

## 2. DEFINIÇÕES E NORMAS DA QEE

Serão consideradas a norma MIL-STD-704F<sup>i</sup> e a recomendação RTCA DO-160F<sup>ii</sup>.

### 2.1. Normatização da Qualidade da Energia Elétrica em Aeronaves

O escopo da MIL-STD-704F é estabelecer os requisitos e características do sistema elétrico de uma aeronave no ponto de acoplamento comum (PAC) das cargas. Interferência eletromagnética e surtos de tensão não são abrangidos pela norma. Os procedimentos para testes dos equipamentos estão descritos em um outro conjunto de especificações<sup>1</sup>, para cada situação de alimentação (CC ou CA) e nível de tensão/frequência.

Um sistema elétrico de uma aeronave é composto por uma variedade de componentes de potência (geração, conversão, inversão, controle, distribuição, dispositivos de gerenciamento de energia, etc.) que fornecem energia aos barramentos da aeronave onde estão conectados os equipamentos. Cada componente e subsistema deve ser projetado e testado por sua própria especificação, o que frequentemente tem requisitos mais severos que os da MIL-STD-704, de modo a compensar os efeitos das outras cargas, bem como a variação da tensão do alimentador.

Portanto, os limites especificados na MIL-STD-704 são requisitos mínimos para a compatibilidade de equipamento com a rede elétrica da aeronave.

A publicação MIL-HDBK-704, Parte 1, fornece uma orientação geral e informações sobre testes de conformidade, classificação por tipo de alimentação, condições elétricas operacionais de aeronaves e especificações de utilização de equipamentos. As partes de 2 a 8 fornecem orientações sobre a aplicação dos testes de conformidade para equipamentos em cada alimentação específica. Estas séries de manuais e a MIL-STD-704 são documentos complementares.

Já a RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*<sup>2</sup>) DO-160F tem como objetivo e aplicabilidade descrever um conjunto de condições padrão mínimas de teste e procedimentos de ensaio para equipamentos embarcados. Os objetivos destes ensaios são definir um ambiente controlado (laboratório) e os meios de assegurar as características de desempenho do equipamento, em condições ambientais semelhantes às que podem ser encontradas na operação normal de equipamento. As condições de ensaio e procedimentos podem ser usados em conjunto com as normas de desempenho aplicáveis ao equipamento, tal como uma especificação mínima,

---

<sup>1</sup> MIL-HDBK-704-1 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS

MIL-HDBK-704-2 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS SINGLE PHASE, 400 HZ, 115 VOLT

MIL-HDBK-704-3 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS THREE PHASE, 400 HZ, 115 VOLT

MIL-HDBK-704-4 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS SINGLE PHASE, VARIABLE FREQUENCY, 115 VOLT

MIL-HDBK-704-5 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS THREE PHASE, VARIABLE FREQUENCY, 115 VOLT

MIL-HDBK-704-6 TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS SINGLE PHASE, 60 HZ, 115 VOLT

MIL-HDBK-704-7 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS 270 VDC

MIL-HDBK-704-8 GUIDANCE FOR TEST PROCEDURES FOR DEMONSTRATION OF UTILIZATION EQUIPMENT COMPLIANCE TO AIRCRAFT ELECTRICAL POWER CHARACTERISTICS 28 VDC

<sup>2</sup> <http://www.rtca.org/aboutrtca.asp>

de modo a assegurar a adequada confiabilidade de desempenho durante a utilização a bordo de uma aeronave.

## 2.2. Definições

- a. **Tensão CA:** valor eficaz (RMS – *root mean square*) da tensão fase-neutro, calculado em um semi-ciclo.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} v^2(t).dt} \quad (2.1)$$

- Tensão CA de regime permanente é a média no tempo do valor eficaz em um intervalo de tempo de até 1 segundo.
  - Tensão CA de pico é o valor máximo absoluto do valor instantâneo da tensão.
  - A componente CC da tensão CA é o valor médio da tensão.
- b. **Regime permanente:** condição na qual as características do sistema permanecem dentro de limites estabelecidos para operação normal. A condição de regime permanente pode incluir transitórios menores.
- c. **Modulação de tensão:** variação da tensão CA, em regime permanente. Suas causas usuais são efeitos do sistema de regulação de tensão, variações de velocidade dos geradores, variações da carga. A amplitude da modulação de tensão é a diferença entre os valores máximo e mínimo em um intervalo de 1 segundo, em condições de regime permanente.
- d. **Diferença de fase da tensão:** diferença em graus elétricos entre as componentes fundamentais entre duas fases quaisquer, tomando como referência cruzamentos sucessivos pelo zero.
- e. **Desbalanço de tensão:** a máxima diferença entre os valores eficazes das tensões de fase nos terminais do equipamento de utilização.
- f. **Carga pulsada:** cargas cuja demanda de potência varia mesmo em situação de regime permanente.
- g. **Ripple** (ondulação): é a variação da grandeza elétrica (tensão ou corrente) sobre o valor médio, em uma situação de regime permanente. A amplitude do *ripple* é o máximo valor da diferença entre o valor médio e o valor instantâneo.
- h. **Fator de crista:** valor absoluto da relação entre o valor de pico e o valor eficaz da forma de onda da tensão.
- i. **Componente Fundamental** é a componente senoidal, na frequência nominal de um sinal de tensão ou corrente.
- j. **Corrente CA:** valor eficaz, calculado em meio ciclo, medido entre cruzamentos sucessivos pelo zero da componente fundamental da corrente.
- k. **Modulação de corrente:** é a diferença entre os valores máximos e mínimos da corrente.
- l. **Valor de regime permanente da frequência:** média dos valores de frequência em um intervalo não superior a 1 minuto
- m. **Modulação em frequência:** diferença entre os valores máximos e mínimos que ocorrem em um intervalo de 1 minuto, em condições de regime permanente. É uma medida da estabilidade do sistema de regulação de frequência.
- n. **Sub e sobre-frequência:** frequências que excedem os limites normais de operação, sendo limitadas pela ação de dispositivos de proteção. A taxa de variação da frequência é definida como o valor absoluto da variação de frequência em um intervalo de tempo, sendo dada em [Hz/s].

- o. **Sub e sobretensão:** tensões que excedem os limites normais de operação, sendo limitadas pela ação de dispositivos de proteção.
- p. **Desbalanço da carga:** para uma carga CA trifásica, é a diferença entre as cargas de maior e menos valor nas fases.
- q. **Distorção:** é o valor eficaz de uma forma de onda alternada (CA), retirando-se sua componente fundamental. Em um sistema CC, a distorção é definida como o valor eficaz da grandeza, retirando-se o valor médio.
- r. **Fator de distorção:** o fator de distorção CA é a relação entre a distorção CA e o valor eficaz da componente fundamental. O fator de distorção CC é a relação entre a distorção CC e o valor médio de regime permanente.

$$FD = \frac{I_{DIS}}{I_1} = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{I_1^2} - 1}, \quad I_{DIS} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (2.2)$$

- s. **Espectro da distorção:** quantifica a distorção CA ou CC em termos da amplitude de cada componente espectral. Inclui componentes devidos à modulação de amplitude e frequência, bem como componentes harmônicas (múltiplas da fundamental) e não harmônicas.
- t. **Transitórios:** variação de grandeza elétrica que normalmente decorre de distúrbios normais, como variações de carga ou mudança de velocidade da turbina. Pode se dar também em virtude de uma interrupção momentânea na alimentação.
  - Transitórios que não excedam os limites de operação normal são denominados transitórios menores.
  - Aqueles que excedem os limites de regime permanente mas extrapolam os limites de operação normal são chamados de transitórios normais.
  - Os transitórios que excedem os limites de operação normal, como resultado de um distúrbio anormal e, eventualmente, retornam aos limites de regime permanente, são chamados de transitórios anormais.
- u. **Sistema elétrico de aeronave:** consiste de uma fonte de energia principal, fontes de emergência, equipamentos de conversão de energia, dispositivos de controle e proteção e uma rede de interconexão. A fonte principal é acionada pelas turbinas de propulsão da aeronave. Fontes de emergência provêm de baterias, escape de ar das turbinas, fontes auxiliares independentes, geradores acionados pelo fluxo de ar e por sistemas hidráulicos.
- v. **Operação normal:** ocorre quando o sistema opera como previsto, na ausência de qualquer falta ou mau-funcionamento que leve a exceder os limites estabelecidos. Inclui todas as funções necessárias ao melhor funcionamento da aeronave, excetuando a condição de partida (já definida) Surtos conduzidos, provenientes de comutações de interruptores que não excedam 50 microssegundos são considerados normais, no sentido de serem gerados pela operação regular do sistema. Condições normais incluem comutações (liga/desliga) de equipamentos, procedimentos de sincronização e paralelismo de fontes e operação a partir de fontes externas.
- w. **Condições de partida:** é uma situação normal de alimentação associada ao início de funcionamento do sistema, quando os limites normais de operação podem ser excedidos nas seguintes situações:
  - Partida elétrica das turbinas
  - Partida via bateria de uma unidade auxiliar de energia (APU – *Auxiliary Power Unit*).

- x. **Operação em emergência:** ocorre após a perda das fontes principais. Uma fonte de capacidade limitada, independente do sistema principal, é usada para alimentar um conjunto selecionado de equipamentos e sistemas que mantenham a segurança do vôo e das pessoas.
- y. **Operação anormal:** quando ocorre um mau-funcionamento ou falha no sistema elétrico e os dispositivos de proteção atuam para remover a falha do restante do sistema, antes que os limites sejam excedidos. A fonte pode operar de um modo degradado, mesmo fora das condições normais e manter equipamentos operando dentro de certos limites.
- z. **Operação de transferência:** ocorre quando o sistema elétrico é manobrado entre fontes de energia distintas.
- aa. **Ponto de regulação (POR):** local no qual são medidas e reguladas as grandezas elétricas do sistema de geração.
- bb. **Fator de potência:** é a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem, desde que sejam periódicas (período T).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (2.3)$$

Tal definição é facilmente aplicável em circuitos monofásicos ou em circuitos polifásicos equilibrados. Em casos desequilibrados, a própria definição de valor eficaz se torna controversa. Tal discussão, no entanto, foge do escopo deste capítulo. Algumas informações pertinentes podem ser obtidas nas referências citadas. <sup>iii iv v vi</sup>

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:

$$FP_{seno} = \cos \phi \quad (2.4)$$

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

$$FP_{V_{seno}} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cdot \cos \phi_1 \quad (2.5)$$

onde  $I_1$  é o valor eficaz da componente fundamental e  $\phi_1$  é a defasagem entre esta componente da corrente e a onda de tensão.

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* e o termo em cosseno é chamado de *fator de deslocamento*.

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

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

Define-se a Distorção Harmônica Total – DHT (em inglês, THD - *Total Harmonic Distortion*) como sendo a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas da corrente e o da fundamental. Esse fator se difere do já definido Fator de Distorção, FD (eq. 2.2) por incluir apenas componentes harmônicas, ou seja, múltiplas da fundamental. Como o FD inclui quaisquer componentes espectrais tem-se que, para um mesmo sinal sob análise,  $FD \geq DHT$

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.6)$$

Assim, o FP pode ser rescrito como:

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DHT^2}} \quad (2.7)$$

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.

### 2.3. Requisitos gerais do sistema elétrico e de equipamentos da aeronave

- a) O sistema elétrico da aeronave deve prover energia aos equipamentos, com as características especificadas na MIL-STD-704F, durante todas as operações previstas.
- b) As características de uma fonte de energia referem-se às grandezas elétricas na saída de uma fonte sem regulação ou no POR de uma fonte regulada. É responsabilidade do fabricante prover as redes de distribuição de energia e proteções aos equipamentos, garantindo as características de qualidade definidas na norma.
- c) Dispositivos de proteção devem operar independentemente de ações de controle e de regulação dos equipamentos.
- d) Os equipamentos devem ser compatíveis com as alimentações presentes na aeronave e suas características, não devendo requerer condições melhores do que as estabelecidas.
- e) Os equipamentos devem ser compatíveis com as especificações de interferência eletromagnética e de surtos induzidos por descargas atmosféricas ou chaveamentos. EMI e surtos não são cobertos pela norma.
- f) Quando a alimentação estiver dentro do especificado pela norma, os equipamentos devem realizar plenamente suas funções, conforme especificação. O funcionamento normal de um equipamento não pode causar violação das características elétricas no PAC, nem provocar comportamentos adversos ou falhas no sistema elétrico.
  - Em operação normal o equipamento deve prover o desempenho de acordo com suas especificações.
  - Em operação anormal é aceitável que o equipamento apresente alguma degradação ou perda de função, a menos que o contrário esteja determinado nas especificações do mesmo. O equipamento não pode sofrer danos nem produzir situações inseguras. O equipamento deve, automaticamente reassumir o pleno funcionamento assim que a operação normal for retomada.

- O equipamento pode não ter que operar durante uma operação de transferência, a menos que isso esteja especificado. Deve retornar automaticamente ao pleno funcionamento assim que a operação normal for retomada.
  - Em uma situação de emergência o equipamento deve apresentar o desempenho especificado caso isso seja essencial à segurança do voo.
  - Nas condições de partida o equipamento deve apresentar o desempenho especificado de acordo com suas características, caso seu desempenho seja essencial nesta condição de operação.
- g) Falhas nos sistemas de alimentação (CA ou CC) ou a perda de uma ou mais fases (CA) nos terminais de qualquer equipamento não podem causar danos ou operação insegura dos equipamentos.
- h) Equipamentos acima de 500 VA, alimentados em CA, devem utilizar alimentação trifásica balanceada.
- Cargas desbalanceadas de equipamentos individuais devem estar em conformidade com os limites da figura abaixo.
  - Para cargas acima de 30 kVA, o desbalanço não pode ser superior a 3,33% da carga trifásica total.
  - Cargas monofásicas podem ser usadas apenas com alimentação entre fase e neutro.
  - Não pode haver retificação de meia onda (para não produzir nível CC na corrente pelo sistema).

