



**Departamento de Engenharia Elétrica**  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**RODRIGO MIGUEL DOS SANTOS**

**Painel Anemométrico Analógico-Digital da Aeronave AS550A2 FENNEC**

Taubaté - SP  
2017

**RODRIGO MIGUEL DOS SANTOS**

**Painel Anemométrico Analógico-Digital da Aeronave AS550A2 FENNEC**

Trabalho de Graduação do curso de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino

Taubaté  
2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado  
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S237p Santos, Rodrigo Miguel dos  
Painel anemométrico analógico-digital da aeronave  
AS550A2 FENNEC. / Rodrigo Miguel dos Santos. - 2017.

85f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica e  
Eletrônica) – Universidade de Taubaté. Departamento de  
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2017  
Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino,  
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.  
Coorientador: Eng. André Luiz da Silva.

1. Aeronave. 2. Anemométrico. 3. Treinamento. I.  
Título.



Departamento de Engenharia Elétrica  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**PAINEL ANEMOMÉTRICO ANALÓGICO DIGITAL DA AERONAVE  
AS550A2 FENNEC**

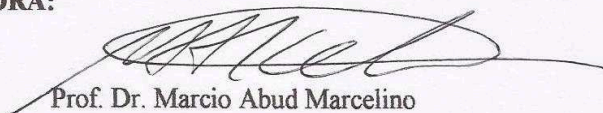
**RODRIGO MIGUEL DOS SANTOS**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA”

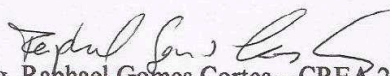
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES  
Coordenador


**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino

Orientador/UNITAU-DEE

  
Eng. Raphael Gomes Cortes – CREA 2006131876

Membro Externo/CAvEx

  
Eng. Leonardo Artur Moreira Alves – CREA 5062900440

Membro Externo/Ford Motor Company

Dezembro de 2017

de modo especial, a minha noiva e aos meus pais, que tanto apoiaram e incentivaram o meu crescimento profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que iluminou meu caminho e minha vida nesta difícil jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o trabalho aqui apresentado seria praticamente impossível.

Agradeço meu co-orientador, engenheiro André Luiz da Silva, pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes a aeronave em estudo.

Aos meus pais Roberto e Magda, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Ao Exército Brasileiro, em particular nas pessoas dos Sargentos Cristofolletti, Jofre e Ramires, principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes a aeronave em estudo.

Aos meus amigos, por estarem sempre do meu lado nos momentos difíceis e de diversão.

A minha noiva, Juliana Ribeiro da Silva, pela compreensão e suporte nesta árdua missão.

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.”

John Ruskin

SANTOS, R. M. **Painel anemométrico analógico digital da aeronave AS550A2 FENNEC** 2017. 85 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2017.

## RESUMO

Este trabalho apresenta as principais etapas do projeto e montagem de um painel anemométrico analógico-digital. Os instrumentos analógicos instalados no painel foram o velocímetro, altímetro e indicador de velocidade vertical, todos estes instrumentos foram sucateados provenientes da aeronave AS 550 A2 FENNEC. A interface analógico-digital foi realizada através da plataforma Arduino que tem como base o microcontrolador ATmega 328. Os sinais de pressão que alimentam os indicadores anemométricos analógicos foram convertidos em níveis de tensão analógico através de transdutores anemométricos sucateados excitados pela plataforma Arduino. Este microcontrolador foi o responsável por realizar as etapas de amostragem do sinal analógico, quantização e codificação, em seguida transmiti-lo a um computador via USB. Os dados brutos captados via plataforma Arduino passaram por um processo de calibração tornando-se dados de engenharia, neste processo foram levantadas as curvas de resposta de cada indicador comparando os dados brutos obtidos com os valores exibidos nos indicadores analógicos. A partir deste procedimento foi possível obter a equação da curva de tendência de cada indicador, estas equações foram carregadas no microcontrolador Arduino possibilitando a exibição dos parâmetros convertidos em um sistema supervisor já na forma de indicador digital. Os resultados deste projeto desenvolvido foram analisados maneira qualitativa através dos estudos de possibilidade de emprego e de maneira quantitativa através do cálculo do erro de indicação entre os instrumentos analógicos e digitais, possibilitando uma avaliação exata do perfil de emprego do projeto desenvolvido. O painel anemométrico após finalizado será destinado ao Centro de Instrução de Aviação do Exército para utilização nos diversos cursos ministrados e para a prática de técnicas correntes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aeronave. Anemométrico. Treinamento.



