual existem usuários que não são indústrias ou estabelecimentos comerciais. Ambientes industriais e comerciais tem seus equipamentos incluídos na chamada classe A.

No que se refere à IEM conduzida, equipamentos de informática possuem suas normas (CISPR 22), enquanto os aparelhos de uso industrial, científico e médico (ISM), são regulados pela CISPR 11 [1.8]; eletrodomésticos, pela CISPR 14 e os dispositivos de iluminação pela CISPR 15.

De modo simplificado, os testes de IEM irradiada podem ser feitos em ambientes anecóicos, quer seja um campo aberto ou uma câmara especial. Já as medidas de IEM conduzida fazem uso de uma impedância artificial de linha, sobre a qual se realiza a medida dos sinais de alta frequência injetados pelo equipamento.

1.6.1 IEM conduzida pela rede

A principal motivação para que se exija um limitante para a IEM que um equipamento injeta na rede é evitar que tal interferência afete o funcionamento de outros aparelhos que estejam sendo alimentados pela mesma rede [1.9]. Esta susceptibilidade dos aparelhos aos ruídos presentes na alimentação não está sujeita a normalização, embora cada fabricante procure atingir níveis de baixa susceptibilidade.

A medição deste tipo de interferência é feita através de uma impedância (LISN - Line Impedance Stabilization Network) colocada entre a rede e o equipamento sob teste, cujo esquema está mostrado na figura 1.3 A indutância em série evita que os ruídos produzidos pelo equipamento fluam para a rede, sendo direcionados para a resistência de 1 k Ω , sobre a qual é feita a medição (com um analisador de espectro com impedância de entrada de 50 Ω). Os eventuais ruídos presentes na linha são desviados pelo capacitor colocado do lado da rede de 1 μ F, não afetando a medição.

Esta impedância de linha pode ser utilizada na faixa entre 150 kHz e 30 MHz, que é a banda normalizada pela CISPR. A faixa entre 10 kHz e 150 kHz era definida apenas pela VDE (Alemanha). No entanto, com a unificação normativa na Europa, deixou de haver restrição nesta banda espectral. Nesta faixa inferior, a LISN é recomendada com outros componentes, como mostrado na mesma figura 1.3.

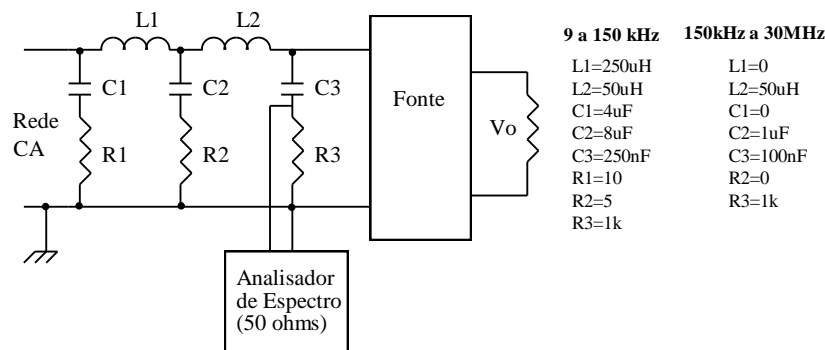


Figura 1.3 Impedância de linha normalizada (LISN).

Também são feitas as distinções quanto à aplicação e ao local de instalação do equipamento. A figura 1.4 mostra estes limites para a norma CISPR 11 (equipamentos ISM). O ambiente de medida é composto basicamente por um plano terra sobre o qual é colocada a LISN. Acima deste plano, e isolado dele, coloca-se o equipamento a ser testado. Equipamento Classe A é aquele utilizado em qualquer ambiente exceto o doméstico (comercial, industrial, serviço, etc.). Um equipamento Classe B é de uso doméstico, tendo limites mais severos.

As elevadas taxas de variação de tensão presentes numa fonte chaveada e as correntes pulsadas presentes em estágios de entrada (como nos conversores para correção de fator de potência) são os principais responsáveis pela existência de IEM conduzida pela rede.