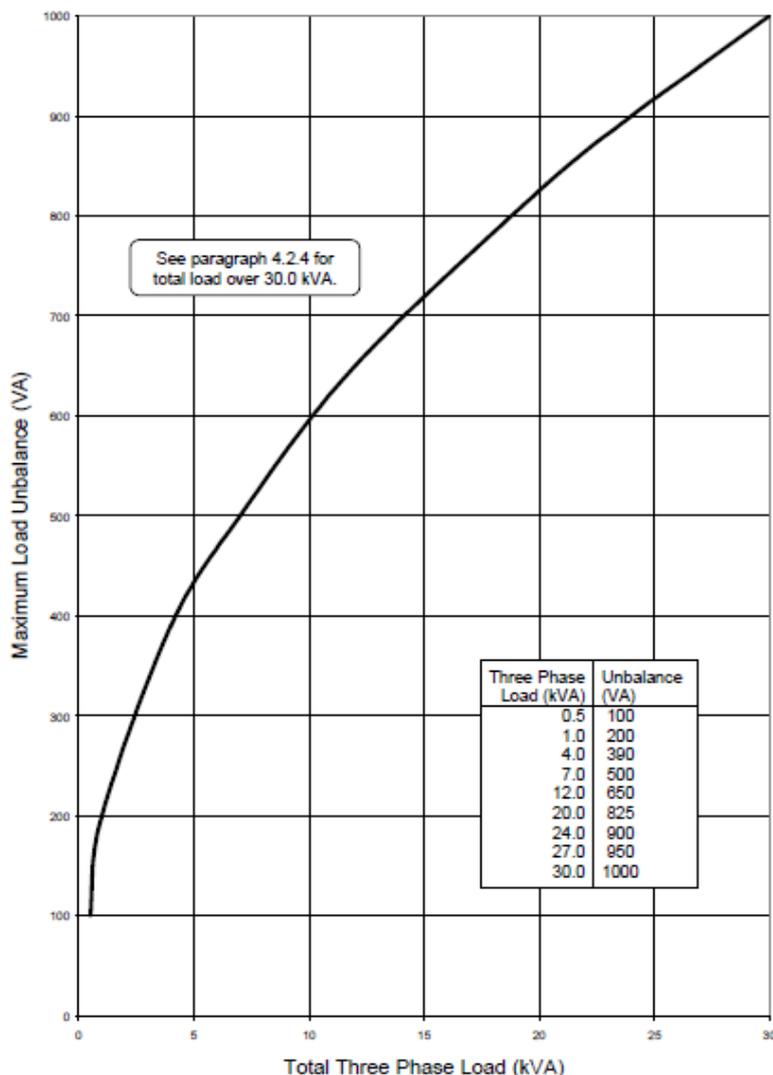


Figura 2.1 Desbalanço admissível para cargas trifásicas

- i) Uma fonte de alimentação externa deve prover energia com as características especificadas na norma. A fim de compensar a queda de tensão (em regime permanente) entre o ponto de conexão com a fonte externa e o ponto de acoplamento dos equipamentos, a tensão no contato externo deve ser:
- Sistema CA de 113 a 118 volts (com queda de 0 a 5 volts)
  - Sistema 28 VDC, de 24 a 29 volts (com queda de 0 a 2 volts)
  - Sistema 270 VDC, de 260 a 280 volts (com queda de 0 a 10 volts)
- j) Os equipamentos devem ser testados de modo a comprovar sua compatibilidade com as condições da norma e demais especificações pertinentes.

#### 2.4. Requisitos específicos

- a) Em situações de transferência de alimentação em um barramento, a variação da tensão e da frequência entre o valor nominal e zero não pode se prolongar mais do que 50 ms. Um transitório normal pode ocorrer neste procedimento.

- b) **Sistemas de alimentação CA** podem fornecer energia monofásica ou trifásica com neutro aterrado.
- A forma de onda deve ser senoidal com tensão de 115/200 V e frequência nominal de 400 Hz.
  - Operação com frequência variável e sistemas com o dobro da tensão podem ser usadas como alternativa.
  - A faixa de variação é de 360 a 800Hz, com tensão nominal de 115/200V.
  - Para sistemas de maior tensão CA, os valores são 230/400 V e frequência de 400 Hz.
  - Uma terceira alternativa para sistemas de alimentação secundários é em 115 V, 60 Hz, monofásico. São usados apenas para alimentação de equipamentos COTS (*Commercial off-the-shelf*).
  - Não necessariamente todos os sistemas têm que estar presentes. A escolha da alimentação deve levar em conta a disponibilidade e a capacidade instalada.
- c) A sequência de fase deve ser A-B-C, no sentido anti-horário, com os condutores adequadamente identificados. Os terminais dos geradores serão indicados, respectivamente, como T1-T2-T3.

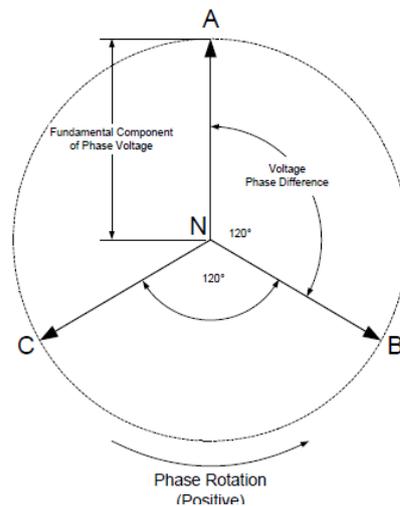


Figura 2.2 Sequência de fase.

- d) As **condições normais de operação** devem estar de acordo com as figura 2.3, 2.4 e 2.5, bem como com a Tabela 2.1 (400 Hz) e Tabela 2.2 (freq. variável).

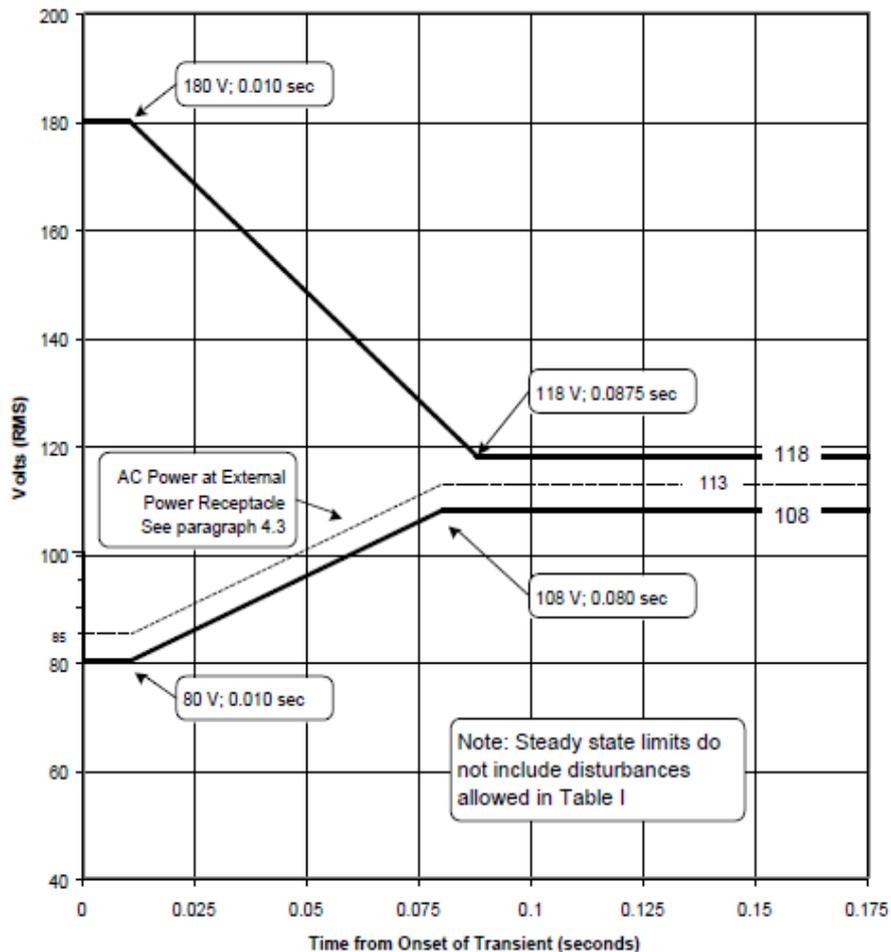


Figura 2.3 Limites de operação normal para sistemas de frequência fixa (400 Hz) ou variável.

TABELA 2.1 Condições normais para sistema de frequência fixa (400 Hz)

<b>Características de Regime Permanente</b>	<b>Limites</b>
Tensão	108 a 118 V
Desbalanço de tensão	3 V
Modulação de tensão	2,5 V
Diferença de fase entre tensões	116° a 124°
Fator de distorção	5%
Espectro de distorção	Figura 2.5
Fator de crista	1.31 a 1.51
Componente CC	+100 mV a -100 mV
Frequência	393 a 407 Hz
Modulação em frequência	4 Hz
<b>Características transitórias</b>	<b>Limites</b>
Pico de tensão	$\pm 271,8$ V
Transitório de tensão	Figura 2.3
Transitório de frequência	Figura 2.4

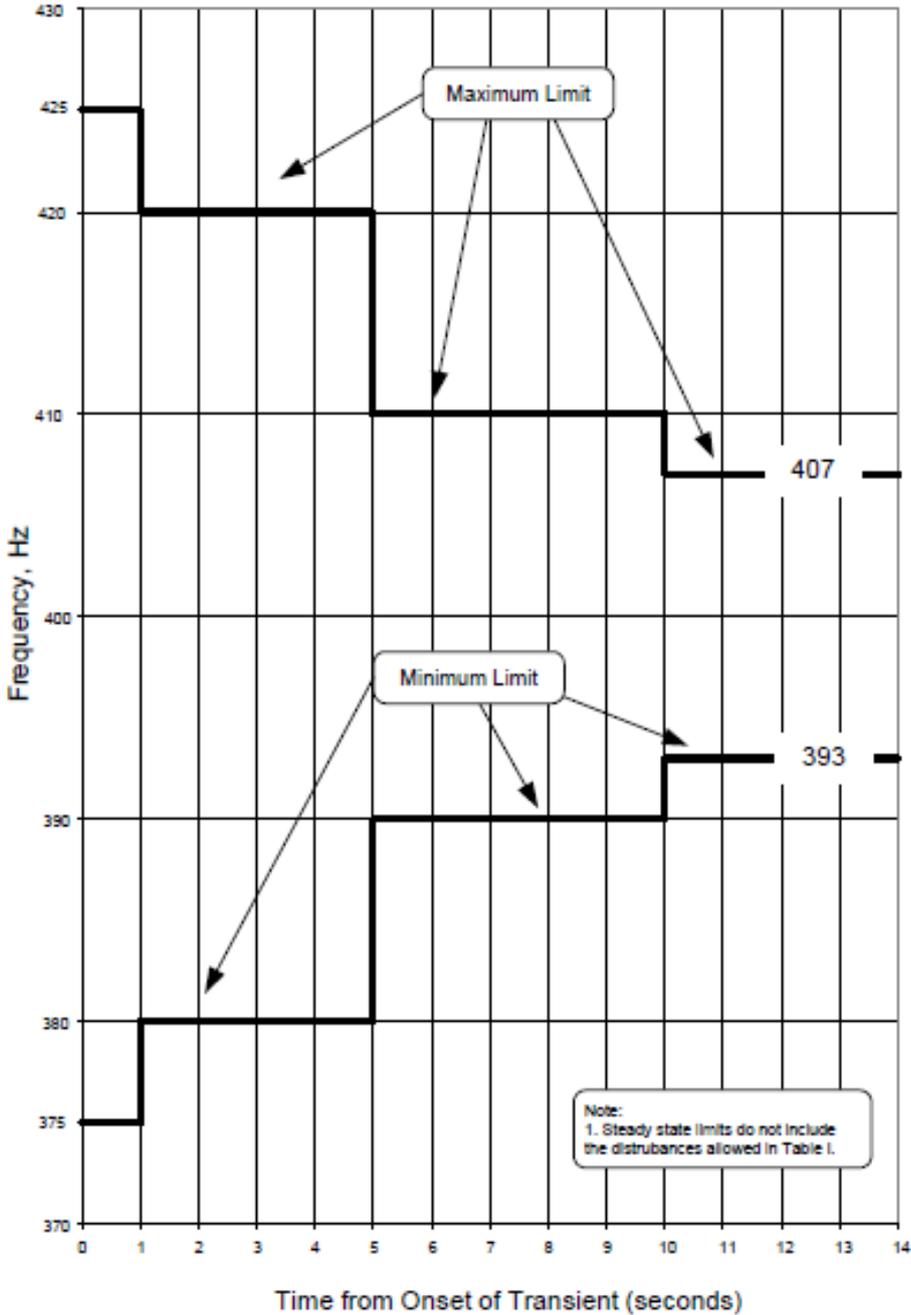


Figura 2.4 Desvio de frequência admissível durante transitórios.

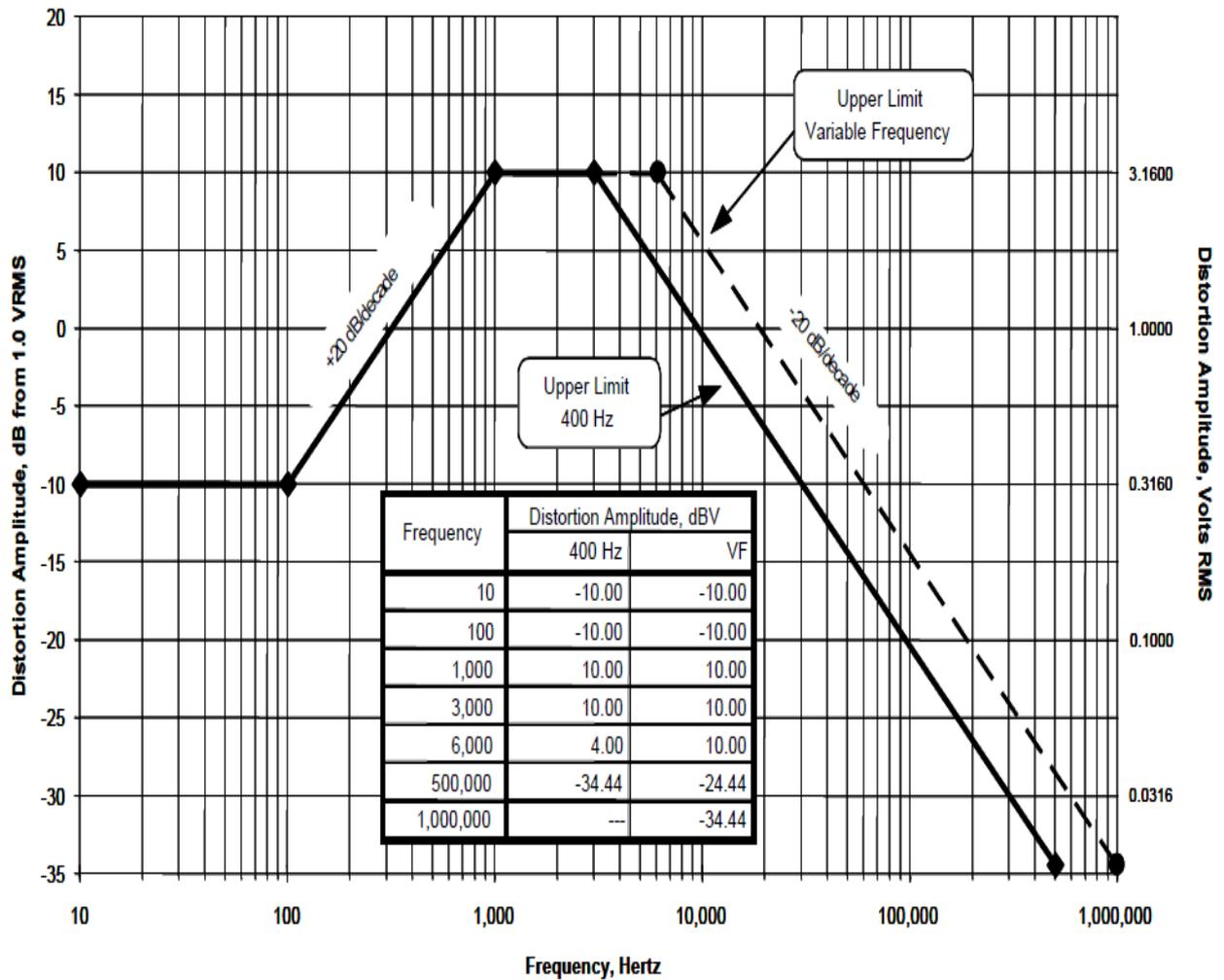


Figura 2.5 Limites de distorção para sistema 400 Hz ou de frequência variável.

