

Aula 08 – Harmônicos em Sistemas Elétricos



Prof. Heverton Augusto Pereira
Prof. Mauro de Oliveira Prates

Universidade Federal de Viçosa - UFV
Departamento de Engenharia Elétrica - DEL
Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência – Gesep

heverton.pereira@ufv.br

www.gesep.ufv.br
TEL: +55 (31) 3899-3266

Interação entre Carga e Fonte

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Ao sistema supridor, ou fonte, estão relacionadas distorções na forma de onda da tensão.

A natureza da carga pode levar a distorções na forma de onda da corrente e tensão.

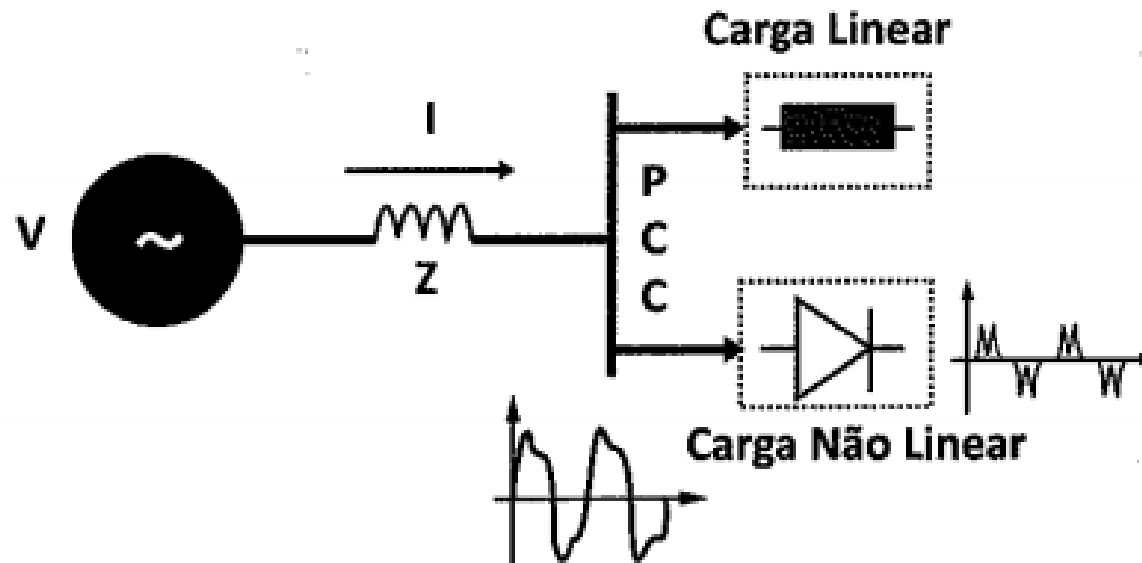
Sistema – Carga	Carga – Sistema
Afundamento/Elevação de Tensão	Correntes Harmônicas
Desequilíbrio de Tensão	Corrente Reativa
Harmônicos de Tensão, etc	Corrente desbalanceada

Interação entre Carga e Fonte

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

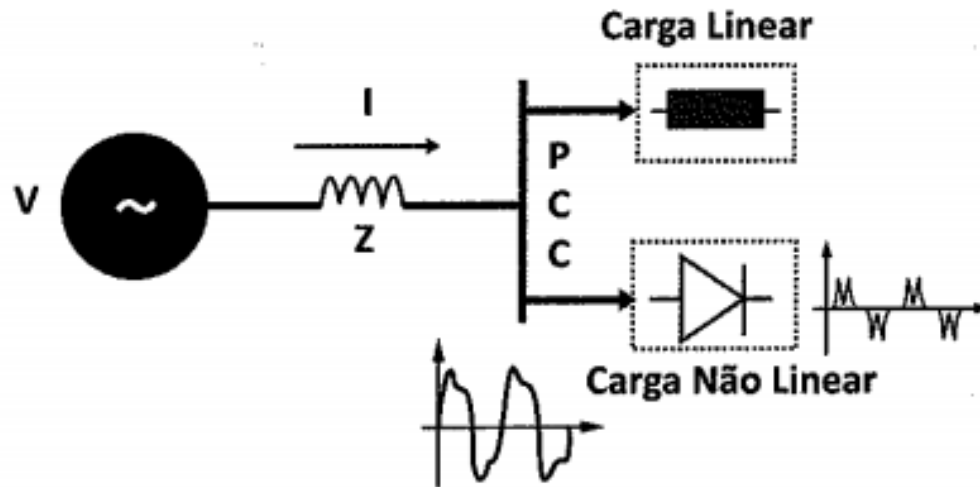
A QEE é uma via de mão dupla, visto que:

- ✓ a qualidade da tensão de suprimento tem influência no perfil da corrente que circula na instalação; e
- ✓ a natureza da carga pode influenciar o perfil de tensão.



