|  |  |
| --- | --- |
|  | **ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  **Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos**  **PSI – EPUSP**  **PSI 3214 - LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA**  **EXPERIÊNCIA 2 - Conversão Analógica Digital (ADC)** |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **No. USP** | **Nome** | **Nota** |
|  |  |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Data:** | **Turma:** | **Profs:** |

**Guia de Atividade remota e Roteiro do relatório**

*(documento inspirado no guia experimental de 2019)*

*Profa. Elisabete Galeazzo, versão 2020 (online)*

**1. Objetivos**

Assimilar os princípios envolvidos na conversão de um sinal analógico para sinal digital; verificar algumas das características mais relevantes do processo de conversão analógica-digital (AD) por meio de simulações, incluindo, entre outras, o degrau de quantização e amostragem de um sinal variante no tempo.

**2. Material Necessário**

Arquivos e programas computacionais necessários (desenvolvidos em LabVIEW):

**. Tabela de Conversão.zip (→ Tabela de Conversão.exe[[1]](#footnote-1))**

**. Conversão\_AD\_2020\_v8.0.zip (→ ADC.exe)**

**. Runtime do LabVIEW 2014** (para quem ainda não tiver LabVIEW instalado no computador)

**. Conversão\_AD\_2020\_v8.0\_instalador.zip** (para quem não tem LabVIEW nem o Runtime do LabVIEW 2014 instalados)

**Observação:** se você tiver instalado o LabVIEW 2014 em seu computador, provavelmente não terá problemas para rodar os 2 aplicativos desta experiência. Caso contrário, você precisará instalar o Runtime do LabVIEW 2014 ou, como uma segunda opção para o aplicativo ADC, deverá utilizar o Conversão\_AD\_2020\_v8.0\_instalador.

**2. CONVERSÃO AD**

**2.1 Conversão de sinais**

Neste item serão discutidas as características básicas do conversor de sinais utilizado neste experimento

Considere um conversor AD com as seguintes características: resolução de 10 bits, tensão de fundo de escala de 5 V, ganho unitário e modo de operação unipolar (de 0 a 5 V).

**a)** Apresente como calcular o LSB e 1/2 LSB deste conversor. Indique os resultados dos cálculos com **quatro** algarismos significativos:

|  |
| --- |
|  |

**b)** Determine e apresente os valores dos códigos decimal e binário deste conversor para as tensões a seguir:

Tabela 1: Conversão das tensões em volts para códigos binário e decimal.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Código Binário | Código Decimal | Tensão CC (centro do degrau) em volts |
|  |  | 0,04883 |
|  |  | 0,1025 |
|  |  | 1,499 |
|  |  | 2,500 |

Mostre como você fez cálculos acima:

|  |
| --- |
|  |

**c)** Confira os resultados calculados no item anterior usando agora o programa “**Tabela de Conversão”,** que efetua a conversão de sinais analógicos para códigos binários (equivalentes, por exemplo, ao que um microcontrolador presente na placa padronizada Arduino UNO **[[2]](#footnote-2)** de 10 bits utiliza). Lembre-se de clicar no botão “run” na barra de ferramentas” se estiver utilizando a extensão “. Vi” do programa.

Mude a página deste programa (existem **128** páginas disponíveis: de 0 a 127) para encontrar o dado desejado. Note que você poderá alterar o valor da tensão de fundo de escala do conversor neste programa. Faça isso e observe o que ocorre com o LSB, que está configurado para trabalhar com8 casas decimais. Com base nas observações, responda:

**c1)** Caso seja necessário amostrar sinais de um sensor que fornece tensões em torno de 1 V, qual fundo de escala do conversor (dos possíveis valores indicados na tabela de conversão) apresentaria melhor resolução para observar pequenas variações? Faça uma comparação entre as escalas disponibilizadas no executável e justifique sua resposta.

|  |
| --- |
|  |

Ao finalizar, feche o programa.