TABELA 2.2 Condições normais para sistema de frequência variável

Características de Regime Permanente	Limites
Tensão	108 a 118 V
Desbalanço de tensão	3 V
Modulação de tensão	2,5 V
Diferença de fase entre tensões	116° a 124°
Fator de distorção	5%
Espectro de distorção	Figura 2.5
Fator de crista	1.31 a 1.51
Componente CC	+100 mV a -100 mV
Frequência	360 a 800 Hz
Modulação em frequência	4 Hz
Características transitórias	Limites
Pico de tensão	+271,8 V
Transitório de tensão	Figura 2.3
Transitório de frequência	Não exceder 360 a 800 Hz
Taxa de variação de frequência	250 Hz/s, medido em um intervalo de tempo superior a 25 ms

- Para sistemas de 60 Hz, os limites estão mostrados nas figuras 2.6, 2.7 e 2.8, assim como na Tabela 2.3.

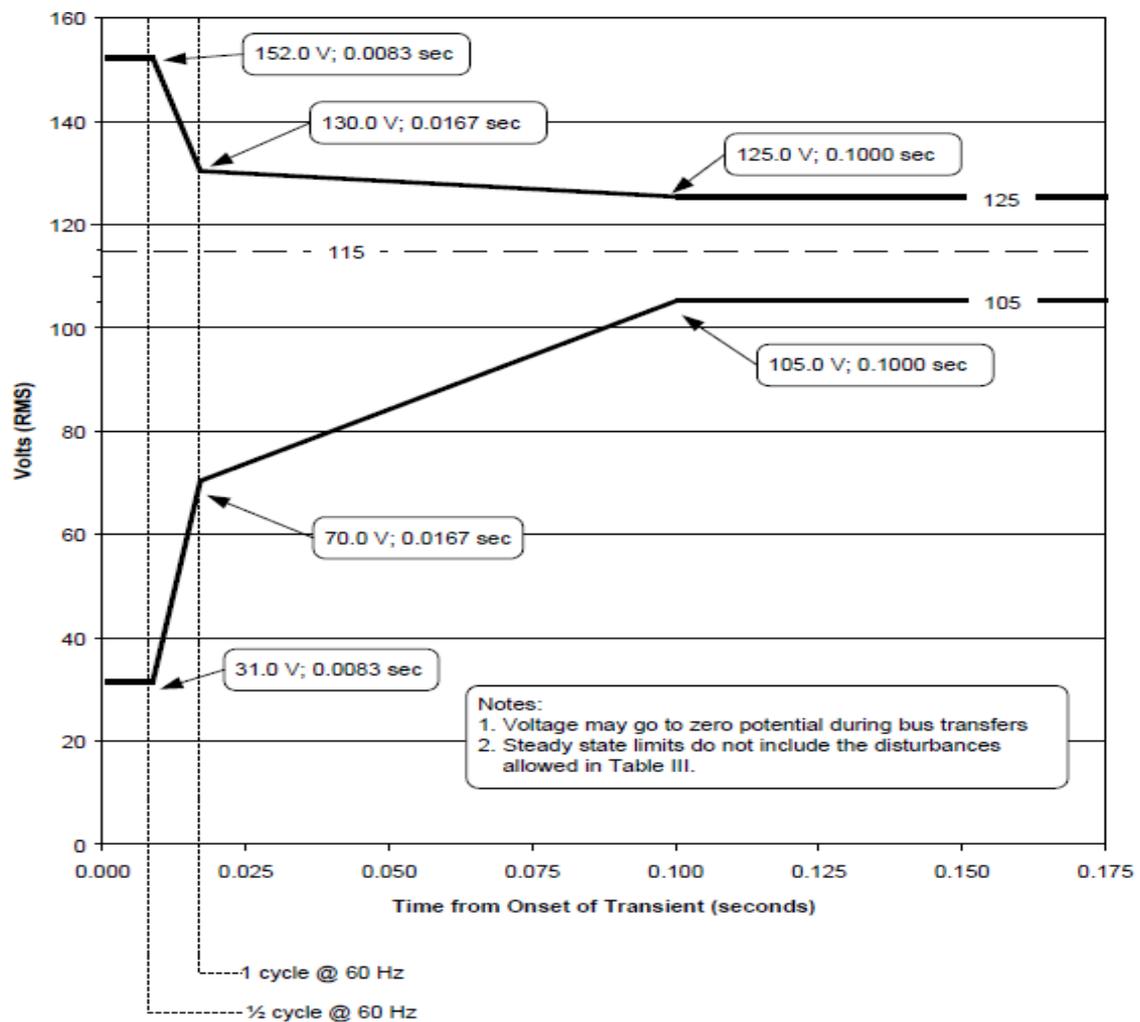


Figura 2.6 Envelope de tensão para sistema de 60 Hz.

TABELA 2.3 Condições normais para sistema de frequência de 60 Hz

<b>Características de Regime Permanente</b>	<b>Limites</b>
Tensão	105 a 125 V
Desbalanço de tensão	3 V
Modulação de tensão	2,5 V
Diferença de fase entre tensões	116° a 124°
Fator de distorção	5%
Espectro de distorção	Figura 2.8
Fator de crista	1.31 a 1.51
Componente CC	+100 mV a -100 mV
Frequência	59,5 a 60,5 Hz
Modulação em frequência	0,5 Hz
<b>Características transitórias</b>	<b>Limites</b>
Pico de tensão	+271,8 V
Transitório de tensão	Figura 2.6
Transitório de frequência	Figura 2.7

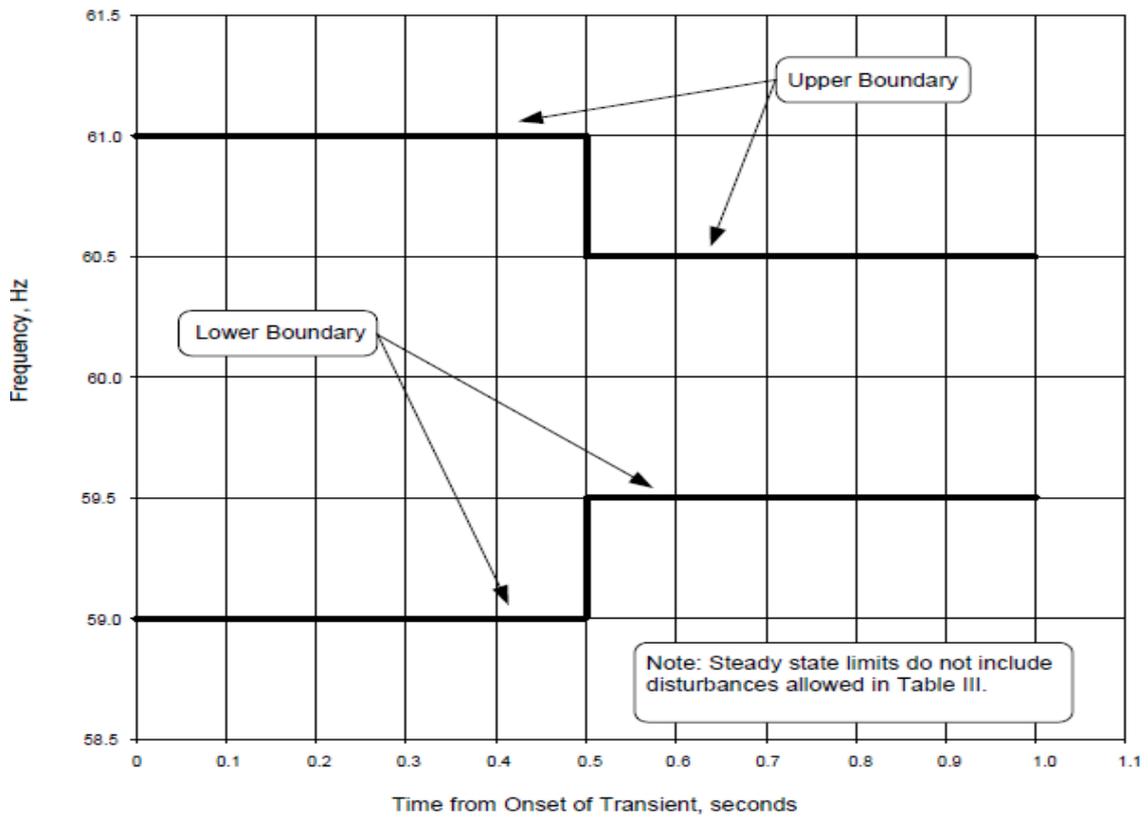


Figura 2.7 Envelope para transitório de frequência, em sistema de 60 Hz.

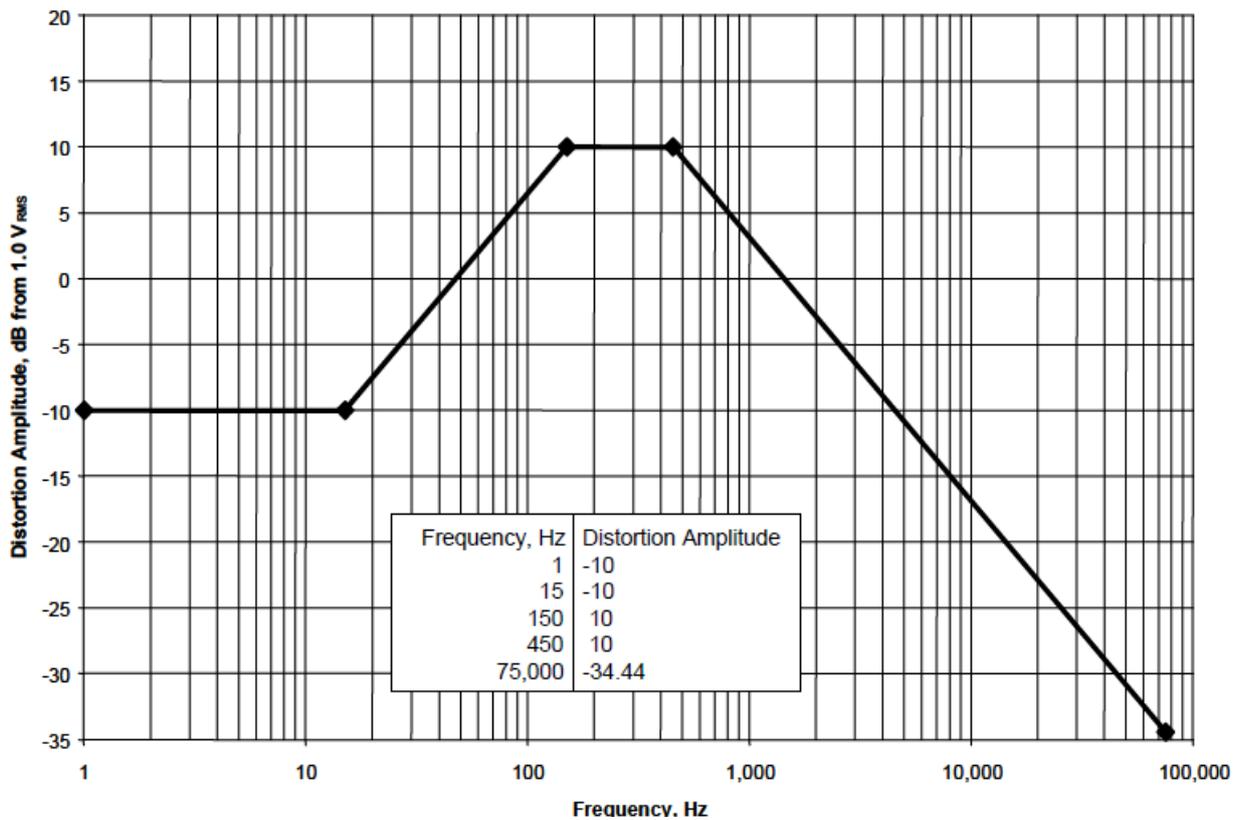


Figura 2.8 Limites de distorção para sistema de 60 Hz.

e) Nas **condições anormais de operação**, os limites de sub e sobre-tensão devem estar de acordo com as figura 2.9 para 400 Hz e freq. variável e na 2.10 para 60 Hz.

