



**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos**

**PSI - EPUSP**

**PSI 3214 - LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA**

2º Semestre de 2020

**EXPERIÊNCIA 2 - Conversão Analógica Digital (A/D)**

**1. Objetivo**

Desenvolver a capacidade de compreensão e de análise de medições elétricas efetuadas por meio de instrumentos digitais conectados a um computador. Através desta aula os alunos devem:

- Assimilar os princípios envolvidos na conversão de sinal analógico para sinal digital;
- Verificar por meio de simulações algumas características relevantes de uma placa de conversão analógico-digital (A/D), incluindo degrau (passo) de quantização e amostragem de um sinal alternado, entre outras.

**2. Introdução**

Atualmente, quase que a totalidade da instrumentação elétrica tem como base o tratamento de sinais no formato digital. Isto decorre das inúmeras vantagens que os sinais digitais têm em relação aos sinais analógicos, seja para o processamento, armazenamento ou transmissão da informação.

Os sinais analógicos podem ser transformados em sinais digitais<sup>1</sup> através de um conversor A/D. Trata-se de um dispositivo eletrônico que pode ser encontrado em um único *chip*, inserido num microcontrolador ou em placas de aquisição de sinais com várias interfaces para aplicações mais complexas.

Os conversores A/D são indispensáveis na tecnologia atual de reprodução de áudio e vídeo, e estão presentes em placas de som dos computadores e em telefones celulares. Por exemplo,

---

<sup>1</sup> Sobre sinais digitais vocês irão estudar em detalhes nas futuras disciplinas como “Sistemas Digitais”, “Sinais e Sistemas” e “Processamento Digital de Sinais”. Se você tiver interesse em aprender mais a respeito consulte documentos disponíveis no e-Disciplinas da USP.

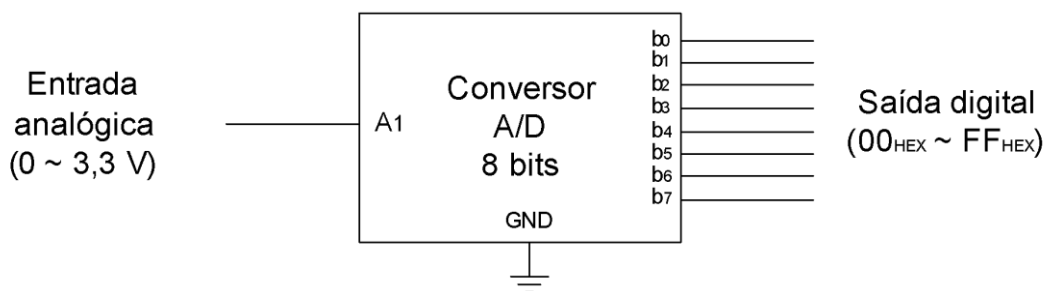
técnicas de gravação típicas para alta fidelidade usam taxa de amostragem de 44,1 kHz<sup>2</sup> (padrão para CD) ou 48 kHz (típica nos computadores). Os conversores A/D são encontrados em *smartphones*, TV digital, osciloscópios e nas novas aplicações de rádio definido por software (SDR – **Software Defined Radio**).

Sabe-se que a maioria dos sinais de interesse na instrumentação elétrica tem comportamento analógico (por exemplo: tensão, corrente, temperatura, campo magnético e pressão mecânica). Ou seja, referem-se a grandezas contínuas, assumindo valores contínuos tanto no tempo como na amplitude. Por outro lado, o sinal digital é duplamente discreto (no tempo e na amplitude).

Os aspectos relevantes de um sinal digital que todo aluno necessita saber são:

- São definidos apenas em instantes discretos de tempo (0, T, 2T, 3T, ...), em que T é o período de amostragem ou intervalo entre amostras;
- Podem assumir apenas um conjunto finito de valores de amplitude (ou seja, um sinal digital não pode assumir um valor real qualquer);
- Um valor digital é representado por um código binário com um determinado número de bits (os mais comuns são: 8, 10, 12, 16 e 20 bits).
- Os valores possíveis são, portanto, múltiplos de um valor mínimo;
- O valor mínimo de uma grandeza digital é o valor correspondente a um bit, especificamente o bit menos significativo (**LSB – Least Significant Bit**).