**2.2 – Sobre o software *ADC***

Com este software será possível simular diversos sinais do gerador de funções e avaliar o resultado da amostragem por meio um conversor AD, analisando-se os sinais em função do tempo, histogramas e funções de transferência

Utilizaremos, a partir deste item, o software **ADC** para efetuar os demais itens deste experimento**.**

O software **ADC** possui 4 janelas (Fig.1). Na janela principal, denominada “Experiência 2 - Conversão AD”, 2 curvas são sempre visualizadas: o sinal (tensão) produzido pelo “**Gerador de Funções**” e o sinal resultante, após ser amostrado pelo “**Conversor Analógico Digital**” em função do tempo. Cada janela também recebe o nome genérico de “Painel Frontal”, e em algumas delas encontram-se dois cursores deslizantes sobre os gráficos para auxiliar nas medições sobre as curvas e, com os recursos da **paleta de gráficos**, é possível atuar sobre o gráfico com amplificações (“zoom”) ou retornar à visualização completa do gráfico (Fig. 2). Você encontrará mais informações sobre as principais funcionalidades deste VI clicando no ícone “?”, no canto superior da janela.

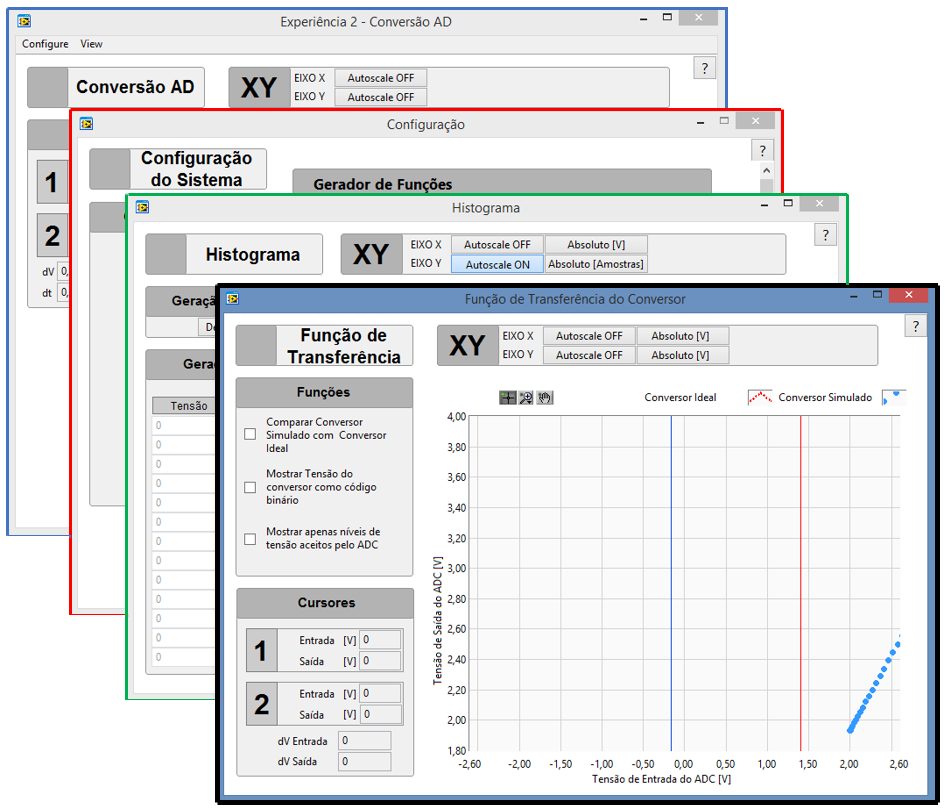


Fig.1 Painéis frontais do software **ADC**.

|  |  |
| --- | --- |
| No conjunto de ícones da paleta de gráfico, podemos atuar sobre o gráfico em questão sem modificar seu conteúdo. Funções como **movimentação de cursores**, **ferramentas de zoom**, **movimentação do gráfico** estão presentes e permitem ao usuário focar em um intervalo específico desejado. **Dica**: ao selecionar um dos tipos de zoom, clicar em  para confirmar a ação. Será extremamente útil efetuar isso quando utilizar o recurso “*bring cursor to center*” (para não alterar o zoom selecionado ao atuar nos cursores deslizantes). |  |

Fig.2 Funcionalidades da Paleta do Gráfico.