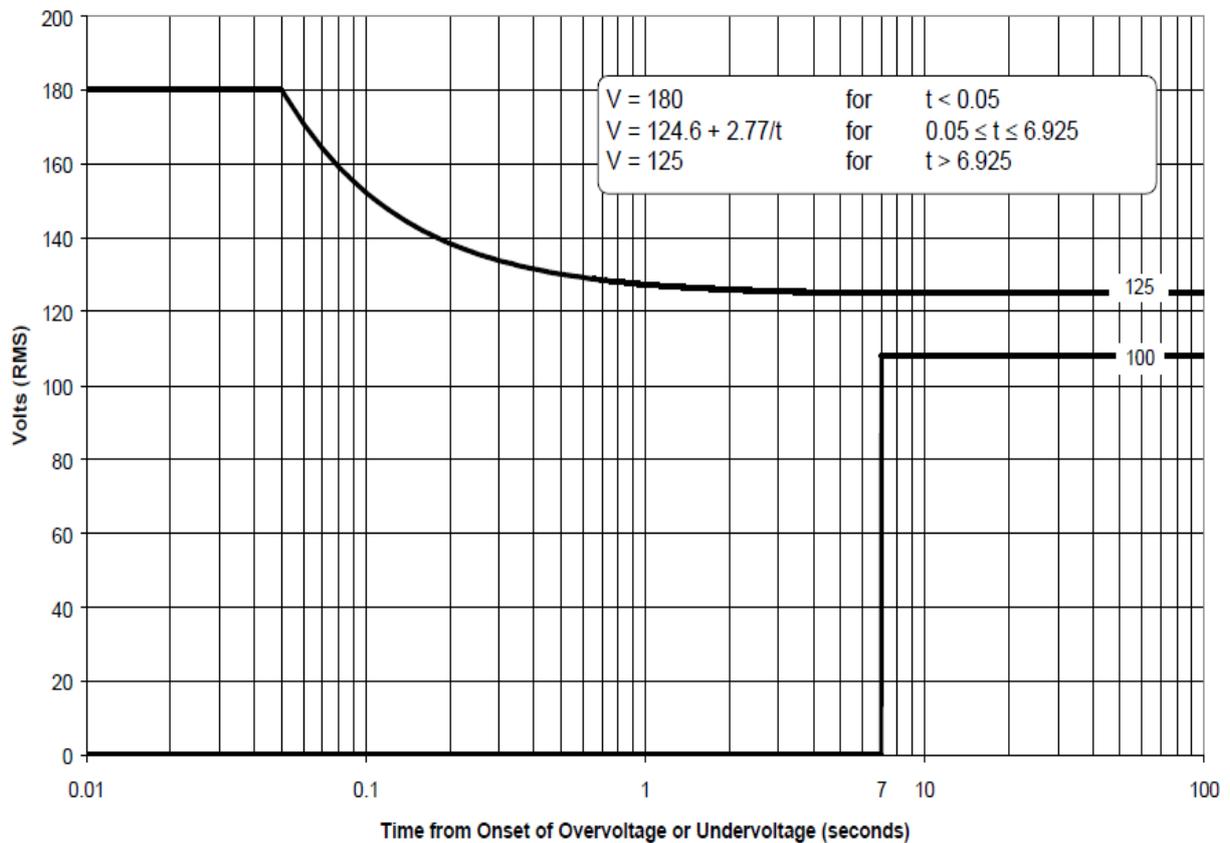


Figura 2.9 Limites de sub e sobre-tensão para sistema em 400 Hz e em frequência variável.

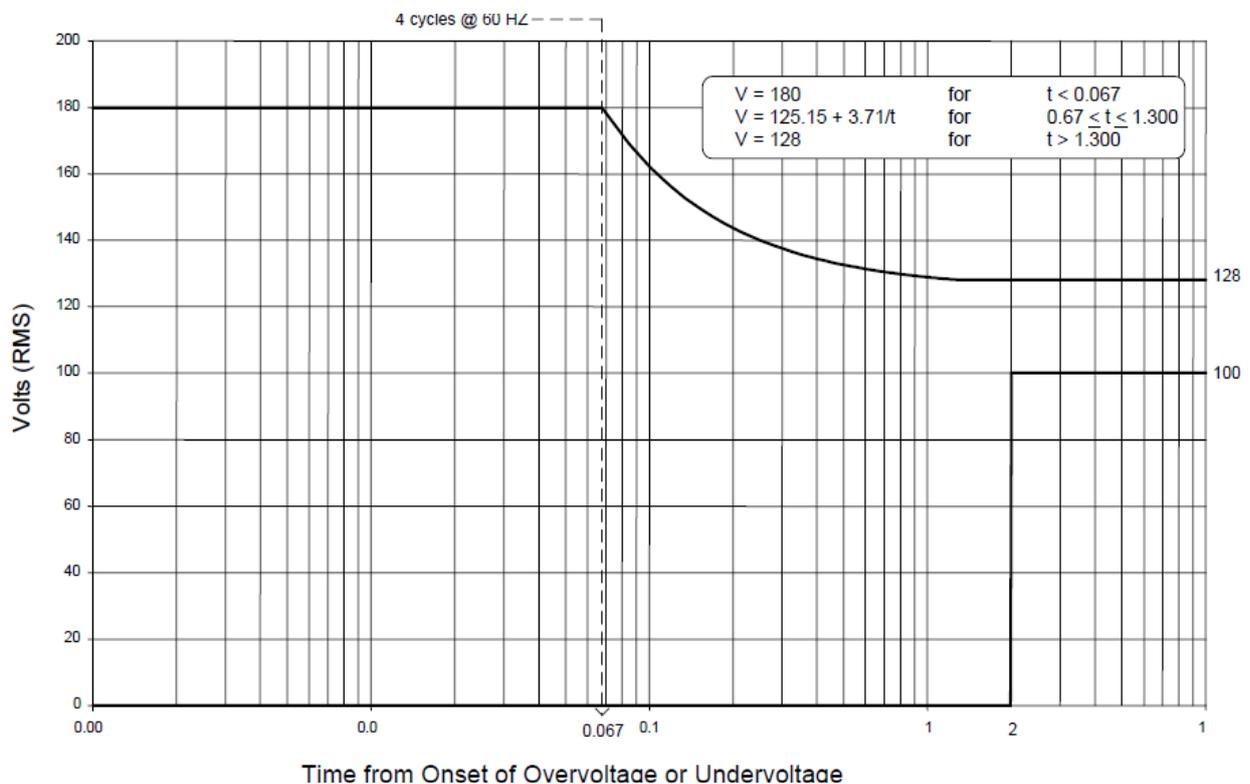


Figura 2.10 Limites de sub e sobre-tensão para sistema em 60 Hz.

- Os limites de sub e sobre-frequência estão nas figuras 2.11 e 2.12, para 400Hz e 60 Hz, respectivamente.

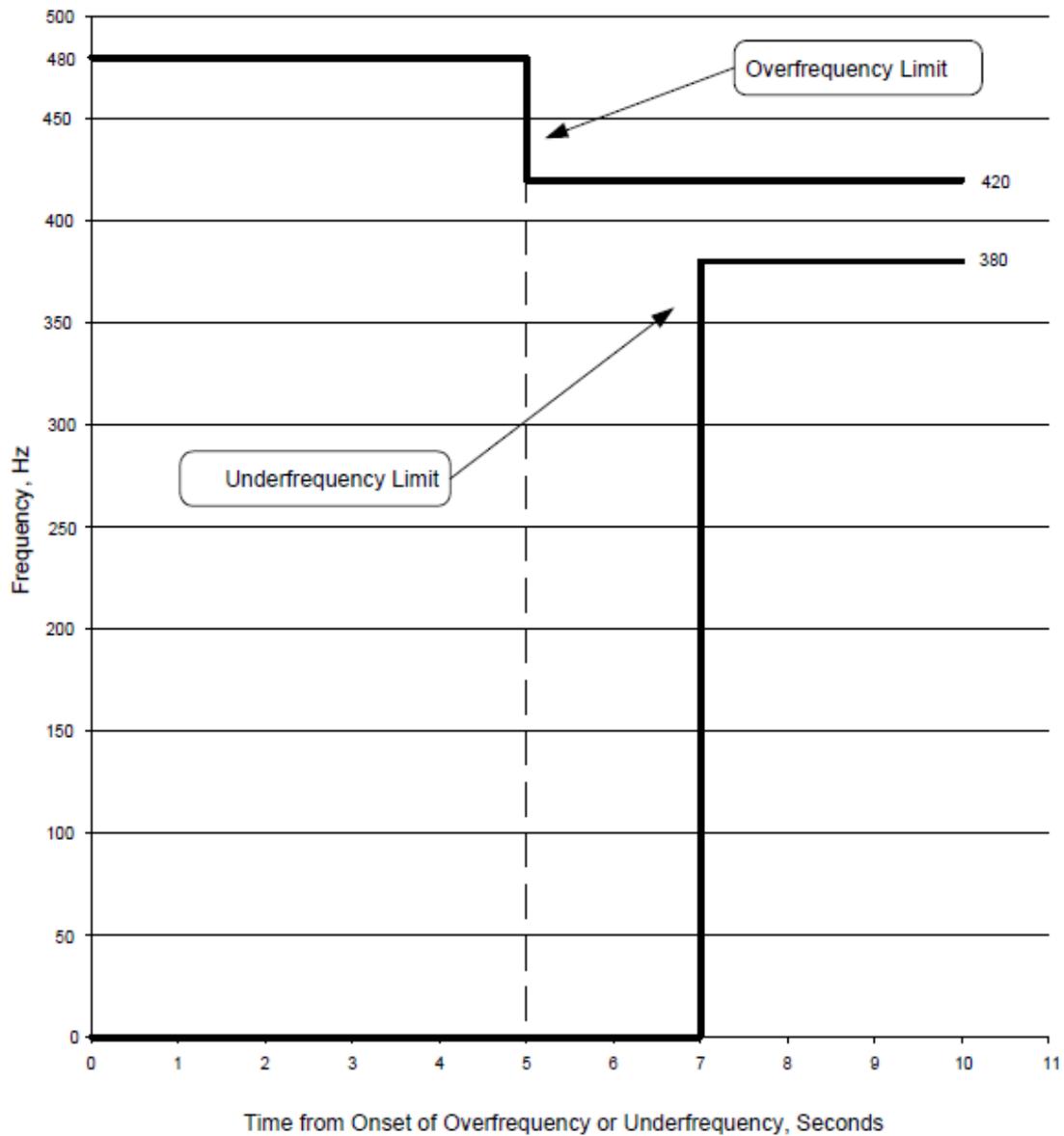


Figura 2.11 Limites de sub e sobre-frequência para sistema em 400 Hz.

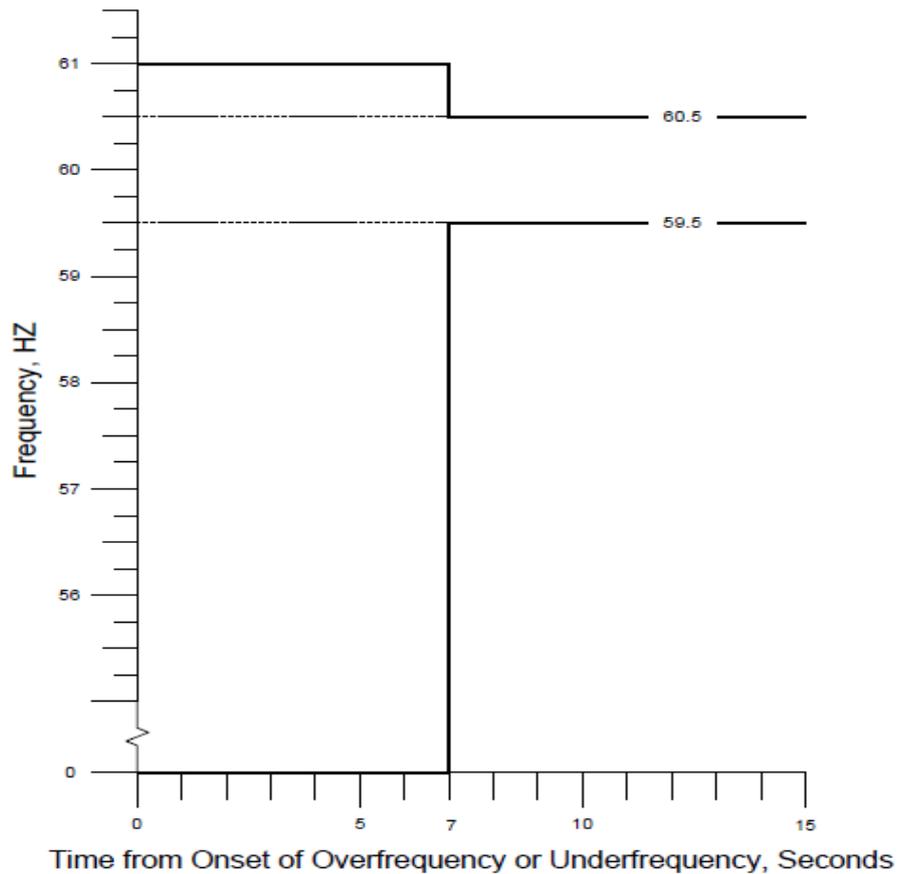


Figura 2.12 Limites de sub e sobre-frequência para sistema em 60 Hz.

- Nos sistemas de frequência variável, mesmo nos transitórios, não se deve exceder os limites de regime permanente (360 - 800 Hz). A taxa de variação não deve exceder 500 Hz/s, aferida em um intervalo de tempo maior que 25 ms.
- f) Nas **condições de emergência** todas as características definidas na operação normal para os sistemas CA devem ser mantidas.
- g) **Sistemas de alimentação CC** fornecem energia através de dois condutores ou com terminal negativo aterrado, servindo como retorno. As tensões nominais são 28 V ou 270 V. Estes sistemas devem estar em conformidade com as figuras 2.13 a 2.18 e Tabela 2.4.

TABELA 2.4 Característica de operação normal em sistemas CC

Características de regime permanente	Limites	
	Sistema 28 V	Sistema 270 V
Tensão	22 a 29 V	250 a 280 V
Fator de distorção	3,5% máximo	1,5% máximo
Espectro de distorção	Figura 2.15	Figura 2.18
Amplitude de <i>ripple</i>	1,5 V máximo	6 V máximo
Característica em transitório	Limite	
Tensão	Figura 2.13	Figura 2.16

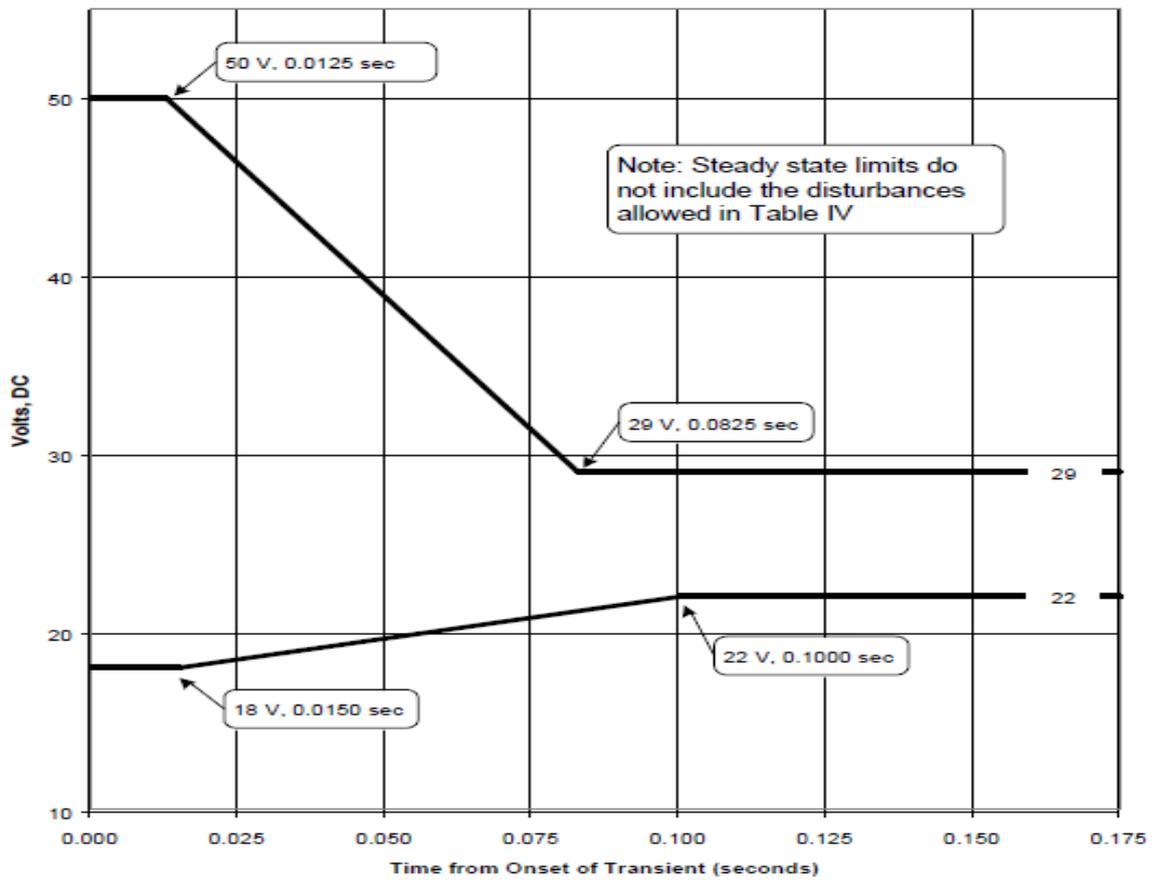


Figura 2.13 Envelope de tensão para operação normal de sistema 28 V.