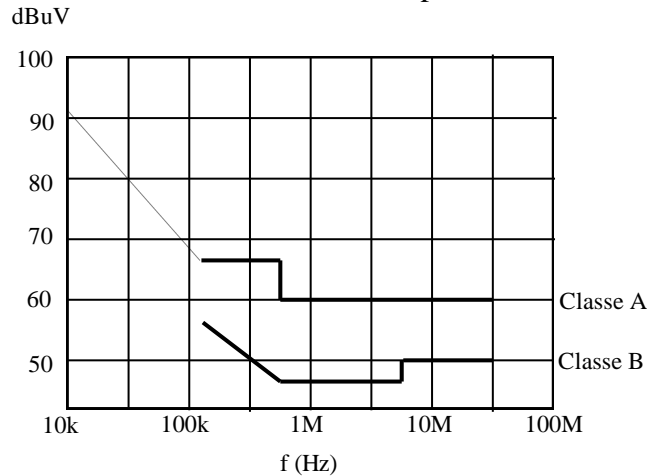


Figura 1.4 Limites de IEM conduzida pela norma CISPR 11 (equipamentos de uso Industrial, Científico e Médico - ISM)

No caso das correntes pulsadas, esta razão é óbvia, uma vez que a corrente presente na entrada do conversor está sendo chaveada em alta frequência, tendo suas harmônicas dentro da faixa de verificação de IEM conduzida.

Seja a forma de corrente mostrada na figura 1.5, típica de um pré-conversor tipo flyback, atuando para correção de fator de potência, suponhamos que a corrente seja chaveada em 30 kHz.

Tomemos como exemplo uma forma triangular com amplitude da harmônica fundamental de 5A. Sabendo que a amplitude das harmônicas decai com o quadrado da frequência, para a 5ª componente (150 kHz), a amplitude será de 200 mA. Tal corrente, passando por uma resistência de 50 Ω , provocará uma queda de tensão de 10 V, o que corresponde a 140 dB/ μ V. Esse valor está muito além do limite estabelecido pelas normas, o que implica na necessidade do uso de algum tipo de filtro de linha para evitar que tal sinal penetre na rede.

Já no caso dos elevados dv/dt, devem ser considerados alguns efeitos de segunda ordem presentes numa fonte chaveada. Tomemos a forma de onda mostrada na figura 1.6 como sendo a tensão de coletor do transistor de uma fonte genérica em relação à terra.

O chaveamento do transistor faz com que, em relação à terra tenha-se onda de tensão como indicada. Tal forma trapezoidal leva a componentes harmônicas cujas amplitudes são dadas por:

$$V_n = \frac{2 \cdot E}{n \cdot \pi} \cdot \frac{\sin(n \cdot \pi \cdot f \cdot \xi)}{n \cdot \pi \cdot f \cdot \xi} \cdot \sin^2\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right) \quad (1.9)$$

A amplitude depende da tensão de alimentação, da frequência de chaveamento e dos tempos de comutação. São estas componentes harmônicas que, através das capacitâncias parasitas presentes na montagem, produzirão as correntes em alta frequência que circularão para a rede.

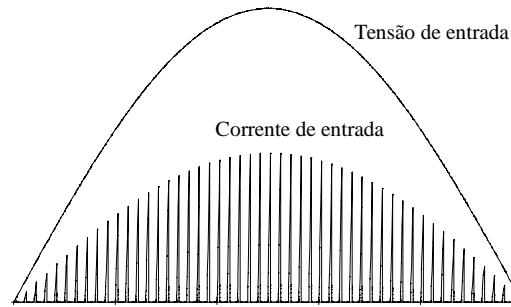


Figura 1.5 Corrente de entrada de um pré-regulador de fator de potência tipo flyback.