Para habilitar ou desabilitar a escala automática nos dois eixos do gráfico, clique nos botões XY, situados na parte superior do Painel Frontal Exp2-Conversão AD.

Para configurar os parâmetros do **Gerador de Funções** e do **Conversor Analógico Digital** situados na janela “Configuração do Sistema”, clique no menu “**Configure**” e selecione “**Signal Path**”. Uma nova janela se abrirá, como ilustrado na Figura 3. Nesta janela serão programados os sinais do gerador de funções, selecionando-se os parâmetros dos sinais, e a especificação do Conversor AD, por meio da escolha de vários parâmetros.

|  |  |
| --- | --- |
| (a) | (b) |

Fig. 3 Painel frontal da janela “Configuração do Sistema”, onde são especificados: (a) os parâmetros dos sinais e (b) os parâmetros do conversor para as simulações.

No “**Gerador de Funções**” é possível definir diferentes formas de onda de sinais periódicos, inserindo os parâmetros do sinal da mesma forma que fazemos com equipamentos de laboratório. Nele, parâmetros como frequência e amplitude, por exemplo, são definidos pelo usuário, assim como o intervalo de tempo total a ser visualizado no gráfico. No programa, este intervalo de tempo é calculado da seguinte forma:

Se desejar visualizar o sinal com um intervalo de tempo maior, basta aumentar o número de amostras do gerador.

Neste executável, note que a frequência de amostragem do gerador é constante e igual a 1 MHz. Altere o número de amostras do gerador de sinais entre 5x104 a 1x106 amostras, e visualize como isso afeta o intervalo de tempo do sinal no gráfico do aplicativo.

No “**Conversor Analógico Digital**” vários parâmetros podem ser selecionados pelo usuário, como por exemplo, resolução do conversor, frequência de amostragem e tensão de fundo de escala (tensão máxima e tensão mínima).

Como padrão, o sinal produzido pelo “gerador de funções” estará sempre representado em vermelho no gráfico, e em azul estará a representação do sinal após a amostragem realizada pelo Conversor Analógico Digital. E, clicando com o botão direito do mouse na tela do gráfico, você poderá trazer os cursores deslizantes para o centro do gráfico, clicando “bring cursor to center”.

**2.3 – Histograma de amostragem de uma tensão constante sem e com ruído**

Usaremos o simulador **Gerador de Funções** para gerar um sinal constante (**DC**) com tensão de **1,5 V** e avaliaremos como ficará este sinal após ser amostrado pelo Conversor AD. Utilizaremos um histograma para obter o número de amostras relacionado a um determinado endereço binário (ou tensão no centro do degrau do código binário).

|  |
| --- |
| No software **ADC**, configure o “**Gerador de Funções**” para fornecer um sinal constante. Para isso, escolha uma forma de onda qualquer, frequência baixa e amplitude zero. Na tensão de **offset**, escolha o valor de **1,5 V**. Certifique-se que esteja habilitado “***no noise***” no parâmetro “tipo de ruído”.  Configure o “**Conversor Analógico Digital**” para atuar com uma resolução de **10 bits**, tensão mínima de 0 V, tensão máxima de 5 V (ou seja, **VFS = 5 V**) e frequência de amostragem de **10 kHz**. Mantenha os demais parâmetros do conversor zerados.  Ao clicar com o botão direito do mouse sobre o ícone “ADC Signal”, você poderá visualizar os pontos amostrados no gráfico, selecionando o comando “Point Style”, como indicado na Fig.4. Também poderá desabilitar a função de interpolação (“Interpolation”), para deixar visível apenas as amostras do sinal, e tornar mais nítida esta informação.    Fig. 4 Como visualizar os pontos amostrados no gráfico. |

a) Compare o valor do sinal após passar pelo conversor com a curva original do gerador. Faça uma relação com os resultados da Tabela 1. Apresente uma discussão sobre esses resultados.