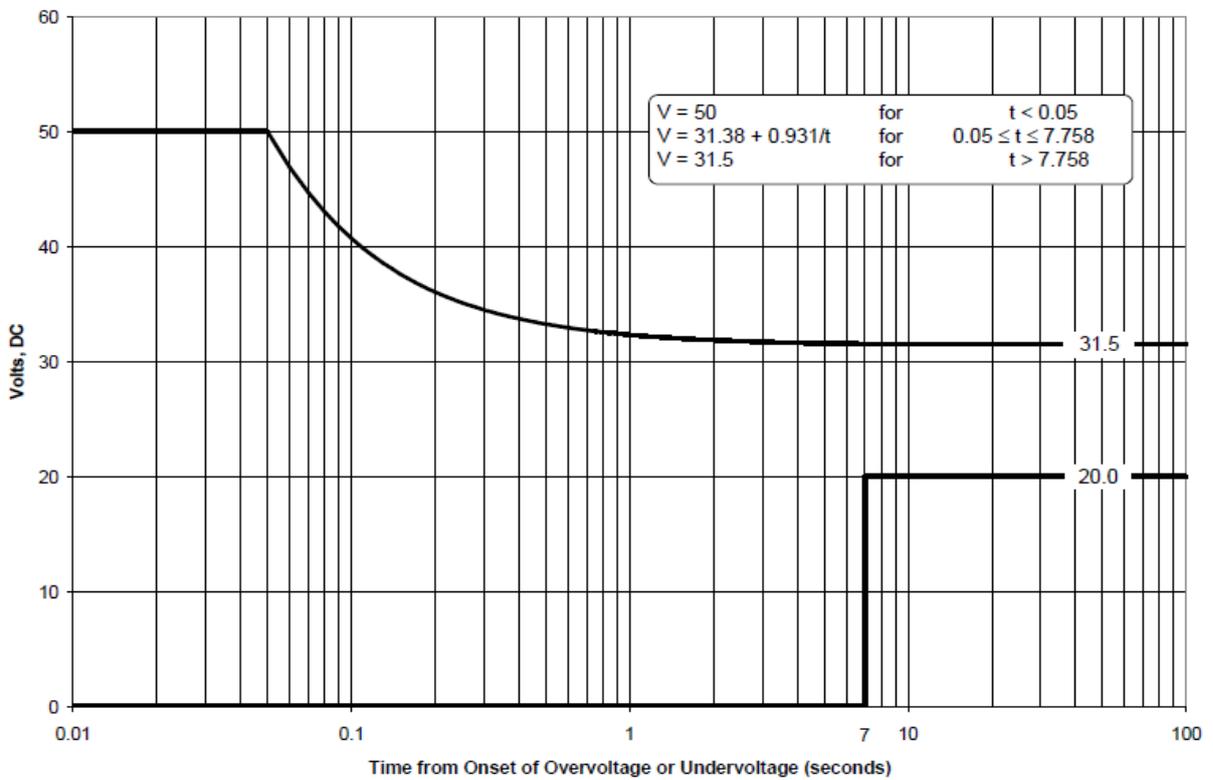


Figura 2.14 Limites de sub e sobre-tensão para sistema 28 V

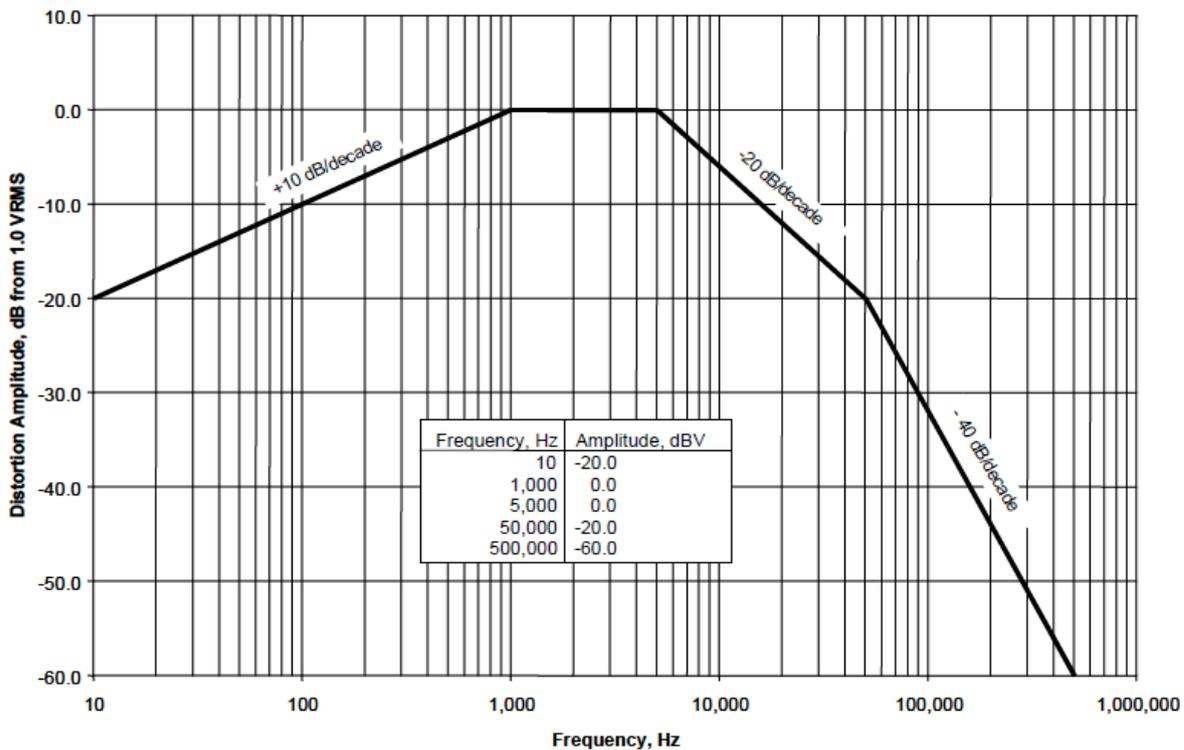


Figura 2.15 Limites de distorção para sistema 28 V.

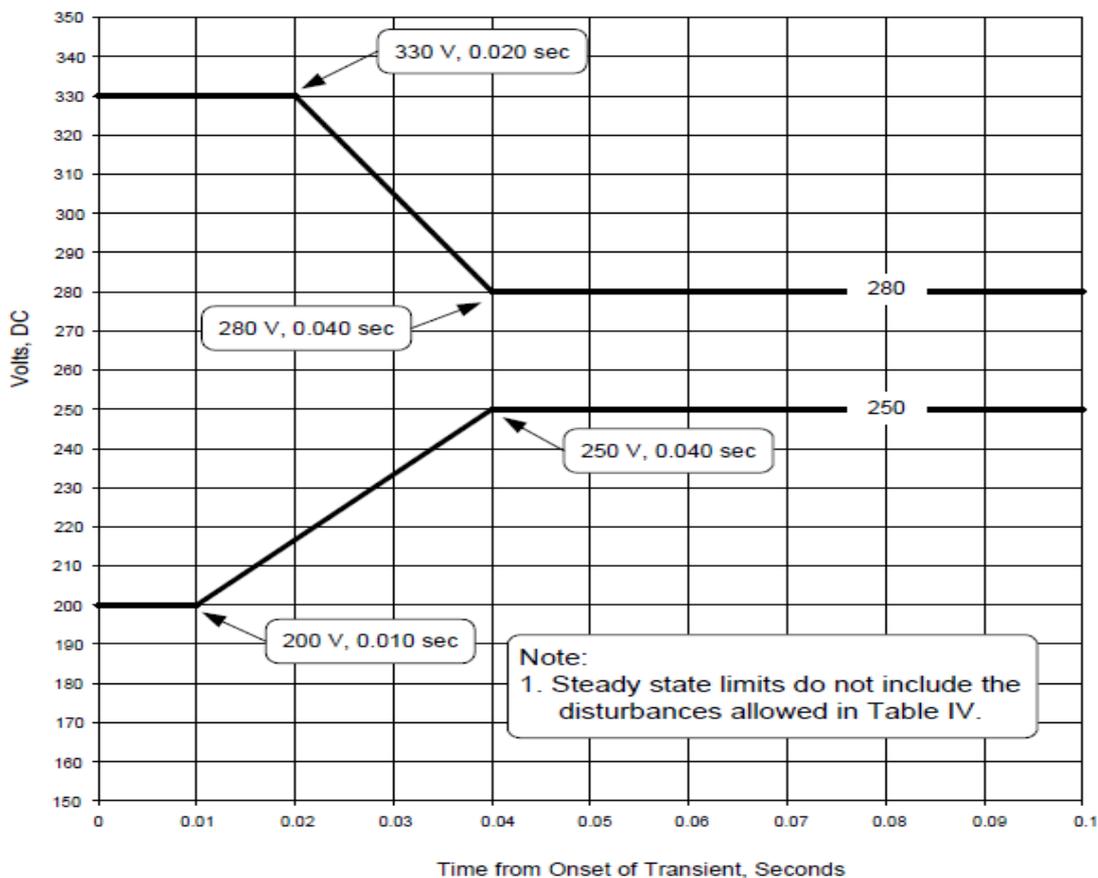


Figura 2.16 Envelope de tensão para operação normal de sistema 270 V.