Interação entre Carga e Fonte

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA



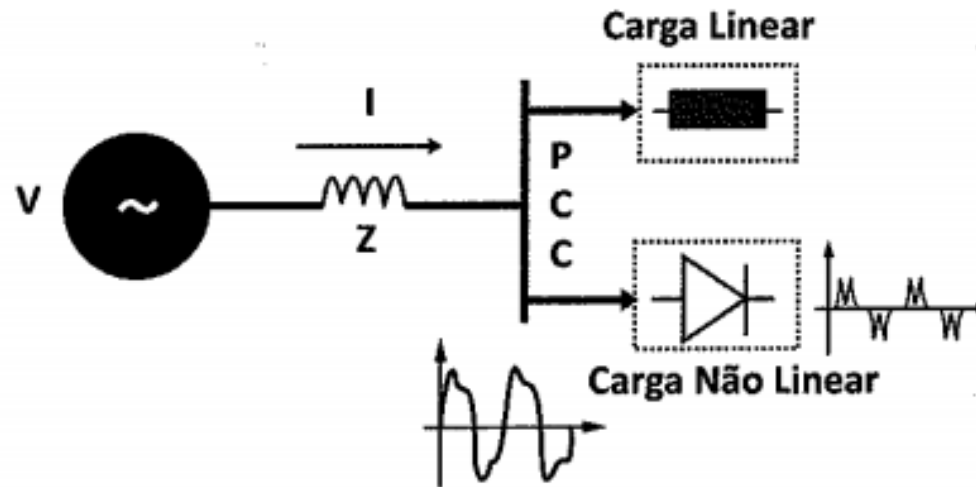
Quando energizadas por fonte não distorcida (senoidal):

- ✓ Cargas lineares produzem correntes não distorcidas;
- ✓ Cargas não lineares produzem correntes distorcidas (não senoidais). Distorcem ΔV_Z quando as correntes fluem através de Z, podendo alterar a conformidade da tensão no PCC (Ponto Comum de Conexão).

$$V_{PCC} = V - \Delta V_Z$$

Interação entre Carga e Fonte

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA



$$V_{PCC} = V - \Delta V_Z$$

O efeito direto das cargas não lineares sobre a QEE é a distorção na corrente, e o indireto, a distorção na tensão.

A distorção na tensão é propagada, assim como as correntes harmônicas que circularão por cargas lineares alimentadas por tais tensões.

Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ A palavra “harmônico” tem origem na área de acústica e de instrumentos musicais, com significado de múltiplo inteiro ou componentes de um tom, subtons e sobretons. Na engenharia, o termo “harmônico” ou “harmônica” é usado indistintamente.
- ✓ Uma onda periódica distorcida é o resultado da sobreposição de uma série de ondas senoidais, que possui uma componente fundamental (60 Hz) e um conjunto de ondas, denominadas “**harmônicas**”.

Harmônicos

- ✓ Cada múltiplo inteiro da comp. fundamental, cuja ordem é 1, define a ordem do harmônico.

Termos derivados são: inter-harmônico e sub-harmônico.