|  |
| --- |
|  |

Para gerar um histograma dos sinais amostrados, selecione no menu da janela principal do programa: View → Histograma. Um histograma será gerado (relacionando o número de ocorrências (ou número de amostras) em função da tensão no centro do degrau (em volts). Analise se o histograma gerado está coerente com a resposta obtida no gráfico de tensão em função do tempo (no Painel Frontal da Exp2-Conversão AD).

|  |
| --- |
| Entenda os recursos do Painel Frontal “Histograma”:  Para gerar um histograma automaticamente, você deve selecionar:   1. “**Geração Automática**” - “Habilitada”; 2. Selecionar o **eixo x** (valor absoluto em tensão (V)) ou valor relativo (que indicará o valor decimal associado ao LSB); 3. A escala do eixo x poderá ser alterada, através do botão deslizante “**Zoom (LSB)**” posicionado no topo da janela. Esta função só estará disponível ao selecionar AUTOSCALE OFF no eixo x. |

b) Vamos agora introduzir um ruído de 1,5 mV (*Gaussian Noise*) ao sinal DC, para simular pequenas oscilações do sinal DC fornecido por um gerador de bancada (ou seja, vamos supor que o gerador forneça tensões com variações em torno de 0,1%).

Veja o que acontece com o sinal gerado e o amostrado no gráfico principal e analise o histograma obtido. Utilize a tabela a seguir para indicar os valores de tensão mais representativos que são indicados no histograma e o número de ocorrências (ou número de amostras) associadas a eles.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Valores em decimal** |  |  |  |
| **Valores em tensão (V)** |  |  |  |
| **No de amostras** |  |  |  |

Justifique o resultado observado:

|  |
| --- |
|  |

c) Some agora um ruído (*Gaussian noise*) de **15 mV** ao sinal original (vamos provocar agora uma variação de 1% em torno do seu valor médio). Observe o que ocorre com as amostras do sinal no domínio do tempo assim como a sua representação no histograma. Faça um esboço do histograma obtido (ou copie o histograma gerado automaticamente aqui) e faça uma discussão sobre o histograma obtido.

|  |
| --- |
| Histograma: |

Avalie e discuta os resultados obtidos neste item.

|  |
| --- |
|  |

**2.4 – Quantização da conversão AD**

O objetivo deste item é a verificação da quantização da conversão AD e a determinação gráfica do valor do LSB.

Nesta parte da experiência você deve clicar no menu *View* → *ADC Transfer Function* do **ADC** para poder examinar os degraus de quantização de um conversor AD.

|  |
| --- |
| *Informações sobre a janela “****Função de******Transferência\_do\_Conversor****”:*  *Nessa janela é visualizada a curva de transferência do conversor, ou seja, um gráfico que relaciona a tensão de saída (tensão das amostras após o processo de conversão, indicadas no eixo y) em função da tensão de entrada do conversor (ou seja, a mesma tensão da saída do gerador de funções, eixo x).*  *Note que a curva de transferência ideal (se fosse possível obtê-la) tenderia a uma reta do tipo y = x, pois, no caso ideal, o valor do LSB tenderia a zero, mas, em contrapartida, o número de bits do conversor ideal tenderia a um valor elevadíssimo ( o que é impossível na prática!).* |

Siga os passos a seguir para determinar o passo de quantização do conversor ( = LSB ):

**a)** Na janela de configuração, programe o Gerador de Funções selecionando-se 4.000 amostras, forma de onda do tipo dente de serra (Sawtooth Wave), frequência de 10 Hz, amplitude de 2,5 V, offset nulo e sem ruído. Note que somente será visualizada uma parcela reduzida do sinal “dente de serra” (você deve visualizar uma reta nos intervalos entre 0 e 0,004 s e 0 a 0,2 V).