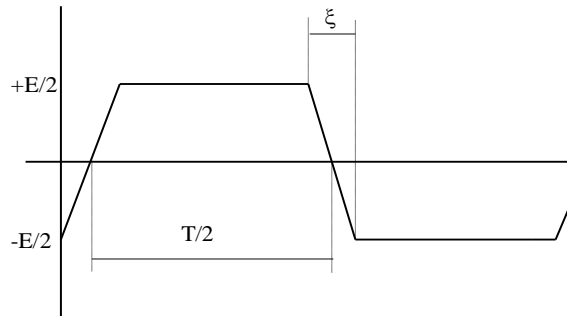


Figura 1.6. Tensão típica entre coletor de transistor e terra em fonte chaveada

A necessidade do uso de dissipadores de calor é muito comum em fontes chaveadas. Quando o transistor tem seu coletor conectado ao corpo metálico do componente, normalmente é necessária uma isolamento, evitando que o dissipador fique num potencial elevado, uma vez que é preferível, dadas suas dimensões, que ele fique aterrado. Esta montagem, com um isolante colocado entre duas placas metálicas em potenciais diferentes, cria uma capacitância que acopla a fonte à terra. O valor desta capacitância pode ser obtido, conhecida a constante dielétrica do isolante e as dimensões do transistor.

Considerando um transistor encapsulado em TO-3, para um isolante de mica, com espessura de 0,1mm, tem-se uma capacitância de aproximadamente 150 pF. Já com isolante plástico (0,2 mm), este valor cai para 95 pF. Um isolante cerâmico de 2 mm de espessura leva a 20 pF.

Como exemplo, consideremos uma onda trapezoidal com as seguintes características: $E=300\text{ V}$, $f=30\text{ kHz}$, $n=5$, $\xi=1\text{ }\mu\text{s}$.

A amplitude da 5ª harmônica será de 36,8 V.

Em 150 kHz a reatância de uma capacitância de 150 pF é de $7080\text{ }\Omega$. Isto conduz a uma corrente de 5,2 mA a circular pela LISN. Tal corrente implica numa tensão de 260 mV sobre $50\text{ }\Omega$, ou seja, 108 dB/ μV .

Em um circuito que faça uso de um transformador entre primário e secundário e tenha um dos terminais de saída aterrado, tem-se um outro caminho possível para a fuga de corrente em alta frequência, que é através da capacitância entre os enrolamentos do transformador.

A redução dos níveis de IEM conduzida pode ser obtida por 2 enfoques básicos: a minimização dos fenômenos parasitas associados à sua produção e o uso de filtros de linha.

A redução do corrente relacionada à fuga entre transistor e dissipador pode ser obtida com o uso de isolantes que impliquem em menor capacitância, o que nem sempre é possível conciliar com a potência a ser dissipada ou com o custo (isolantes cerâmicos são mais caros e frágeis).

Outra idéia é isolar o dissipador do condutor terra. O efeito prático desta medida é criar uma capacitância entre o dissipador e a carcaça da fonte, que pode ser de valor muito menor que a capacitância com o transistor. Como ambas estão associadas em série, o efeito resultante é minimizado, em geral, atingindo-se poucos pF.

A redução da capacitância entre enrolamentos de um transformador pode ser obtida por meio do uso de uma blindagem eletrostática colocada entre primário e secundário.

Quanto aos filtros de linha, seu objetivo é criar um caminho de baixa impedância de modo que a componentes de corrente em alta frequência circulem por tais caminhos, e não pela linha. Deve-se considerar dois tipos de corrente: a simétrica e a assimétrica.

No caso de correntes simétricas (ou de modo diferencial), sua existência na linha de alimentação se deve ao próprio chaveamento da fonte. A figura a seguir mostra esta situação. A redução da circulação pela linha pode ser obtida pelo uso de um filtro de segunda ordem, com a capacitância oferecendo um caminho de baixa impedância para a componente de corrente que se deseja atenuar. Os indutores criam uma oposição à fuga da corrente para a rede. Em 60 Hz a queda sobre tais indutâncias deve ser mínima.