**Exemplo:** vamos considerar um conversor A/D, como mostrado na Figura 1, com resolução de 8 bits e faixa de tensão de 0 a 3,3 V.



**Figura 1 – Diagrama esquemático de um Conversor A/D de 8 bits.**

Neste exemplo, para uma determinada tensão de entrada na faixa de 0 a 3,3 V, o conversor A/D associará um valor digital utilizando codificação binária. Em geral, por conveniência, os valores binários são representados no formato hexadecimal. Para este conversor, observe que o número de códigos possíveis é 256 (= 2<sup>8</sup>) sendo que cada um dos códigos corresponderá a um intervalo de tensão. Neste exemplo, a extensão de cada

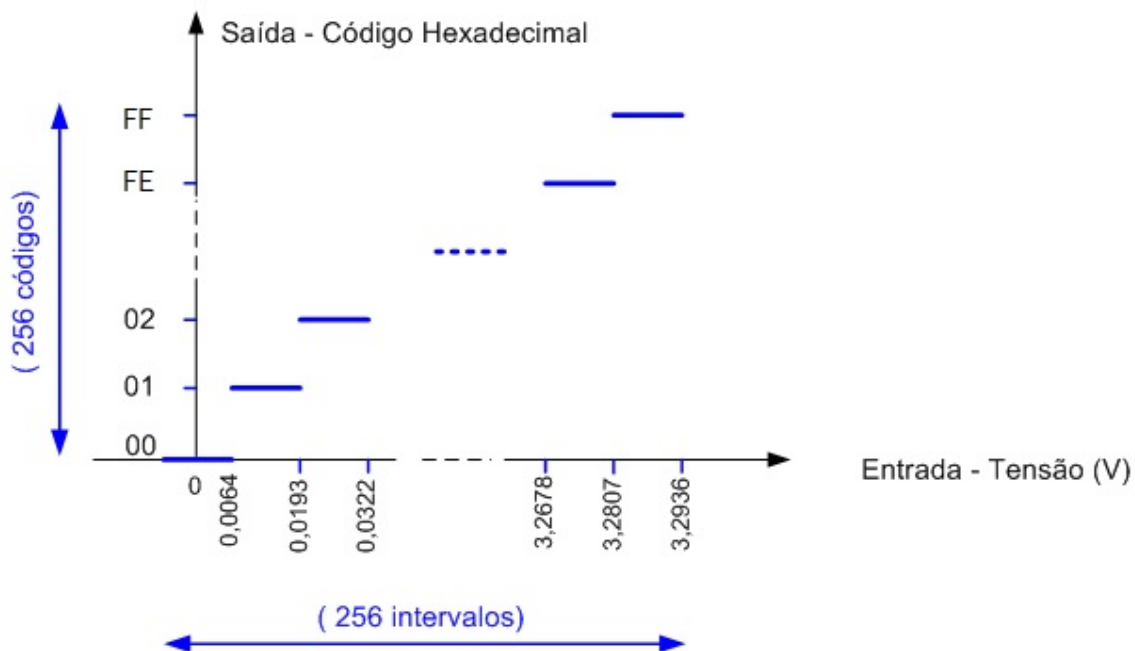
<sup>2</sup> Amostrar um sinal analógico com frequência de 44,1 kHz significa que a cada segundo são tomadas 44100 amostras dele, ou seja, obtém-se uma amostra do sinal a cada 22,7 microssegundos.

intervalo é igual a aproximadamente 0,01289 V, correspondente à divisão de 3,3 V por 256 (número total de códigos do conversor). Neste exemplo, a tensão de fundo de escala do conversor é de  $V_{FS} = 3,3 \text{ V}$ , sendo  $V_{\min} = 0 \text{ V}$  e  $V_{\max} = 3,3 \text{ V}$ . A **Tabela 1** mostra a associação dos valores de tensão de entrada com os valores dos códigos digitais correspondentes (os valores estão arredondados para 5 casas decimais). O primeiro intervalo de tensão é entre - 0,00645 e 0,00645 V para garantir que o centro deste intervalo seja a tensão 0 V (é útil ter um código correspondente à tensão “0”). Veja que isso faz com que o último intervalo não contenha o valor 3,3 V! Esse valor corresponderia ao código 256 ( $100_{\text{HEX}}$ ), porém precisaria de um bit a mais.