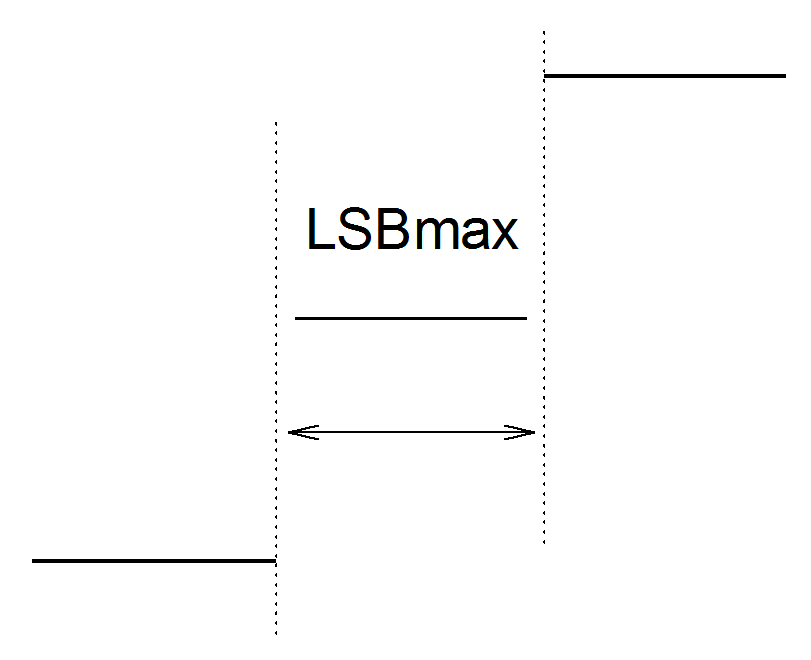
**b)** Programe o **Conversor Analógico Digital** para ter resolução de 8 bits, frequência de amostragem de 30 kHz, tensão máxima de 5 V e tensão mínima de 0 V. Os demais parâmetros devem ser fixados em zero.

**c)** Acesse o painel “Função de Transferência” e observe como ficou a curva de transferência do ADC, selecionando “autoscale on” tanto para o eixo x quanto para o eixo y. Caso esteja selecionada, desabilite a opção “comparar conversor simulado com conversor ideal”, e deixe visível no gráfico apenas as amostras, sem interpolação.

Por que neste gráfico são visualizados patamares (ou faixas) de tensão de entrada associados a um mesmo valor de y? Explique.

|  |
| --- |
|  |

d) Utilizando os cursores deslizantes disponíveis no VI, delimite um dos degraus da conversão, seguindo a indicação da Figura 5. Determine os valores LSBmin e LSBmax. Apresente os resultados na tabela 2 e compare com o valor teórico esperado. Caso necessite, utilize a função “bring cursor to center” para facilitar as medições com os cursores.



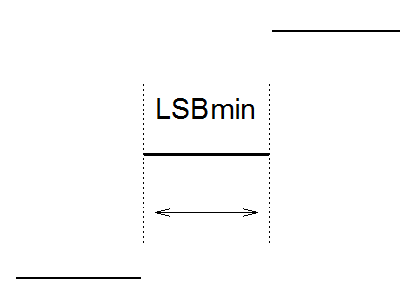


Fig. 5 Determinação experimental do passo (ou degrau) de quantização.