SANTOS, R. M. **Anemometric analog-digital panel of airplane AS550A2 FENNEC**. 2017. 85 f. Graduate Work in Electrical and Electronic Engineering – Department of Electrical Engineering, Taubaté University, Taubaté, 2017.

### **ABSTRACT**

This work presents the main stages of the design and assembly of an anemometric analog-digital panel. The analog instruments installed on the panel were the airspeed, altimeter and vertical speed indicator, all damaged instruments from the helicopter AS550A2. The analog-digital interface was made using the Arduino platform, which is based on the ATmega 328 microcontroller. The pressure lines that feed the analogue anemometric indicators were converted to analog voltage levels by scrap anemometric transducers, which are supply by the Arduino platform. This microcontroller was responsible for performing the steps of sampling the analog signal, quantization and coding, then transmit it to a computer by USB. The raw data obtained through the Arduino platform underwent a calibration process becoming engineering data, in this process the response curves of each indicator were obtained comparing the raw data with the values displayed in the analog indicators. From this procedure it was possible to obtain the equation of the trend curve of each indicator, these equations were loaded in the Arduino microcontroller allowing the display of the parameters converted into a supervisory system already in the form of a digital indicator. The results of this project were analyzed qualitatively through the employment possibility studies and quantitatively by calculating the error of indication between analog and digital instruments, allowing an accurate evaluation of the employment profile of the developed project. The finished anemometric panel will be assigned to the Army Aviation Instruction Center for use in the various courses taught and for the practice of current techniques.

**KEYWORDS:** Project. Sampling. Quantization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura básica painel anemométrico analógico-digital. ....	17
Figura 2 – Arquitetura básica de um sistema anemométrico. ....	18
Figura 3 – Obtenção de grandezas e localização de componentes. ....	19
Figura 4 – Cápsula aneroide para a diminuição da altitude. ....	20
Figura 5 – Cápsula aneroide para o aumento da altitude. ....	21
Figura 6 – Componentes do indicador altímetro. ....	21
Figura 7 – Componentes do indicador <i>climb</i> . ....	22
Figura 8 – Componentes do indicador de velocidade ou velocímetro. ....	23
Figura 9 – Transdutores de pressão estática comerciais. ....	24
Figura 10 – Transdutores de pressão dinâmica comerciais. ....	26
Figura 11 – Etapas do processo de conversão de sinal de analógico para digital. ....	27
Figura 12 – Arduino UNO R3. ....	29
Figura 13 – Arquitetura da placa Arduino UNO R3. ....	30
Figura 14 – IDE Arduino. ....	32
Figura 15 – Entradas analógicas da placa Arduino UNO. ....	33
Figura 16 – Primeira conversão. ....	35
Figura 17 – Conversão normal. ....	36
Figura 18 – Ambiente de desenvolvimento do IWS. ....	37
Figura 19 – Fluxo de caracteres. ....	38
Figura 20 – Painel FENNEC antes da modernização. ....	39
Figura 21 – Painel FENNEC após a modernização. ....	40
Figura 22 – PFD35. ....	41
Figura 23 – Maleta de calibração. ....	42
Figura 24 – Nomenclatura. ....	44
Figura 25 – Encapsulamento do transdutor de PB. ....	46
Figura 26 – Encapsulamento do transdutor de QB. ....	46
Figura 27 – Fixação dos transdutores do Arduino UNO. ....	47
Figura 28 – Fixação dos indicadores. ....	48
Figura 29 – Programa para medição da taxa de amostragem. ....	49
Figura 30 – Dados de amostragem obtidos. ....	50
Figura 31 – Esquema de conexões para obtenção dos dados brutos. ....	52
Figura 32 – Programa de obtenção dos dados brutos. ....	52