**Tabela 1 – Tabela de conversão de um conversor A/D de 8 bits.**

#	Tensão de Entrada (V)	Código Binário	Código Hexa	Tensão associada ao centro do degrau (V)
0	← -0,00645 ~ 0,00645	00000000	00	0
1	0,00645 ~ 0,01933	00000001	01	0,01289
2	0, 01933 ~ 0,03223	00000010	02	0,02578
3	0,03223 ~ 0,04512	00000011	03	0,03867
4	0,04512 ~ 0,05801	00000101	04	0,05156
...	...	...	...	
12	0,14824 ~ 0,16113	00001010	0C	0,15469
...	...	...	...	
253	3, 2549 ~3,2678	11111010	FD	3,26133
254	3,2678 ~ 3,2807	11111110	FE	3,27422
255	3,2807 ~ 3,2936 →	11111111	FF	3,28711

Os valores da **Tabela 1** podem ser representados graficamente, como mostrado na Figura 2.



**Figura 2 – Característica Entrada x Saída de um Conversor A/D de 8 bits.**

Conclui-se que, ao usar um conversor A/D para medir uma determinada tensão, associa-se apenas um único valor de tensão na saída (a última coluna da Tabela 1) para um determinado intervalo de tensão de entrada. Isso significa que a medição efetuada com um conversor A/D apresenta um **erro de quantização**.

Utilizando-se o mesmo exemplo de conversor A/D, se a tensão de entrada for 0,16 V (correspondente ao código 0C<sub>HEX</sub>), a tensão de saída associada será de 0,15469 V. Observe que teremos nesta conversão um erro de quantização de  $(0,16 - 0,15469) = 0,005313\text{V}$ . Note que o **erro de quantização** para esta placa é sempre **menor ou igual** a  $((3,3) / 128) = 0,01289/2$ , ou seja, menor ou igual a **1/2 LSB**.

## 2.1 Software a ser utilizado no experimento

Este ano (2020), utilizaremos um software que foi desenvolvido especialmente para que vocês pudessem avaliar como é processo de conversão de sinais contínuos em digitais por meio de um simulador de conversão analógica digital. Através deste software, ondas periódicas e sinais contínuos (com ou sem ruído) poderão ser simulados e com parâmetros a serem introduzidos pelo usuário, de forma equivalente à de um gerador de funções. Estes sinais serão amostrados pelo simulador de conversor AD. Este simulador deverá ser configurado pelo usuário, tendo-se como graus de liberdade a escolha da sua

resolução em bits, tensão máxima e mínima de operação, frequência de amostragem, entre outros parâmetros.

O software mostra ao usuário as ondas geradas pelo gerador de funções e amostras dos mesmos sinais após o processo de conversão. O número de amostras visualizadas graficamente dependerá da frequência de amostragem selecionada no simulador de conversão AD.

Chamamos a operação de leitura da tensão do conversor de amostragem do sinal.

No guia de atividades remotas há uma descrição de como este software opera e as suas funcionalidades.

### 3. Características básicas dos Conversores A/D

Como exemplificado no item 2, um conversor A/D de  $n$  bits fornece  $2^n$  códigos distintos de saída. Como a entrada do conversor é uma tensão que pode variar continuamente entre um  $V_{\min}$  e um  $V_{\max}$ , e o número de saídas é finito, cada código de saída corresponderá não a uma única tensão de entrada, mas sim a um pequeno intervalo de tensões (ver Figura 5). Com isso, teremos, para um determinado intervalo de tensão da entrada, um código binário correspondente na saída. Ao tamanho de cada intervalo (que corresponde à variação da tensão de entrada que provoca a mudança do bit menos significativo da saída) dá-se o nome de passo de quantização, ou, numa linguagem mais livre, “bit menos significativo”, e indica-se LSB (*least significant bit*) ou  $\otimes V$ . Assim, nas figuras 5a e 5b, LSB é igual ao tamanho de cada degrau horizontal das curvas.