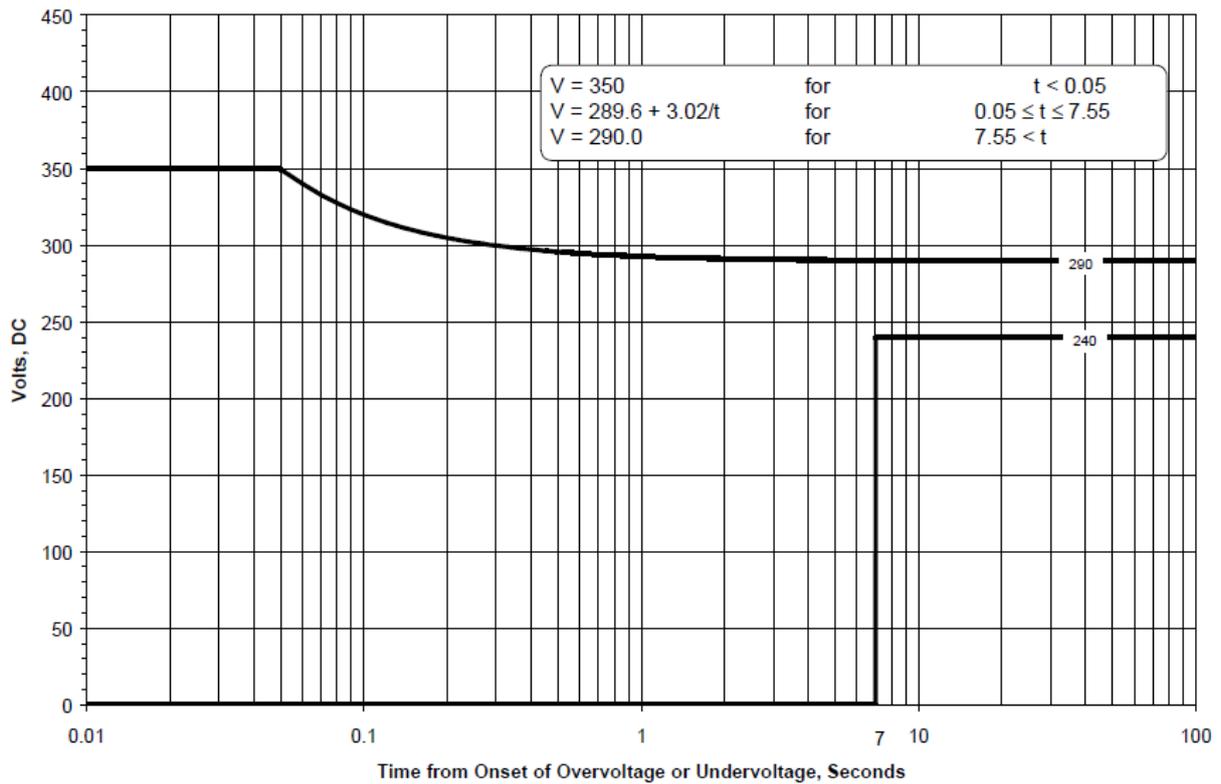


Figura 2.17 Limites de sub e sobre-tensão para sistema 270 V

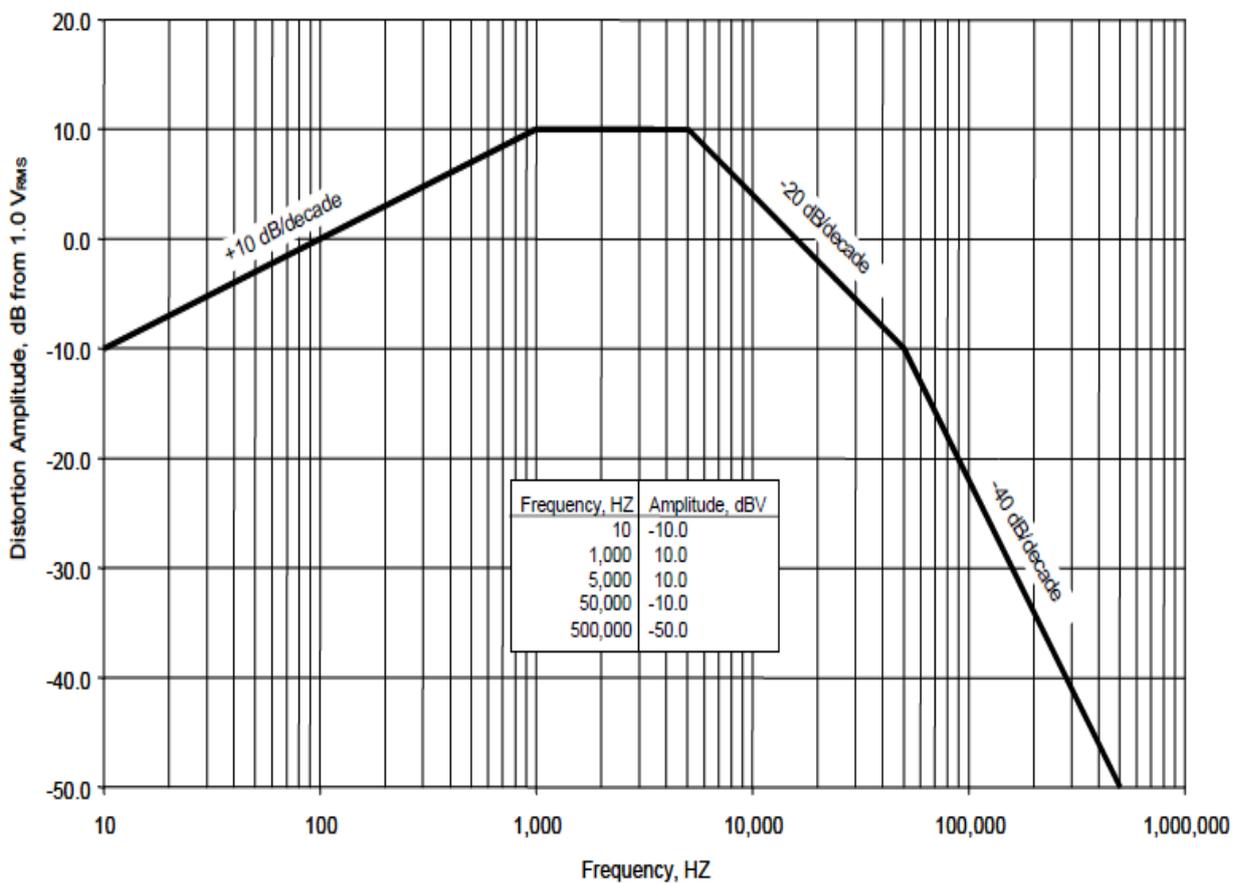


Figura 2.18 Limites de distorção para sistema 270 V.

- h) Nas **condições de emergência em sistemas de 28 V** a tensão deve estar entre 16 e 29 V. Em condição de partida a tensão deve permanecer entre 12 e 29 V. A partida de um unidade auxiliar de energia, que não sejam baterias, é uma situação caracterizada como normal e não se inclui nessa restrição.
- i) Nas **condições de emergência em sistemas de 270 V**, todas as características definidas na operação normal para o sistema CC devem ser mantidas.
- j) **Aterramento**: o chassi dos equipamentos não podem ser usados como condutor de retorno para a corrente. Todos os terminais de energização, incluindo o neutro (CA) e o terminal negativo devem ser eletricamente isolados do aterramento da cápsula.
- k) O fator de potência de equipamentos alimentados em CA com potência superior a 500 VA deve estar entre 1 e 0,85 (atrasado - indutivo), quando operar com 50% ou mais de sua corrente nominal de regime permanente. Os equipamentos não podem ter fator de potência adiantado (capacitivo) quando operando acima de 100 VA.
- l) Equipamentos trifásicos não podem ser danificados caso ocorra uma reversão na sequência de fase. Equipamentos monofásicos não podem ser danificados pela inversão dos condutores fase e neutro. Equipamentos com alimentação CC não podem ser danificados por conta de uma troca das alimentações positiva e negativa. A implementação de um impedimento físico para evitar tais trocas é considerada satisfatória para a conformidade.
- m) Equipamentos com múltiplas conexões para mais de um sistema de alimentação devem ter todas as entradas isoladas entre si. Entradas CC devem ser isoladas com diodos de bloqueio caso venham a ser conectadas em paralelo.

## 2.5. Recomendações RTCA DO-160F

Essa recomendação estabelece uma categorização dos equipamentos em termos do tipo de alimentação e dos testes de conformidade necessários.

As condições de teste excedem os limites da norma, de modo a se garantir a conformidade dos equipamentos testados à norma. A expectativa é que qualquer aparelho que tenha sido aprovado nesses testes não venha a ter problemas de operação na aeronave.

Entretanto, podem ocorrer outros fenômenos não previstos pelas normas e recomendações. Um exemplo são os problemas de instabilidade sistêmica, discutidos no módulo anterior, em que as características dinâmicas dos alimentadores, das cargas e suas funções de controle interagem e podem resultar em perturbações importantes na rede e, em consequência, nas cargas.

Quando necessário, a recomendação também indica características mínimas dos aparelhos de medida e condições de operação da carga e do alimentador para a realização dos testes. Dado que há uma quantidade muito grande de testes e procedimentos, estes não serão abordados na totalidade. Serão dados apenas alguns exemplos.

### 2.5.1. Categorias A(CF), A(NF) , A(WF) e A

Equipamentos a serem usados em aeronaves em que o sistema primário de energia provém de um gerador CA (freq. fixa ou variável) e no qual o sistema CC é obtido por uma unidade transformadora-retificadora são identificados como:

- Equipamentos com alimentação CC: Categoria A (28 V, com bateria no barramento CC)
- Equipamentos com alimentação CA: Categorias A(CF), A(NF) ou A(WF)

Equipamentos A(CF) são para uso em sistemas de frequência fixa (400 Hz). A(NF) identifica equipamentos para uso em sistema de frequência variável entre 360 e 650 Hz. A categoria A(WD) é para sistemas entre 360 e 800 Hz.

### 2.5.2. Categorias B, D e Z

Na categoria B estão equipamentos para alimentação em 14 ou 28V, com fonte de energia a partir de gerador CC ou alternador/retificador, contando com bateria de significativa capacidade no barramento.

Na categoria D estão equipamentos alimentados em 270 V em que o sistema primário de energia provém de um gerador CA (freq. fixa ou variável).

A categoria Z inclui equipamentos para 28 V e pode ser usado no lugar das categorias A ou B sob certas condições, como a ausência ou baixa capacidade da bateria no barramento CC.

### 2.5.3. Testes de distorção da corrente absorvida

Aplica-se aos equipamentos com alimentação CA com potência individual acima de 35 VA, ou ainda a um conjunto de cargas iguais que totalizem pelo menos 150 VA.

Quando alimentado por uma tensão cuja THD seja menor que 1,25%, o EUT (*Equipment Under Test*) não deve absorver correntes harmônicas que sejam 1,25% acima daqueles limites especificados nas tabelas 2.5 e 2.6, para cada 1% de distorção nas correspondentes harmônicas de tensão.

Tabela 2.5 Limites de componentes harmônicas de corrente para equipamento monofásico

Harmonic Order	Limits
Odd Non Triplen Harmonics (h = 5, 7, 11, 13, ..., 37)	$I_h = 0.3 I_1 / h$
Odd Triplen Harmonics (h = 3, 9, 15, 21, ..., 39)	$I_h = 0.15 I_1 / h$
Even Harmonics 2 and 4	$I_h = 0.01 I_1 / h$
Even Harmonics > 4 (h = 6, 8, 10, ..., 40)	$I_h = 0.0025 I_1$

Tabela 2.6 Limites de componentes harmônicas de corrente para equipamento trifásico

Harmonic Order	Limits
3 <sup>rd</sup> , 5 <sup>th</sup> , 7 <sup>th</sup>	$I_3 = I_5 = I_7 = 0.02 I_1$
Odd Triplen Harmonics (h = 9, 15, 21, ..., 39)	$I_h = 0.1 I_1 / h$
11 <sup>th</sup>	$I_{11} = 0.1 I_1$
13 <sup>th</sup>	$I_{13} = 0.08 I_1$
Odd Non Triplen Harmonics 17, 19	$I_{17} = I_{19} = 0.04 I_1$
Odd Non Triplen Harmonics 23, 25	$I_{23} = I_{25} = 0.03 I_1$
Odd Non Triplen Harmonics 29, 31, 35, 37	$I_h = 0.3 I_1 / h$
Even Harmonics 2 and 4	$I_h = 0.01 I_1 / h$
Even Harmonics > 4 (h = 6, 8, 10, ..., 40)	$I_h = 0.0025 I_1$

- $I_1$  é a máxima componente fundamental medida em regime permanente, com demanda máxima de potência pelo EUT, para uma única frequência de teste. Este valor deve ser usado para o cálculo dos valores percentuais das harmônicas em todas as demais condições de teste.
- $I_h$  é a máxima componente harmônica obtida no conjunto de modos de operação.

O equipamento deve ser testado em duas condições de distorção na tensão. Em ambos os casos a tensão de alimentação será de 115V e as frequências de ensaio serão:

- A(CF): 400 Hz +/-1%.
- A(NF): 360, 400, 500, 600 and 650 +/- 1 Hz
- A(WF): 360, 400, 500, 600, 650, 700 and 800 +/- 1 Hz.

### Condição de Teste 1:

A tensão na entrada do EUT deve ter distorção menor que 1,25% durante todo procedimento. Se a potência do equipamento for superior a 2 kVA, pode ser que a impedância de saída da fonte não seja baixa o suficiente para garantir essa baixa distorção na tensão. Nesse caso, é aceitável uma distorção de até 4%.

### Condição de Teste 2:

A THD da tensão na entrada do EUT deve ser maior ou igual a 8% para equipamentos A(CF) e A(NF) e 10 % para a categoria A(WF).

Devem ser tabulados os valores até a 40ª harmônica, para cada fase da alimentação. A resolução espectral deve ser melhor que 20 Hz. O cálculo da fase das harmônicas é opcional.

Os testes devem ser realizados para máxima e mínima potência em regime permanente. Se a diferença entre estes valores for menos que 25%, toma-se apenas a situação de máxima potência. O sensor de corrente deve ter um erro de amplitude menor que 3% e erro de fase menor que 5°, na faixa até 50 kHz.

Componentes espectrais menores que 10 mA ou que 0,25% da fundamental (o que for maior) devem ser desconsideradas. Mais detalhes serão apresentados e discutidos no capítulo específico sobre distorções.

### 2.5.4. Testes de interrupção momentânea na alimentação CA

A manobra de transferência de alimentação entre fontes distintas pode resultar em interrupção no fornecimento por até 200 ms.

Quando o **EUT possui circuitos digitais** e/ou memórias, em princípio, são mais sensíveis à perda de alimentação. A variação da tensão pode se dar entre o valor nominal e zero, e a duração da interrupção pode ser de até 200 ms. O procedimento de teste seleciona um conjunto discreto de pares (V,T), considerados eficientes para qualificar o comportamento do EUT.

Inicialmente deve-se aplicar a tensão nominal ao equipamento. Equipamentos categoria A(CF) são verificados em 400Hz. Para A(NF) e A(WF) testa-se em 360Hz e 650Hz. Para A(WF) testa-se ainda em 800Hz, sempre com precisão de ajuste de +5Hz/-0Hz.

Cada experimento deve ser repetido duas vezes. Os testes devem ser realizados para máxima e mínima potência em regime permanente. Se a diferença entre estes valores for menos que 25%, toma-se apenas a situação de máxima potência.

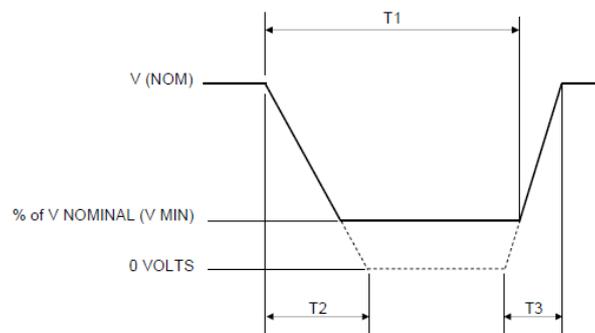


Figura 2.19 Condição de teste para EUT com circuitos digitais

Tabela 2.7 Especificações de teste

Test Condition No.	1	2*	3	4	5	6	7	8*	9*	10	11	12	13	14*	15*	16*	17
T1 (Milliseconds)	2	10	25	50	75	100	200	10	25	50	75	100	200	30	35	40	25
T2 (Milliseconds)	<1	20*	20	20	20	20	20	50*	50*	50	50	50	50	50*	50*	20*	5
T3 (Milliseconds)	<1	5	5	5	5	5	5	20	20	20	20	20	20	20	5	20	5
% of Vnominal (V min)	0	50	15	10	5	0	0	80	50	0	15	5	0	65	60	35	0

\* Voltage will not reach zero in this test condition.

Todos os equipamentos alimentados em CA são submetidos a pelo menos cinco testes consecutivos, com tensão e frequência nominais aplicados e interrupções de 50 ms e de 200 ms.

As categorias A(NF) e A(WF) são testadas, pelo menos duas vezes nas condições da figura 2.20 e Tabela 2.8.

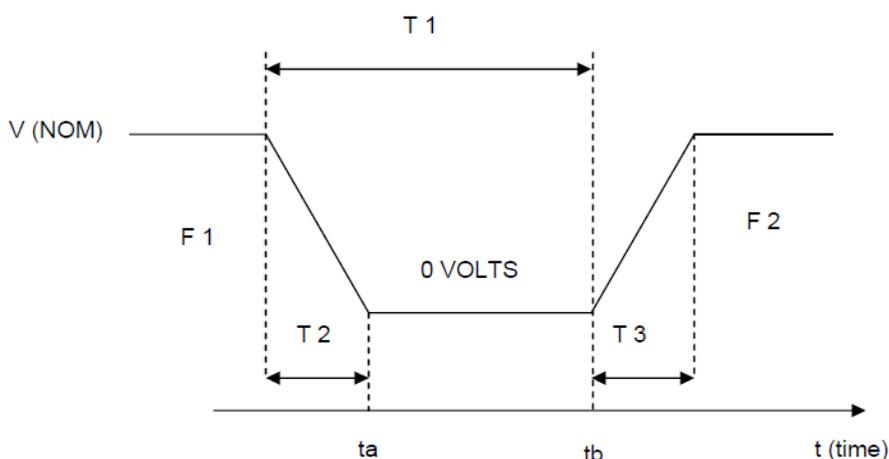


Figura 2.20 Condição de teste para EUT A(NF) e A(WF)

Tabela 2.8 Especificações de teste

- T1 = power interrupt time
- T2 = 20 ms and T3 = 5 ms
- Tolerance to T1, T2, T3 = ± 10 %
- F1 = frequency of equipment voltage supply when  $t \leq t_a$
- F2 = frequency of equipment voltage supply when  $t \geq t_b$

Test condition number	I	II	III	IV	V	VI
T1 (ms)	50	50	100	100	200	200
F1 (Hz)	360	F <sub>MAX</sub>	360	F <sub>MAX</sub>	360	F <sub>MAX</sub>
F2 (Hz)	F <sub>MAX</sub>	360	F <sub>MAX</sub>	360	F <sub>MAX</sub>	360

With F<sub>MAX</sub> = 650 Hz for A(NF) category equipment  
 F<sub>MAX</sub> = 800 Hz for A(WF) category equipment

## 2.6. Caracterização e causas de distúrbios

Os distúrbios aos quais um sistema elétrico está exposto podem ser caracterizados de diversas maneiras: em função da duração do evento (curta, média ou longa duração), da faixa de frequências envolvidas (baixa, média ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa, erro de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou de acordo com a intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande impacto). Para se fazer qualquer dessas classificações é preciso conhecer melhor as características de cada tipo de distúrbio, como será visto a seguir:

### Afundamento de tensão (*voltage sag*)

é uma redução do valor rms da tensão durante um certo intervalo de tempo. No sistema elétrico comercial, tal intervalo é de meio ciclo até um minuto. No ambiente aeronáutico não há uma definição equivalente e limites especificados serão tratados em capítulos seguintes.