**Tabela 2**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Resolução do Conversor** | **Valor do LSBmin**  **obtido** | **Valor do LSBmax**  **obtido** | **Valor teórico**  **do LSB** |
| **8 bits** |  |  |  |

Faça uma discussão sobre os resultados obtidos:

|  |
| --- |
|  |

**2.5 - Faixa dinâmica da conversão analógica digital**

Nesta etapa identificaremos a faixa dinâmica de operação do conversor AD para tensão de fundo de escala de 5 V

No “Gerador de Funções”, selecione: visualização de **50.000 amostras**, forma de onda **dente de serra, frequência de 10 Hz**, **amplitude de 6 V** e **offset de (– 0,5 V)**. No “Conversor Analógico Digital”, selecione: **8 bits** de resolução e **frequência de amostragem de 1 kHz**, e **tensão máxima de 5 V**. Todos os demais parâmetros devem ser nulos.

**a)** Vá à janela “Função de Transferência do Conversor” e compare as amostras com a curva ideal (que apresenta inclinação unitária) traçada pelo programa. Responda a seguir:

Por que os degraus da conversão (ou seja, os passos de quantização) não estão visíveis neste gráfico?

|  |
| --- |
|  |

**b)** Esboce o gráfico obtido e a curva ideal ajustada aos pontos experimentais. Discuta porque há saturação do sinal de entrada nos limites inferior e superior da tensão de saída do conversor.

|  |
| --- |
|  |

**c)** Introduza agora um erro de offset de 10 LSB no conversor. Que mudanças são observadas na curva de transferência em relação ao caso ideal?

|  |
| --- |
|  |

Altere o erro de offset para zero e introduza um erro de ganho de 10 LSB. Que mudanças são observadas em relação ao caso ideal?

|  |
| --- |
|  |

**2.6 – Amostragem de sinal periódico**

Será verificada a limitação da amostragem, analisando-se o número de amostras por período, de sinais periódicos no processo de conversão AD

Nesta etapa, ondas senoidais de diversas frequências serão fornecidas pelo **Gerador de Funções** e amostradas pelo **Conversor Analógico Digital**, que tem frequência de amostragem constante. Você deverá comparar o sinal original produzido pelo gerador de funções, com o sinal amostrado pelo conversor AD e fazer uma discussão sobre os resultados obtidos, respondendo as perguntas indicadas nessa seção.

Informações sobre os parâmetros que utilizaremos nesta etapa:

Selecione os seguintes parâmetros no conversor: resolução de 10 bits, tensão de fundo de escala de 5 V, modo unipolar, e frequência de amostragem de 1 kHz (**fs = 1000 amostras/segundo**). Mantenha os demais parâmetros do ADC nulos.

\* Como sugestão, inicialmente ajuste o número de amostras do gerador de funções para que seja visualizado o sinal no gráfico num intervalo de até 0,1 s. Porém, quando aumentar a frequência do sinal da onda senoidal, como indicado na Tabela 3, note que será mais conveniente alterar a escala de tempo do gráfico para visualizar apenas em torno de 5 períodos do sinal original (para frequências até 500 Hz). Já para frequências mais elevadas, superiores a 800 Hz, procure uma escala que possibilite visualizar alguns períodos (2 a 3) do sinal amostrado.

**a)** Selecione no “Gerador de Funções” um **sinal senoidal** de frequência **50 Hz,** amplitude de **1 V** e offset de **3 V** (lembre-se que conversores unipolares aceitam tensões entre 0 e Vmáx, que aqui será igual a **5 V**).

**Complete a tabela a seguir,** determinando as frequências das ondas após sofrerem o processo de amostragem pelo conversor AD. Para isso, utilize os cursores dos gráficos para determinar o período das ondas com melhor precisão. Repita o mesmo procedimento alterando-se gradativamente a frequência do sinal gerado para os demais valores indicados na tabela, e analisando o que ocorre com a frequência do sinal amostrado.

(**Dica**: habilite a visualização dos pontos amostrados, além da função de interpolação, para verificar quantos pontos estão sendo amostrados por período).