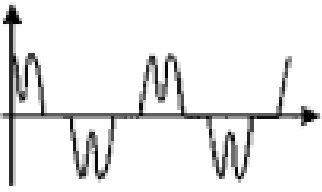
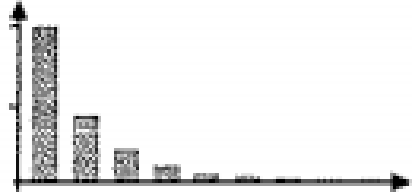
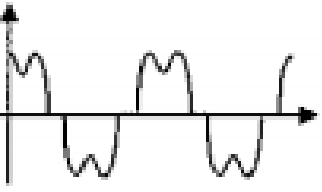
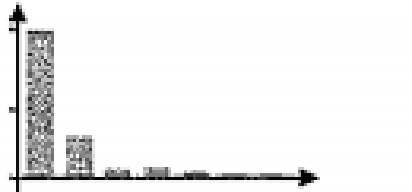
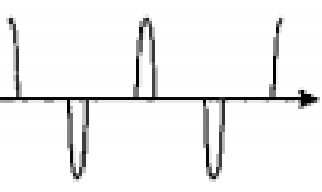
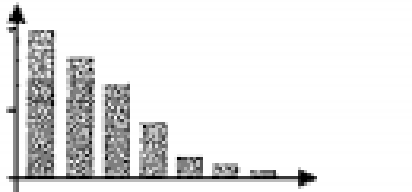
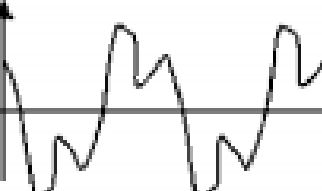
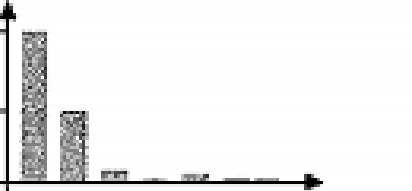
Tabela 1.5 – Componentes espectrais de formas de onda de frequência f .

Harmônica	$f = h.f$, em que h é um número inteiro maior que zero
Componente cc	$f = h.f$, em que $h = 0$
Inter-harmônica	$f = h.f$, em que h é um número não inteiro maior que zero
Sub-harmônica	$f = h.f$, em que $0 < h < 1$

Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Figura 1.5 – Exemplos de formas de onda de correntes distorcidas em cargas eletrônicas.

Cargas não lineares	Forma de onda	Espectro de frequência
Acionamento de velocidade variável		
Carregador de bateria		
Processamento de dados		
Lâmpada fluorescente		

Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Estudos de harmônicos são realizados para:

- investigar o impacto de dispositivos não lineares;
- calcular níveis de distorção harmônica;
- determinar condições de ressonância; e
- determinar requisitos de filtragem em uma instalação.

Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Estudos de fluxo de carga harmônicos calcula a comp. fundamental e as harmônicas das correntes de linha e tensões harmônicas de barra. Os valores calculados são comparados aos valores limites estabelecidos em normas.
- ✓ Quando um estudo do efeito da penetração de harmônicos é feito, é de grande importância que os componentes do sistema sejam modelados corretamente para garantir a precisão dos resultados obtidos.
- ✓ O Método para caracterização de harmônicos mais utilizado é a **Transformada de Fourier**;

Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental **(PRODIST)**.
- ✓ São caracterizados como fenômenos de estado permanente, já que são gerados enquanto o equipamento que gera os harmônicos está em operação.

Medição de Harmônicos

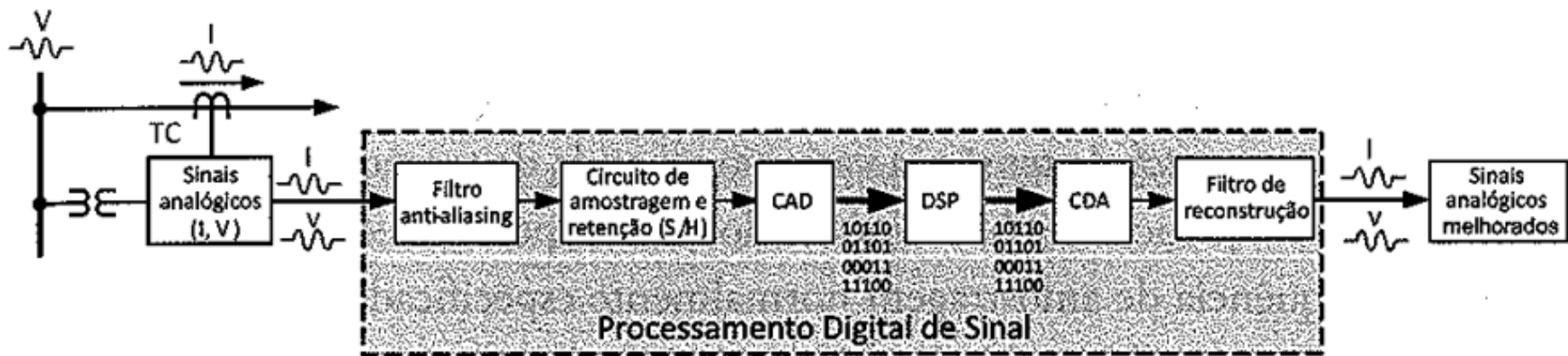
ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Para medição de características de um sinal elétrico, é recomendado uso de equipamentos que opera segundo o princípio da amostragem digital (Prodinst, Módulo 8).
- ✓ Os instrumentos de medição devem observar os protocolos de medição e às normas técnicas vigentes, que definem os requisitos necessários ao processamento do sinal amostrado.