São diversas as causas, sendo as mais comuns falhas em equipamentos (de isolamento), descargas atmosféricas, quedas de árvores, contatos feitos por animais, entrada de carga de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local, etc. Em geral, seu efeito desaparece depois que a causa direta é removida. O impacto é diferente a depender de onde ocorre a falta, se na rede de distribuição ou na de transmissão, se a rede é radial ou em anel,

As figuras a seguir mostram o efeito da partida de um motor de indução trifásico sobre a tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) em uma rede que alimenta outras cargas. A corrente de partida direta (sem procedimentos de partida suave – *soft-start*) de um motor de indução é muito elevada e permanece assim até que seja atingida a velocidade de operação.

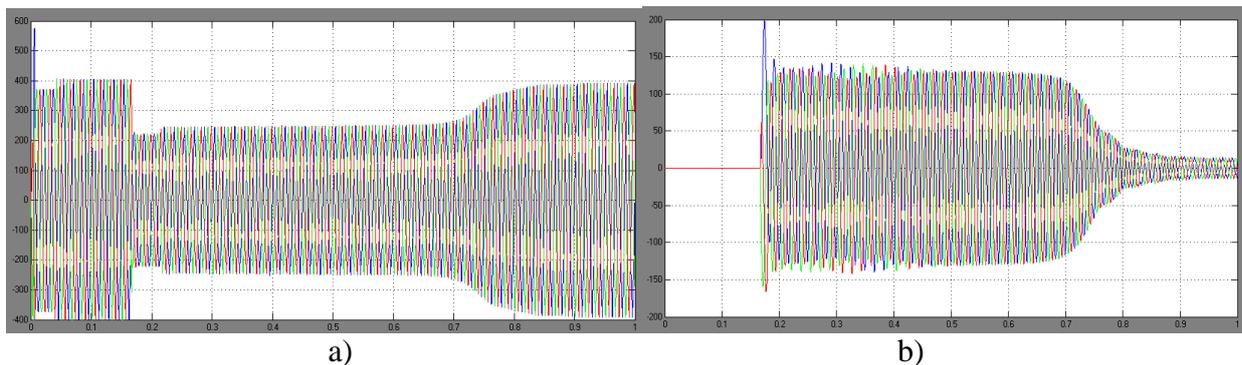


Figura 2.21 Afundamento da tensão (a) devido à corrente de partida de motor de indução no alimentador (b).

### Elevação de tensão (*voltage swell*)

é um aumento do valor rms da tensão. No sistema elétrico comercial, tal intervalo é de meio ciclo até um minuto. No ambiente aeronáutico não há uma definição equivalente e limites especificados serão tratados em capítulos seguintes. Trata-se do efeito contrário ao do afundamento, sendo as principais causas as saídas temporárias de cargas, problemas em reguladores de tensão, conexão de banco de capacitores, faltas no condutor neutro.

### Sobre-tensão

é o aumento do valor rms da tensão de longa duração. Esse seria o prolongamento da elevação de tensão. Em geral os equipamentos apresentam menor tolerância à sobre-tensões do que à subtensões, devido a problemas de rompimento do dielétrico;

### Subtensão

é a redução do valor rms da tensão de longa duração. Corresponde ao prolongamento do afundamento de tensão. Pode causar problemas para motores de indução que perdem torque e podem ficar sobrecarregados;

A figura a seguir indica uma simulação de perda de condutor de retorno em rede de distribuição com cargas desbalanceadas. A figura mostra o valor eficaz da tensão no PAC. Após um transitório inicial devido ao cálculo de tal componente, este sinal estabiliza. Com a interrupção do condutor de retorno, são as cargas que determinam a partição das tensões de linha (que não sofrem alteração), produzindo uma fase com sobretensão e outra com subtensão, neste exemplo.

A caracterização deste efeito como um afundamento, elevação, ou como sub ou sobretensão depende do intervalo em que este acontecimento se mantém.

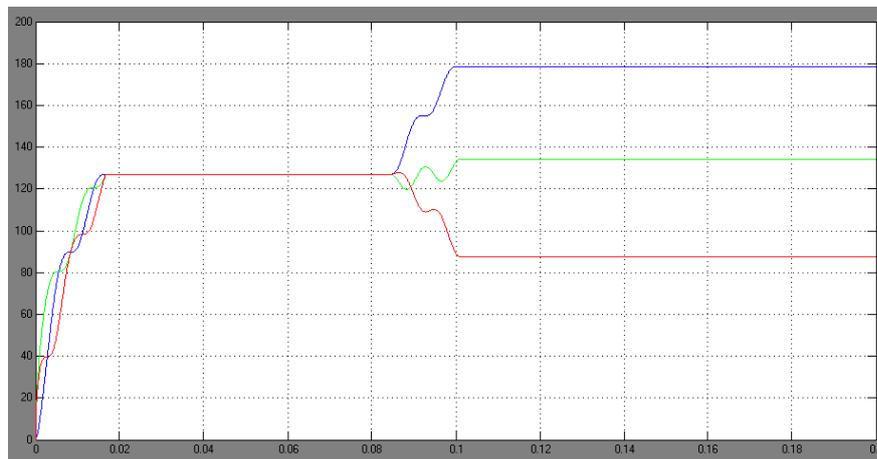


Figura 2.22 Valor eficaz da tensão no PAC com elevação de tensão.

### Colapso de tensão

é um afundamento gradual e auto-sustentado da tensão abaixo de níveis toleráveis pelas cargas. Ocorre, em geral, associado à falta de suporte reativo (redes CA), à insuficiência de capacidade de controle ou falta de coordenação das ações de controle, por exemplo, entre dispositivos e sistemas reguladores de tensão. A dinâmica típica do colapso é não oscilatória, com a tensão caindo gradualmente e provocando desligamentos em cascata.

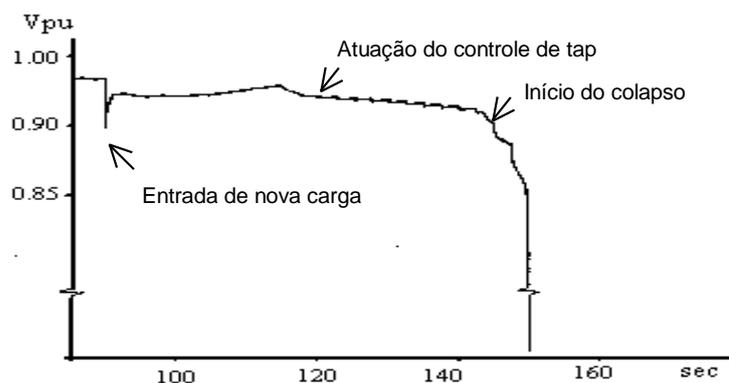


Figura 2.23 Evolução de valor eficaz da tensão em um evento de colapso.

### Desequilíbrios de tensões

são variações desiguais em amplitude e/ou fase das tensões trifásicas. São causadas pela conexão desigual de cargas mono- ou bifásicas em sistemas trifásicos. Cargas trifásicas desbalanceadas de grande porte também podem produzir desequilíbrio. O efeito se manifesta no PAC, estando associado à queda de tensão sobre a impedância equivalente do alimentador.

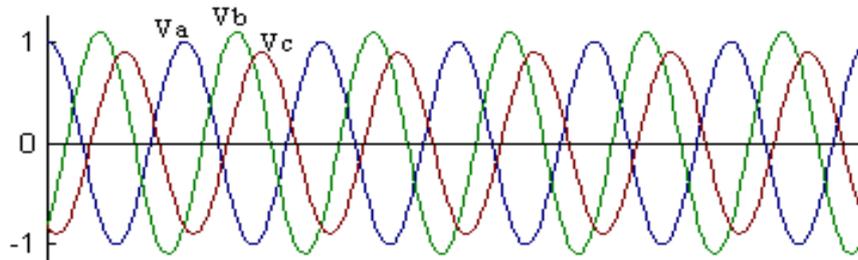


Figura 2.24 Tensões desequilibradas em magnitude e fase.

Em redes CC de 540 V ( $\pm 270$  V) também é possível que se manifeste o mesmo problema, associado a um desequilíbrio na distribuição de cargas entre os terminais positivo e negativo (em relação ao retorno).

### Interrupção momentânea

No sistema elétrico comercial, é uma interrupção de meio ciclo até 3 segundos de duração. No caso de interrupções causadas pela ação correta da proteção da rede, é esperado que ao final do defeito o sistema possa retornar à condição de operação normal. Nestes casos é desejável dispor de fontes especiais do tipo UPS ("*Uninterruptible Power Supply*") para suprir energia aos sistemas de processamento de dados para suportar uma interrupção tão prolongada.

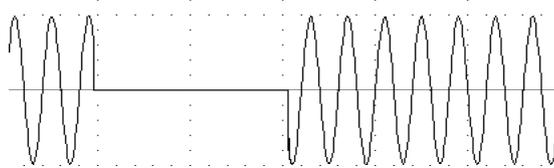


Figura 2.25 Interrupção momentânea de tensão

### Interrupção temporária

No sistema elétrico comercial, é uma interrupção com duração entre 3 segundos e 1 minuto. Neste caso já se requer uma fonte ininterrupta que utiliza bateria como fonte alternativa, para a qual a carga é transferida automaticamente em caso de falta da alimentação principal. Esse tipo de evento em geral é causado pelo sistema de proteção com religamento automático após a eliminação de curto circuito na rede.

Considerando os limites definidos na norma MIL-SRD-740F, pode-se considerar que é admissível uma interrupção momentânea e/ou temporária até 7 s. Ver, por exemplo, a figura 2.9.

### Interrupção permanente ("outage")

NO caso da rede elétrica comercial, é uma interrupção com duração maior que 1 minuto. Este é o caso de desligamento de uma linha sem previsão de retorno imediato. Pode ocorrer de forma imprevista, no caso de defeito, ou de forma programada, para fins de manutenção ou transferência de carga. Existem critérios de qualidade de serviço, que medem a duração ou a frequência anual das interrupções por consumidor.



Figura 2.26 Interrupção permanente.

### Micro-interrupção

é a perda completa da alimentação de até meio ciclo da frequência da rede. Esse tipo de defeito em geral é devido a um curto-circuito em sistemas de distribuição com extinção rápida. Fontes de alimentação CC com capacitores dimensionados adequadamente podem suportar esse tipo de distúrbio sem afetar o dispositivo alimentado. Se o defeito for persistente, a proteção poderá tentar uma ou mais religações, impondo tensões temporárias baixas que, por sua vez, podem danificar equipamentos, principalmente motores que não conseguem partir.

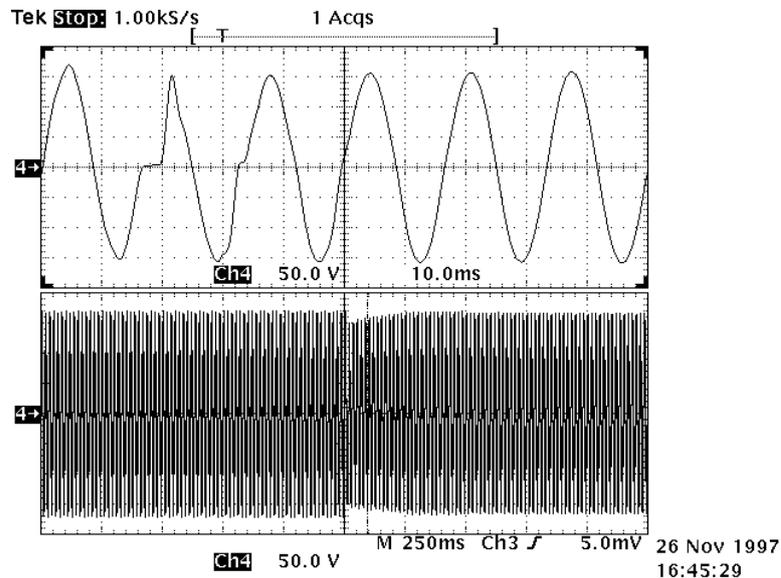


Figura 2.27 Micro interrupção.

### Distorção harmônica

é a combinação da tensão (ou corrente) fundamental com componentes de frequência múltipla inteira. Normalmente é causada por dispositivos não-lineares de conversão de energia, como retificadores, compensadores controlados a tiristores; ciclo-conversores, etc. A figura a seguir mostra a corrente (traço superior) em um retificador monofásico a diodos com filtro capacitivo. Esta forte distorção na corrente leva a uma distorção na tensão no PAC (traço intermediário), devido à queda de tensão na impedância equivalente do alimentador. O traço inferior é a potência instantânea da carga.

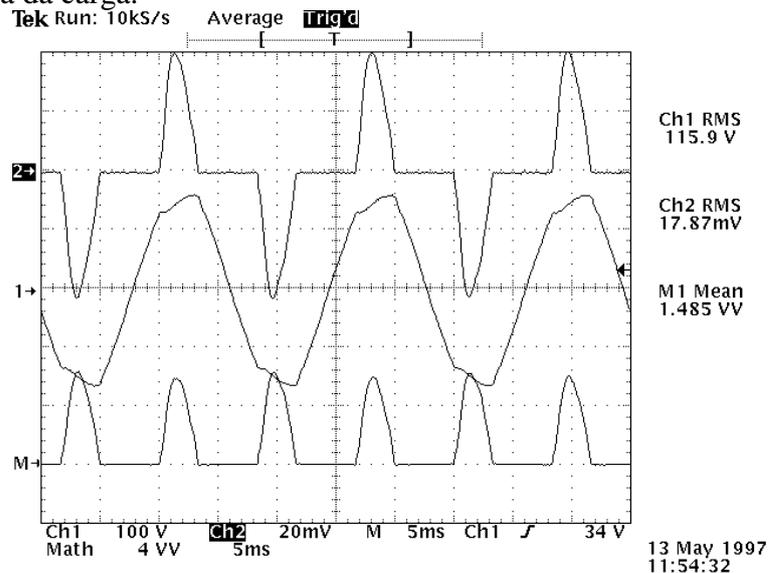


Figura 2.28 Distorção harmônica.