Tabela 3 – Frequências das ondas senoidais do gerador e após passarem pelo conversor AD.

|  |  |
| --- | --- |
| Frequência da onda do gerador (Hz) | Frequência da onda amostrada (Hz)  (c/ 2 casas decimais)\* |
| 50 |  |
| 100 |  |
| 200 |  |
| 300 |  |
| 400 |  |
| 450 |  |
| 500 |  |
| 600 |  |
| 700 |  |
| 800 |  |
| 900 |  |
| 950 |  |
| 1000 |  |

\*frequências entre 300 e 700 Hz requerem mais cuidado e atenção para serem medidas.

**b)** Ao aumentar a frequência da onda senoidal (de 50 para 400 Hz), por que a forma de onda do sinal amostrado pelo conversor não foi equivalente à onda senoidal fornecida pelo gerador? Justifique.

|  |
| --- |
|  |

**c)** A partir de qual frequência do sinal do gerador observou-se nitidamente uma frequência diferente associada ao sinal amostrado? Por que isso ocorreu?

|  |
| --- |
|  |

**d)** Observe o que acontece com o sinal senoidal amostrado ao alterar a frequência do sinal do gerador para 990 Hz. Se preferir, altere o número total de amostras capturadas para 2x105. Qual é a frequência do sinal amostrado? Por que tal frequência é denominada espúria neste caso? (Para responder esta pergunta lembre-se que este efeito é denominado de “rebatimento” ou “*aliasing*”). O que deveria ser feito para que o programa identificasse a frequência do sinal gerado corretamente?

|  |
| --- |
|  |

Se você ainda ficou com dúvidas neste último item, sugerimos que assista ao vídeo “Amostragem”, leia o material complementar disponibilizado no e-disciplinas e então refaça o item.

**3. Bibliografia**

[1] “Analog-to-digital converter”, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital>, acessado em 05/08/2019.

[2] LabVIEW Graphical Programming, Versão 5, National Instruments, 1998.

[3] R.C. JAEGER, Tutorial : Analog Data Acquisition Technology -

Part I : Digital-to-Analog Conversion, IEEE Micro, May 1982, pg. 20-37.

Part II: Analog-to-Digital Conversion, IEEE Micro, August 1982, pg. 45-56.

Part III : Sample-and-holds, Instrumentation, Amplifiers and Analog Multiplexers; IEEE Micro, Nov. 1982, pg. 20-35.

Part IV : System Design, Analysis and Performance, IEEE Micro, February 1983, pg. 52-61.

[4] Walter Kester, “The Importance of Data Converter Static Specifications – Don’t Lose Sight of the Basics”, https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-010.pdf , acessado em 05/08/2019.

[5] Application Note 748, “The ABCs of ADCs: Understanding How ADC Errors Affect System Performance,” <http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/748> , acessado em 05/08/2019.

[6] Texas Instruments, “Data Acquisition Circuits Data Book”, SLAD001, Mixed-Signal Products, July 1995.

[7] L.Q.ORSINI e D.CONSONNI Curso de Circuitos Elétricos, Vol. 2, Ed. Edgard Blücher, 2a Ed., 2004, Cap.10.

**4. Agradecimentos**

Fazemos aqui um agradecimento especial ao aluno recém formado da Engenharia Elétrica da POLI, Rodrigo Anjos de Souza, pelo desenvolvimento do software **Conversor AD\_2020**, sem o qual não poderíamos realizar esta experiência de forma remota.

Agradecemos aos professores Walter Salcedo e Marcel Wagner, e aos especialistas Henrique E. M. Peres e Antonio Sandro Verri, pelas sugestões e revisão deste documento.

1. No LabVIEW, o arquivo “\*.exe” também é chamado de aplicativo. [↑](#footnote-ref-1)
2. *Apesar do conversor do Arduino UNO ser de* ***10 bits****, o programa “Tabela de Conversão” apresenta 12 bits para cada código binário, onde os dois bits mais significativos serão sempre zero.* [↑](#footnote-ref-2)