Já para as correntes assimétricas (ou de modo comum), como sua principal origem está no acoplamento capacitivo do transistor com a terra, a redução se faz também com um filtro de segunda ordem. No entanto, o elemento indutivo deve ser do tipo acoplado e com polaridade adequada de enrolamentos, de modo que represente uma impedância elevada para correntes assimétricas, mas não implique em nenhuma impedância para a corrente simétrica. Os capacitores fornecem o caminho alternativo para a passagem de tal componente de corrente, como se observa na figura 1.7.

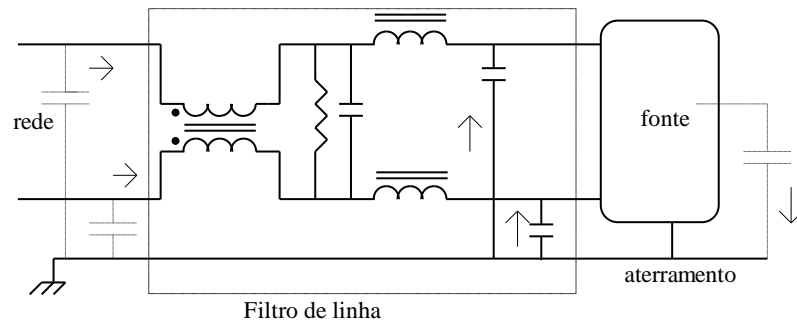


Figura 1.7 Circuito típico com filtro de linha.

1.7 A faixa intermediária (3 kHz a 150 kHz): as “supraharmônicas”

A preocupação com a presença de ruído eletromagnético conduzido nessa faixa de frequência tem crescido em virtude, principalmente, da proliferação de inversores associados a painéis fotovoltaicos de uso residencial, assim como diversas outras aplicações [1.10].

O uso de inversores conectando um barramento CC à rede CA está presentes em inúmeras aplicações, como painéis fotovoltaicos, fontes ininterruptas de energia (UPS), sistemas de carga/descarga de bancos de baterias, sistemas de acionamento/frenagem de motores, etc. Em um cenário de redes inteligentes de eletricidade (smart grids), que se anuncia de grande interesse e viabilidade, a presença de tais conversores dispersos pela rede é certa, de modo que se torna importante qualificar e quantificar a presença de componentes advindos da comutação dos conversores eletrônicos sobre a rede elétrica. Tais análises vão além da faixa de harmônicas (2 kHz no padrão europeu, 3 kHz no padrão norte-americano) e, de fato, tais componentes espectrais não devem ser qualificadas como harmônicas, uma vez que sua origem está na comutação dos conversores, sem relação direta com a frequência da rede [1.11].

Ainda não há normas específicas, mas diversos organismos e instituições acadêmicas têm desenvolvido estudos nesse assunto, dado a potencial deterioração na qualidade da tensão que pode advir com o crescimento destes elementos de interferência [1.12].

Nesta faixa de frequência, a rede elétrica (baixa tensão) pode ser utilizada para a transmissão de sinais, seja na rede de distribuição pública, seja no interior de uma instalação de consumidor [1.13]. Indicam-se as bandas de frequência indicadas a cada tipo de usuário, os limites de tensão de saída dos sinais e os limites de distúrbios conduzido e irradiado, além dos métodos de medida.

A faixa de 3 a 9 kHz é limitada aos fornecedores de energia elétrica. Eventualmente, com autorização do fornecedor, o usuário pode utilizar também esta faixa dentro de suas instalações. Na faixa de 9 a 95 kHz, o uso é exclusivo do fornecedor de energia elétrica e seus licenciados. Nas faixas de 95 a 125 kHz e de 140 a 148,5 kHz, o uso é exclusivamente privado, e seu uso não exige um protocolo de acesso. Entre 125 e 140 kHz o uso é também privado, mas com a necessidade de um protocolo de acesso.