A variação de tensão que corresponderia a  $2^n \times \text{LSB}$  é chamada de tensão de fundo-de-escala,  $V_{FS}$ . Assim,

$$\Delta V = \text{LSB} = \frac{V_{FS}}{2^n}$$

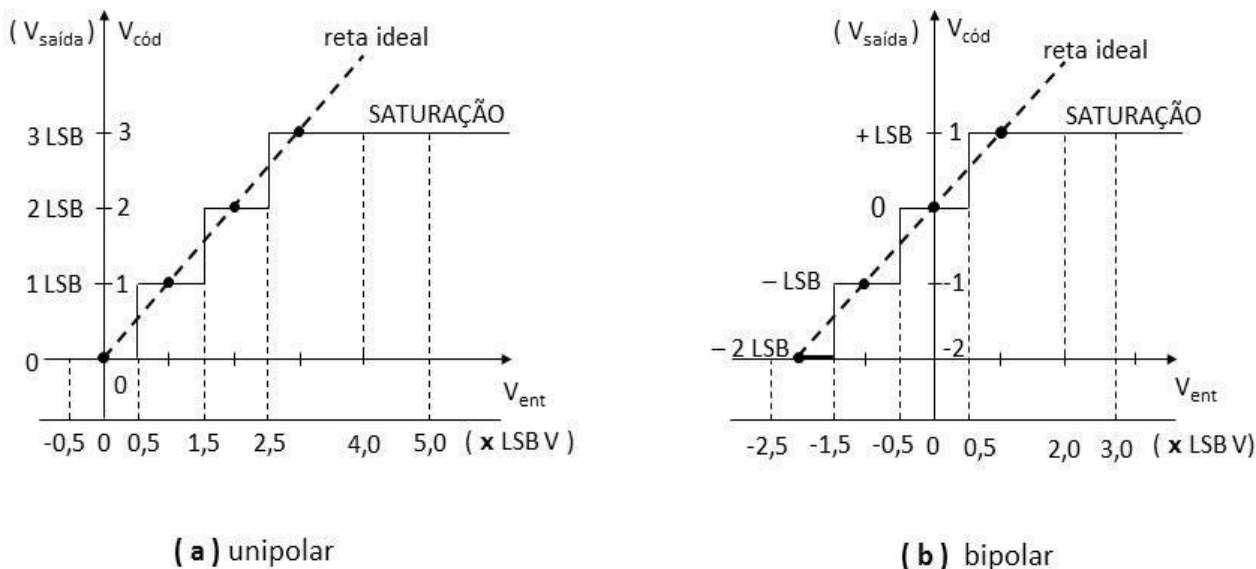
Quanto ao modo de operação, os conversores A/D podem ser:

a) Unipolares, quando operam com sinais de uma só polaridade, entre 0 e  $V_{FS}$  volts.

b) Bipolares, quando aceitam sinais de duas polaridades, entre  $-V_{FS}/2$  e  $+V_{FS}/2$  volts.

Note que as curvas da Figura 5 não são simétricas com relação à origem: a saturação para tensões negativas não é simétrica à saturação para tensões positivas. A razão para

isso é o fato de ser conveniente considerar um degrau com centro no zero, e também que o número de degraus seja par. Observe que o erro de quantização é sempre menor ou igual a  $\frac{1}{2}$  LSB, como já mencionado anteriormente.



**Figura 5** – Características de transferência ideais de conversores A/D de 2 bits.

## 6. Subamostragem de um sinal periódico

Vamos definir a frequência de amostragem de “**fs**” e frequência de uma onda senoidal qualquer de “**f**”. Para que a onda senoidal com frequência **f** seja amostrada adequadamente, é necessário utilizar uma frequência de amostragem (**fs**) superior a 2.f (ou seja, 2 vezes a frequência da onda periódica). Em outras palavras, para que o sinal periódico de interesse seja amostrado adequadamente, é necessário que: **f < fs/2** (logo,  $fs > 2.f$ ). Caso este **critério** não seja respeitado, iremos observar um fenômeno denominado de “rebatimento” (ou “aliasing”). isto é, a forma de onda amostrada parecerá com uma frequência menor que a real! Isto se deve ao fato de estarmos subamostrando o sinal real, uma vez que estamos tomando um número insuficiente de amostras para recompor o sinal senoidal original.

No e-disciplinas, vocês encontrarão material complementar sobre esse assunto, com vários gráficos ilustrando este efeito. Vale a pena ver e analisar os exemplos que estão disponibilizados no e-disciplinas para entender o efeito de subamostragem.