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

O processamento de medição de grandezas elétricas é iniciado com a leitura de sinais analógicos de tensão e corrente do sistema elétrico, prosseguindo com o processamento do sinal.



Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Na medição de sinais elétricos, alguns procedimentos e métodos, denominados “**protocolo de medição**”, devem ser considerados:

- Taxa ou frequência de amostragem (f_s);
- Resolução da conversão analógica-digital;
- incerteza;
- janela de integração ou intervalo de tempo de medição;

Frequência de Amostragem (f_s)

Define o número de amostras por unidade de tempo (segundo ou ciclo) tomado de um sinal contínuo para construir um sinal discreto.

No domínio do tempo, é medida em amostras/s ou Hz.

O inverso de f_s é o período de amostragem (T_s).

Deve-se certificar que f_s seja suficientemente alta para que todas as variações do sinal possam ser reconstruídas.

Medição de Harmônicos

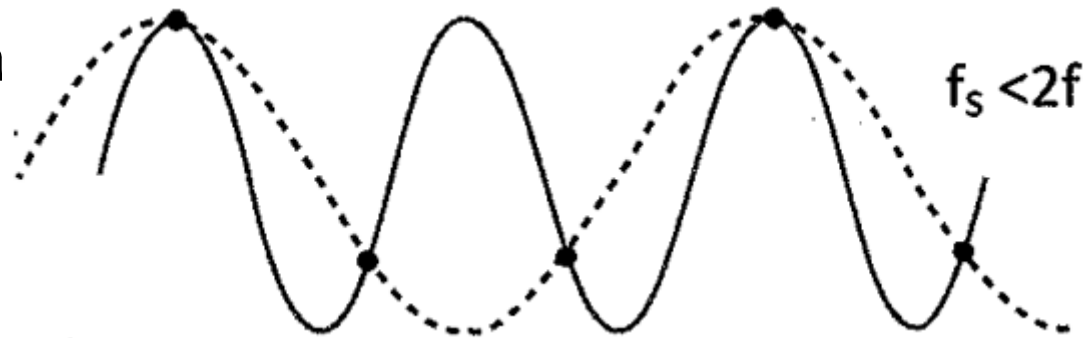
ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Frequência de Amostragem (f_s)

O Teorema de amostragem de Nyquist estabelece que a reconstrução “perfeita” de um sinal quando:

$$f_s > 2f_{\text{máx}}$$

Se este teorema não é satisfeito, então o sinal resultante terá *aliasing* (distorção

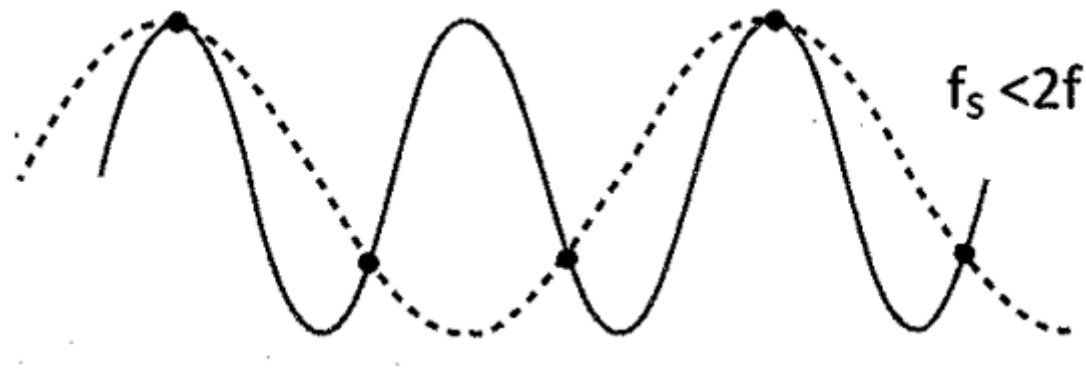


- → amostras digitais; Sinal reconstruído é o pontilhado, mas original é o outro.