Figura 33 – Leitor de dados da serial da IDE do Arduino. ....	53
Figura 34 – Montagem para obtenção do parâmetro altitude.....	54
Figura 35 - Curva do parâmetro altitude. ....	57
Figura 36 – Montagem para obtenção do parâmetro razão de subida e descida. ....	58
Figura 37 – Curva do parâmetro razão de subida e descida. ....	59
Figura 38 – Montagem para obtenção do parâmetro velocidade.....	60
Figura 39 – Curva do parâmetro velocidade. ....	62
Figura 40 – Programa final obtido.....	63
Figura 41 – Tela criada no software Indusoft.....	65
Figura 42 – Folha principal do driver. ....	65
Figura 43 – Página de endereçamento. ....	66
Figura 44 – Seleção de faixas dos indicadores.....	66
Figura 45 – Vista lateral painel analógico.....	67
Figura 46 – Vista interna painel analógico.....	68
Figura 47 – Vista interna aproximada painel analógico. ....	68
Figura 48 – Conexão painel analógico e digital. ....	69
Figura 49 – Vista frontal da conexão painel analógico e digital. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Transdutor de PB .....	25
Tabela 2 – Transdutor de QB .....	26
Tabela 3 – Parâmetros maleta de calibração .....	42
Tabela 4 – Identificação dos indicadores utilizados .....	43
Tabela 5 – Dados obtidos da calibração do parâmetro altitude (parte 1).....	55
Tabela 6 – Dados obtidos da calibração do parâmetro altitude (parte 2).....	56
Tabela 7 – Dados obtidos da calibração do parâmetro razão de subida e descida .....	59
Tabela 8 – Dados obtidos da calibração do parâmetro velocidade.....	61
Tabela 9 – Erro obtido para o indicador altímetro.....	71
Tabela 10 – Erro obtido para o indicador velocímetro .....	72
Tabela 11 – Custos do projeto .....	73
Tabela 12 – Áreas de aplicação do projeto .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico-Digital
AWG	<i>American Wire Gauge</i> – Escala Americana de Bitola de Fios
ASCII	<i>American Standard Code for Information</i> – Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação
CIAvEx	Centro de Instrução de Aviação do Exército
DC	<i>Direct Current</i> – Corrente Contínua
FSS	<i>Full Scale Span</i> – Erro Máximo em Relação ao Fundo de Escala
FTDI	<i>Future Technology Devices International</i> – Dispositivos Internacionais de Tecnologia do Futuro
GND	<i>Ground</i> - Terra
I/O	<i>Input/Output</i> – Entrada/Saída
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> – Ambiente Integrado de Desenvolvimento
IHM	Interface Homem-Máquina
IWS	<i>Indusoft Web Studio</i> – Plataforma de Rede Indusoft
MPN	<i>Manufacturing Part Number</i> – Número de Manufatura da Peça
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i> – Modulação por Amplitude de Pulsos
PB	Pressão Estática Básica
PC	<i>Personal Computer</i> – Computador Pessoal
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i> – Modulação por Código de Pulsos
PFD	<i>Primary Flight Display</i> – Display Primário de Voo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por Largura de Pulsos
QB	Pressão Dinâmica Básica
RS	<i>Recommended Standard</i> – Padrão Recomendado
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i> – Unidade de Terminal Remoto
SCADA	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> – Transmissor e Receptor Assíncrono Universal
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento Série Universal
VSI	<i>Vertical Speed Indicator</i> – Indicador de Velocidade Vertical

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus- Celsius
bps	<i>bits per second</i> – bits por segundo
$f_a$	Frequência de Amostragem
fpm	<i>Feet per minute</i> – pés por minuto
$f_s$	Maior frequência do sinal amostrado
ft	<i>Feet</i> - pés
km/h	Kilometros por hora
kt	<i>Knots</i> - nós
mA	Mili-Ampère
mph	Milhas por hora
N	Número de bits do conversor
psi	<i>Force per Square Inch</i> – Unidade de Pressão
$V_{DC}$	Tensão Contínua
$V_{REF}$	Tensão de Referência