A Figura , em uma instalação na FEEC-Unicamp, mostra claramente a distorção em supraharmônica na visualização no domínio do tempo e no da frequência, tanto da tensão quanto da corrente na saída de um inversor FV conectado em conjunto com outros três inversores.

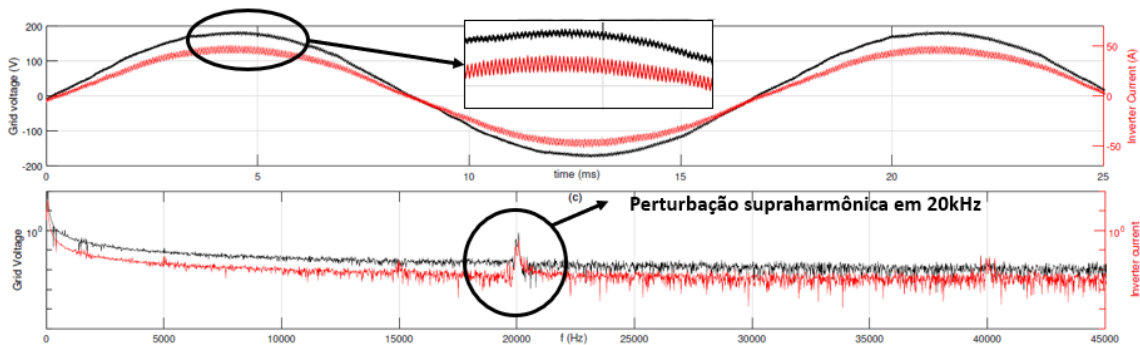


Figura 1.8 – Formas de onda e espectro de frequências no ponto de conexão comum de inversores FV na FEEC-UNICAMP, com sinais de corrente (vermelho) e tensão (preto).

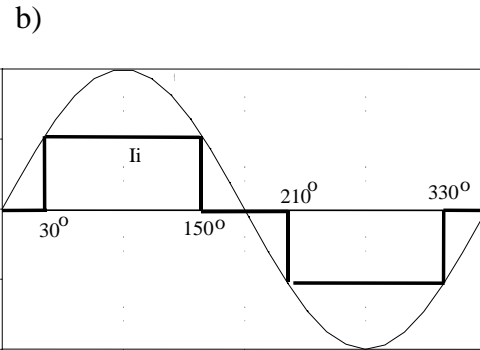
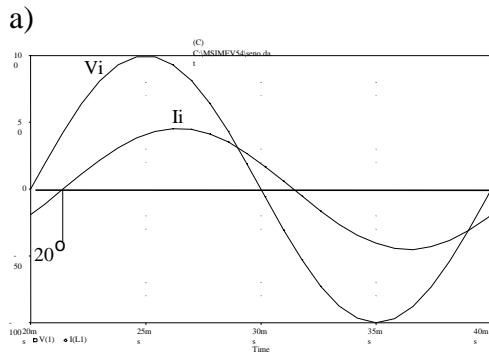
1.8 Bibliografia:

- [1.1] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 8, vigente a partir de 01/01/2017
- [1.2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Normativa N° 414, de 9 de Setembro de 2010.
- [1.3] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Normativa No. 569, de 23 de Julho de 2013.
- [1.4] ABNT NBR 14418:2011: Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares – Prescrições de desempenho
- [1.5] IEC 61000-3-2: "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current $\leq 16A$ per phase)". International Electrotechnical Commission, 2015.
- [1.6] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System. Project IEEE-519. Outubro 1991.
- [1.7] International Standard IEC-CISPR16, International Committee on Radio Interference: "C.I.S.P.R. Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measuring Methods", 1993.