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Frequência de Amostragem (f_s)



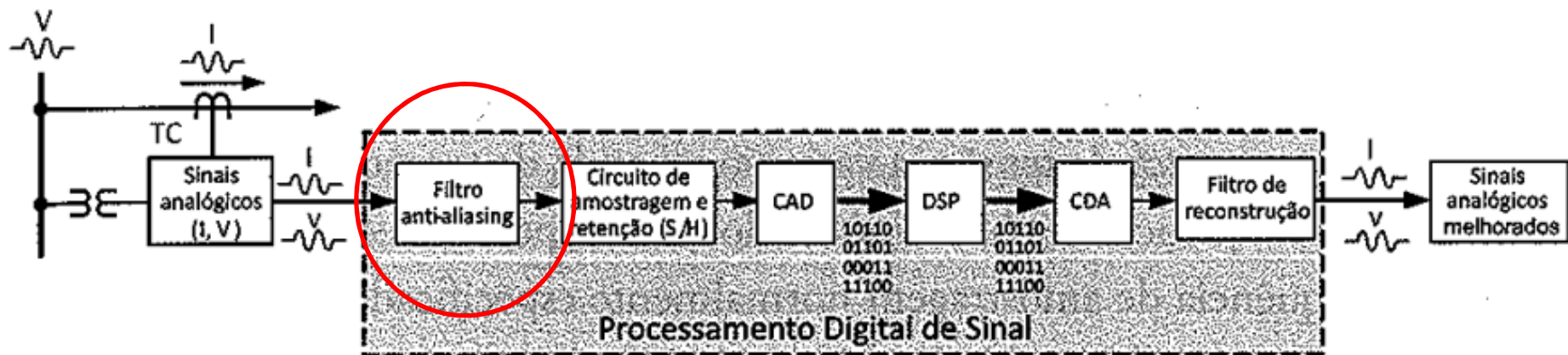
O fenômeno *aliasing* refere-se à incapacidade do sinal amostrado em baixas frequências de representar senóides contidas no sinal original com frequências acima da frequência de Nyquist.

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Frequência de Amostragem (f_s)

Para prevenir o *aliasing*, o sinal antes de amostrado deve passar por um filtro passa-baixa, cuja frequência de corte é igual à frequência de Nyquist.



Frequência de Amostragem (f_s)

Para o PRODIST (2012), os instrumentos de medição de harmônicos devem considerar, para fins de cálculo da distorção total, uma faixa de frequência que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a harmônica de 25^a ordem.

Já a IEC 61000-4-30 (2008), a medição até a harmônica 50 ou 3kHz (60Hz), para equipamentos classe A e 40^a ordem para equipamentos classe S (2,4kHz)

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Frequência de Amostragem (f_s) - Exemplo

Qual a menor taxa de amostragem para representar a frequência de 25ª ordem?

Solução:

A análise harmônica para a 25ª ordem ($25 \times 60 = 1500\text{Hz}$) requereria uma f_s de pelo menos $2 \times 1500 = 3\text{kHz}$.

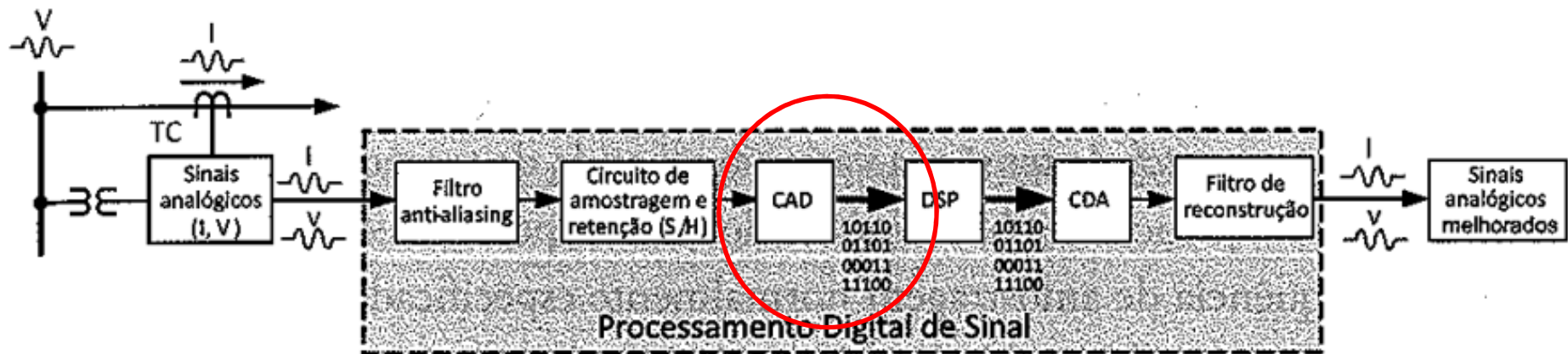
3000 amostras - 1s

x amostras - 1/60 (1 ciclo)

→ 50 amostras por ciclo (Nppc).