**Distorção inter-harmônica**

combinação da tensão (ou corrente) fundamental com componentes não múltiplas inteiras. São produzidas em geral por cargas não-lineares, com espectro contínuo.

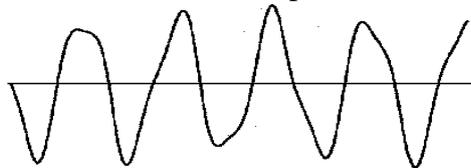


Figura 2.29 Distorção devido a interharmônicas.

**Recortes de Comutações ("notches")**

são transições sucessivas e bruscas de tensão ou corrente entre diferentes níveis. Normalmente associadas com curto-circuito momentâneo da fonte, devido à comutação de chaves eletrônicas de potência, por exemplo conversores trifásicos. São fontes de ruídos e interferências indesejáveis e de difícil tratamento;

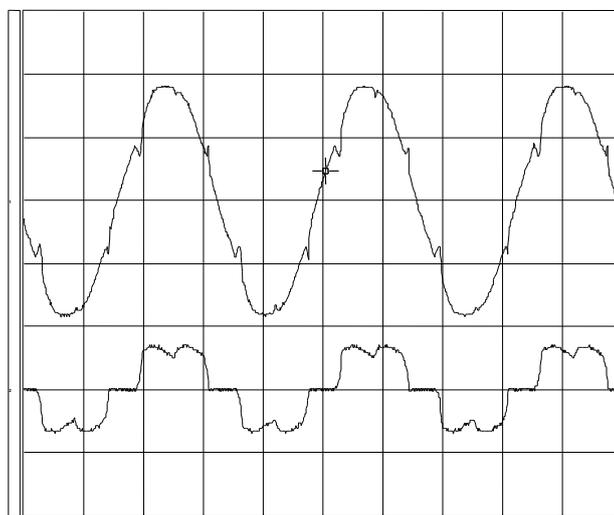


Figura 2.30 Recortes de comutações.

**Oscilações transitórias**

são oscilações rápidas devidas a manobras de disjuntores. Em geral são causadas por chaveamento de capacitores na rede. Devido aos elevados valores de  $di/dt$  provocados pela brusca energização do capacitor, são excitadas ressonâncias em alta frequência, que se convertem em oscilações rápidas da tensão no ponto de conexão do capacitor. Essas oscilações podem provocar a atuação da proteção ou produzir sobre-tensões em outros equipamentos próximos.

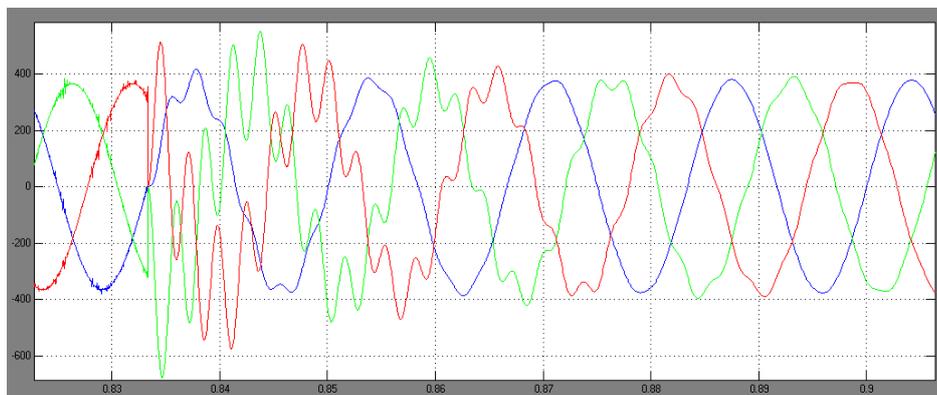


Figura 2.31 Chaveamento de capacitor.

### Flutuações de tensão

são mudanças sustentadas da amplitude da tensão fundamental. Em geral são provocadas por variações de cargas como fornos a arco, elevadores, bombas e compressores. As flutuações de tensão podem ocasionar oscilações de potência nas linhas de transmissão, levando os geradores a oscilar entre si (oscilações eletromecânicas) ou com a turbina (ressonância sub-síncrona). Podem também ser decorrentes de ajuste inadequado ou descoordenado dos reguladores de tensão, que realimentam pequenas variações positivamente, devido à taxa de amortecimento negativa das malhas de controle;

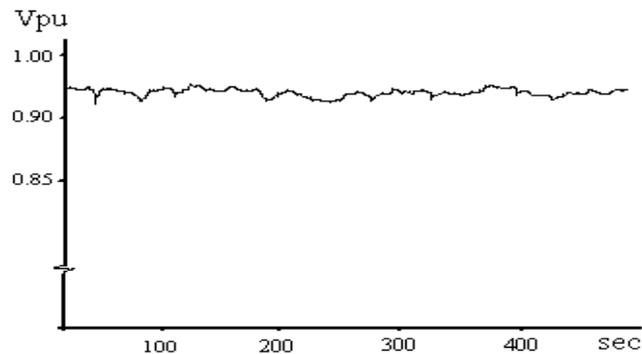


Figura 2.32 Flutuação de tensão

### Cintilação luminosa (efeito *flicker*)

é efeito da variação de emissão luminosa percebida visualmente, em decorrência de flutuações da magnitude da tensão. O fenômeno está associado à operação de cargas variáveis. A percepção visual do fenômeno ocorre na faixa de modulação da tensão entre 0 e 30 Hz, sendo máxima em torno de 8,8 Hz. Vários fatores afetam o nível do incômodo provocado, tais como a forma da modulação (quadrada ou senoidal), o tipo de iluminação (incandescente ou fluorescente), a inércia térmica das lâmpadas, etc. Seus efeitos são subjetivos e acumulativos, podendo afetar o sistema nervoso central, provocando estresse e até crises epiléticas em pessoas propensas.

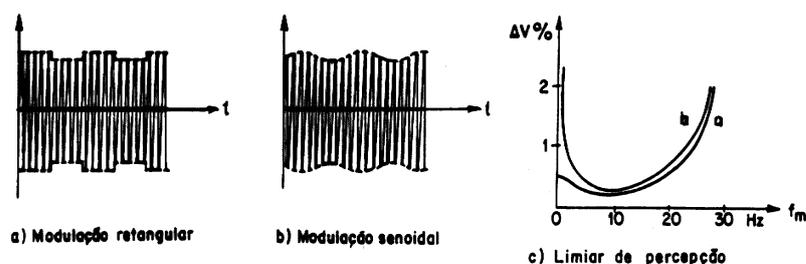


Figura 2.33 Flutuações de tensão RMS e limiar de percepção de *flicker* para variações quadradas e senoidais.

### Interferência eletromagnética

são ruídos impostos por indução ou por condução. No caso da indução, é devido ao acoplamento magnético entre circuitos previstos para operar em diferentes faixas de frequências e que se localizam fisicamente próximos. Este fenômeno é mais acentuado em altas frequências, pois o alcance dos efeitos é maior (ex. rádio-interferência). No caso de condução, em geral o efeito se manifesta por falta de um terra comum suficientemente sólido (ex. ruído no "terra" de fontes, causado pelo chaveamento da corrente, mau contato, etc.);

A figura a seguir mostra a presença de um ruído de alta frequência (aproximadamente 40 kHz, de acordo com o espectro mostrado na mesma figura). Neste caso, tal ruído é devido à presença

de reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes tubulares, os quais operam nesta frequência. A contaminação da tensão da rede se deve ao não aterramento do reator, sem o qual o filtro de entrada não atua corretamente, permitindo que componentes de alta frequência, estejam presentes, indevidamente, na tensão da rede, podendo afetar o funcionamento de outros equipamentos conectados na mesma rede.

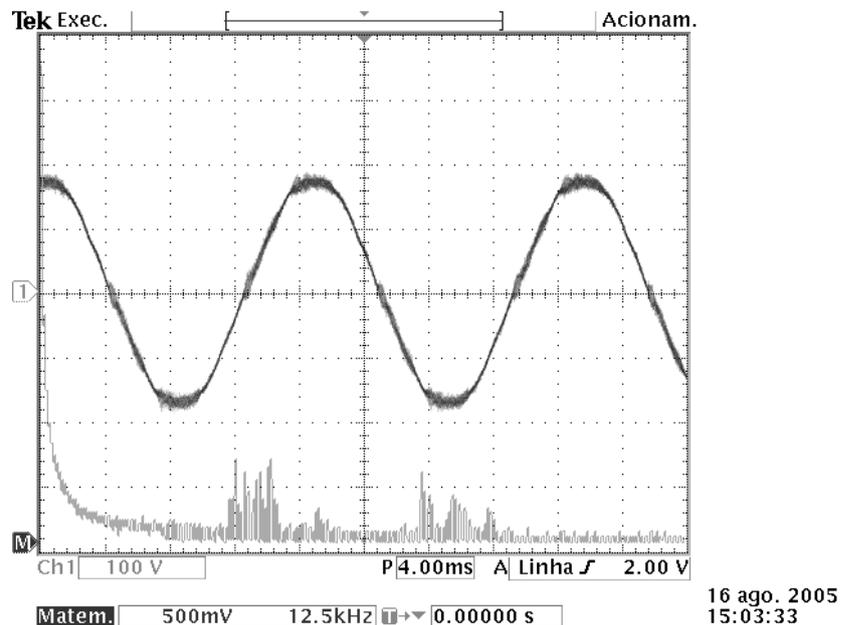


Figura 2.34 Ruído de alta frequência sobreposto à tensão da rede.

### Surto de tensão ("voltage surge")

é a elevação impulsiva de tensão. Esse tipo de distúrbio pode estar associado a descargas atmosféricas ou a chaveamento de corrente imposta em circuitos altamente indutivos, seja através da conexão de capacitor ou pela comutação de dispositivo eletrônico. O efeito mais comum é a ruptura do dielétrico no ponto fraco do isolamento do sistema e a queima de componentes eletrônicos por sobre-tensão ou excessivo  $dv/dt$ . Devido à rapidez do evento (microsegundos) não existem muitas formas de evitar os efeitos. Os dispositivos de proteção mais utilizados são os varistores, com capacidade de ceifar os picos de tensão, drenando a energia excedente para terra.

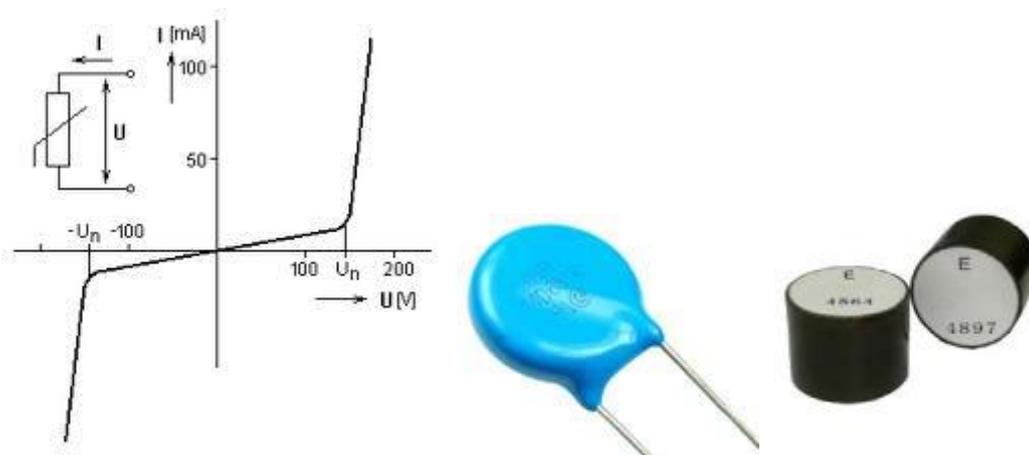


Figura 2.35 Curva característica de varistor, dispositivo para proteção de circuitos eletrônicos e para proteção de redes.

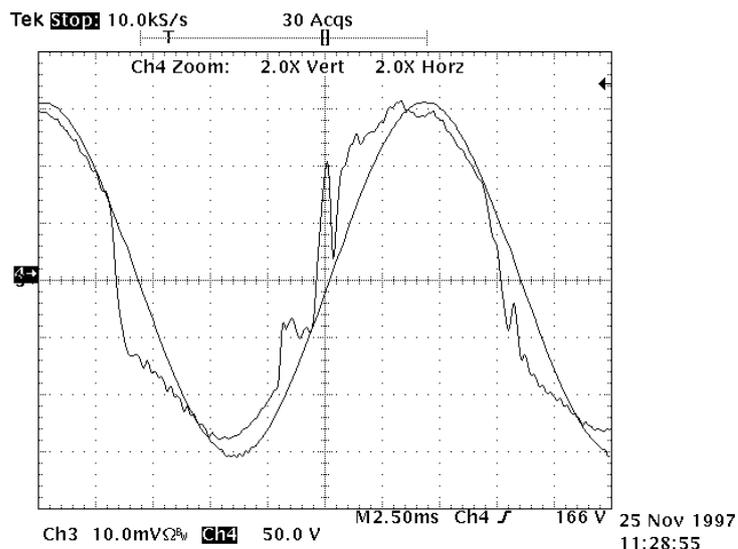


Figura 2.36 Surto de tensão.

## 2.7. Referências

<sup>i</sup> Department of Defense, Interface Standard, MIL-STD-704F, Aircraft Electric Power Characteristics, 1991.

<sup>ii</sup> RTCA DO-160F, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, Section 16 Power Input, 2007

<sup>iii</sup> J.L. Willems, “Reflections on Apparent Power and Power Factor in Nonsinusoidal and Polyphase Situations”, IEEE Transaction On Power Delivery, Abril de 2004.

<sup>iv</sup> IEEE Standard 1459-2000, IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, ISBN 0-7381-1963-6, 2000.

<sup>v</sup> P. Tenti and P. Mattavelli, “A Time-Domain Approach to Power Term Definitions under Non-sinusoidal Conditions”, *L'Energia Elettrica*, vol. 81, pp. 75-84, 2004.

<sup>vi</sup> H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, Instantaneous power theory and applications to power conditioning, IEEE Press, 2007.