- [1.8] International Standard CISPR11, International Committee on Radio Interference: "Limits and Methods of Measurements of Electromagnetic Disturbance Characteristics of Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-frequency Equipment", 1990
- [1.9] E. F. Magnus, J. C. M. de Lima, V. M. Canali, J. A. Pomilio and F. S. dos Reis: "Tool for Conducted EMI and Filter Design", Proc. Of the IEEE IECON 2003, Roanoke, USA, Nov. 2003, pp. 23262331.
- [1.10] IEC Technical Specification, IEC TS 62578, "Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz", 2nd edition, April 2015.
- [1.11] R. K. Carneiro, J. I. Y. Ota and J. A. Pomilio, "Field Measurements of Non-intentional Emissions above 2 kHz in Photovoltaic Inverter Installations," 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 2020
- [1.12] J. I. Y. Ota, R. K. Carneiro, J. P. Santos, F. C. Rufino, J. Pomilio, "Problema emergente das distorções entre 2 e 150 kHz em redes elétricas: Levantamento bibliográfico", VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 25 a 28 de agosto de 2020
- [1.13] European Standard 50065-1, European Committee for Electrotechnical Standardization: "Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz - Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances", Jan. 1991

Exercícios

1. Supondo a tensão senoidal, determine a DHT e o fator de potência das seguintes formas de corrente (explícite os valores dos fatores de forma e de deslocamento):



2. Considere as formas de onda mostradas a seguir, obtidas de um retificador monofásico a diodos em ponte completa, com filtro LC e carga resistiva. O traço superior (canal 1) indica a tensão de entrada; o traço intermediário (canal 2) indica a tensão em um resistor de 0,1 ohm, colocado na entrada do retificador; o traço inferior é o produto dos canais 1 e 2.

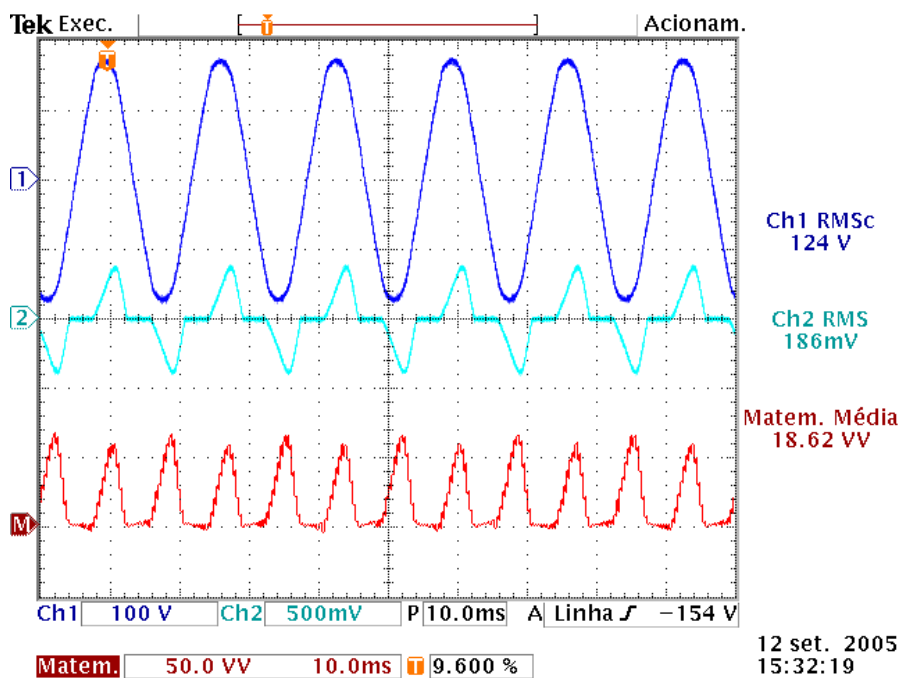
Sabe-se que a defasagem entre a tensão (suposta senoidal) e a componente fundamental da corrente é de 10°. Determine

- a) Potência aparente;
- b) Fator de potência;
- c) DHT
- d) FF_i

$$DHT = \sqrt{\left(\frac{I_i}{I_{i1}}\right)^2} - 1 \quad FF_i = \frac{I_{i1}}{I_i} \quad FP = \frac{FD}{\sqrt{1 + DHT^2}}$$