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA



Resolução da conversão analógico-digital (CAD)

CAD converte entrada analógica (tensão ou corrente) em um número digital binário.

A resolução é dada pelo número de bits.

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

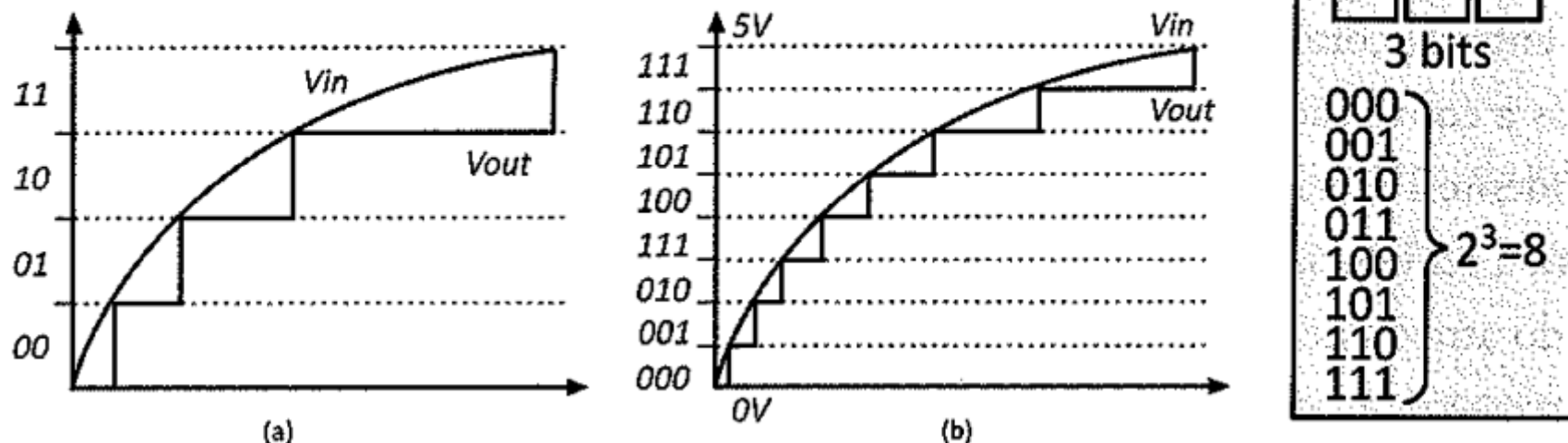
Resolução da conversão analógico-digital (CAD)

A resolução é dada pelo número de bits.

3 bits = $2^3 = 8$ níveis (n). 12 bits = 4096 níveis, etc

Maior n \rightarrow menor o intervalo e mais próxima a amostra digital estará do sinal analógico

Figura 3.5 – Conversor A/D: (a) 2 bits, quatro níveis com baixa resolução; (b) 3 bits, oito níveis com alta resolução.



Janela de Integralização

Harmônico é considerado um fenômeno de regime permanente, apesar de muitos estudos atuais envolvendo o transitório dos mesmos.

Assim, devem ser calculados a partir das amostras de **janelas fixas e consecutivas**. No ProDist, cada janela deverá compreender uma sequência **de 12 ciclos** (200ms em 60Hz) **a 15 ciclos** (250 ms em 60Hz).

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Sistema de Medição segundo a ANEEL

Para acompanhamento da tensão em regime permanente, os equipamentos de medição devem atender aos seguintes requisitos mínimos (Prodist – módulo 8):

- Taxa amostral: 16 amostras/ciclo
- Conversor A/D: 12 bits;
- Precisão: até 1% da leitura.

Sistema de Medição segundo a ANEEL

O processo de apuração dos valores indicados deve ser realizado normalmente em campanhas de medição com duração de no mínimo **7 dias completos e consecutivos**, considerando os valores integralizados em intervalos de 10 minutos.

Medição de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Sistema de Medição segundo a ANEEL

Muitas vezes, utiliza-se os níveis de percentis diário e semanal de 95% para mensurar a severidade dos fenômenos quando comparados aos valores limites estabelecidos.

Assim, tem-se 95% dos valores medidos abaixo da posição correspondente e 5% acima.