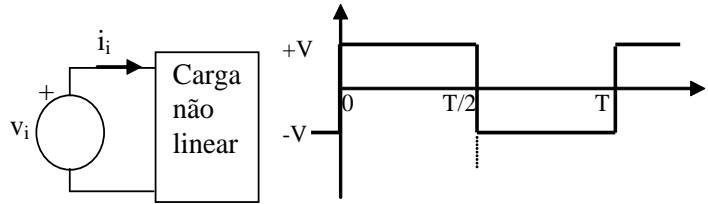
I_i : valor eficaz da corrente de entrada

I_{i1} : valor eficaz da componente fundamental da corrente de entrada



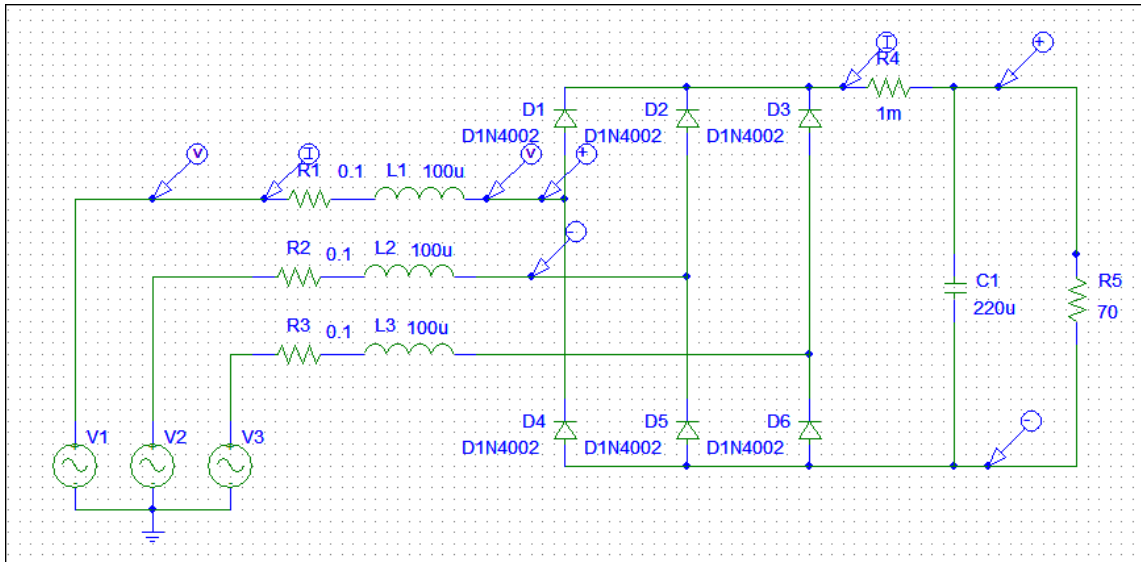
12 set. 2005
15:32:19

3. Considere um circuito elétrico ao lado no qual a tensão de alimentação é quadrada. A carga não linear é um retificador a diodos que tem em sua saída um filtro capacitivo alimentando uma carga resistiva de valor R.



- Desenhe a forma de onda da corrente de entrada.
- Determine o fator de potência.
- Comente sobre a possibilidade de definir o fator de deslocamento da fundamental e o fator de forma da corrente.
- Comente sobre o dimensionamento do capacitor de filtro no lado CC.

4. Simule o circuito abaixo, impondo condições iniciais nulas nos indutores e no capacitor. As tensões de entrada devem ter 50 V de amplitude, 60 Hz, adequadamente defasadas. Simule pelo menos seis ciclos (100 ms).



- Determine o fator de potência por fase, considerando a tensão de fase na fase ligada a V1 (ângulo inicial 0°).
- Determine o fator de deslocamento da fundamental e a DHT. Para tanto utilize a função Fourier disponível no menu Transient.
- Retire o capacitor do lado CC e repita os itens anteriores.