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO .....	14
1.2 MOTIVAÇÃO .....	15
1.3 DISCUSSÃO DO PROBLEMA.....	15
1.4 SEQUÊNCIA DOS CAPÍTULOS .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE INDICAÇÃO ANEMOMÉTRICO ANALÓGICO .....	18
2.1.1 Altímetro.....	20
2.1.2 <i>Climb</i> .....	22
2.1.3 Velocímetro .....	23
2.2 TRANSDUTORES DE PRESSÃO .....	23
2.3 CONVERSÃO DE DADOS ANALÓGICOS PARA DIGITAIS .....	26
2.3.1 Etapa de amostragem.....	28
2.3.2 Etapa de quantização .....	28
2.3.3 Etapa de codificação.....	29
2.4 MICROCONTROLADOR ARDUINO .....	29
2.4.1 Arduino UNO.....	30
2.4.2 Interface de programação Arduino UNO .....	31
2.4.3 Aquisição de dados analógicos com Arduino UNO.....	33
2.5 SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	36
2.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E EXIBIÇÃO DE DADOS AERONAVE FENNEC MODERNIZADA.....	39
2.7 MALETA DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS.....	42
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
3.1 PROJETO DO PAINEL ANALÓGICO .....	43
3.2 DIAGRAMAS ELÉTRICO E ANEMOMÉTRICO .....	44
3.4 CONFECÇÃO DO PAINEL ANALÓGICO .....	45
3.3 DEFINIÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM .....	48
3.4 CALIBRAÇÃO E OBTENÇÃO DAS CURVAS DOS INSTRUMENTOS.....	51
3.4.1 Obtenção dos dados brutos .....	51

3.4.2 Obtenção das curvas .....	53
3.4.2.1 Curva do parâmetro altitude.....	53
3.4.2.2 Curva do parâmetro razão de subida e descida .....	57
3.4.2.3 Curva do parâmetro velocidade .....	60
3.5 PROGRAMA FINAL .....	62
3.6 COMUNICAÇÃO COM SISTEMA SUPERVISÓRIO .....	64
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>67</b>
4.1 MONTAGEM FINAL OBTIDA .....	67
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA E ERRO OBTIDO .....	70
4.2.1 <i>Climb</i> .....	70
4.2.2 Altímetro.....	70
4.2.3 Velocímetro .....	72
4.2.5 Aplicações do projeto .....	73
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO A- PROJETO PAINEL DE ACRÍLICO.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO B- PROJETO DA ESTRUTURA DE SUPORTE DO PAINEL.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO C- DIAGRAMA ELÉTRICO.....</b>	<b>84</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de plataformas didáticas que facilitem o aprendizado é uma técnica empregada nas grandes entidades de ensino e treinamento de todo o mundo.

De acordo com JOLY (2002), o desenvolvimento de pesquisas associado à metodologias didáticas é utilizado para tornar o aprendizado mais interativo e informatizado. A atual conjuntura do mercado de trabalho mundial solicita profissionais altamente qualificados e capazes de absorver o máximo de conhecimento possível em pequenos intervalos de tempo, e isso é alcançado com treinamentos específicos. Esta dinâmica só é possível através do desenvolvimento de processos de treinamentos baseados em procedimentos e dispositivos tecnológicos que facilitem o aprendizado da técnica desejada.

Para a área de aviação o emprego de plataformas didáticas se torna vital para capacitar seu capital humano, visto que isso economiza tempo e dinheiro, pois após um rápido treinamento com aplicação de atividades conceituais e práticas, é possível empregar estes profissionais diretamente em seus processos.

O desenvolvimento de um painel anemométrico analógico-digital permite capacitar os futuros mecânicos de aviônicos da Aviação do Exército Brasileiro a compreender como é feito todo o processo de conversão de um sistema de concepção analógica para um sistema de concepção digital, permitindo introduzir e desenvolver conceitos vitais para o desempenho de suas funções, uma vez que as futuras aeronaves tem a maioria dos instrumentos com tecnologia digital.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e confeccionar um Painel Anemométrico Analógico-Digital da Aeronave AS550A2 FENNEC e para tanto, devem ser cumpridos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentação da arquitetura básica do sistema proposto;
- apresentação do estudo de embasamento teórico, bem como peculiaridades envolvidas;
- descrição do projeto dos diagramas e desenhos confeccionados;
- descrição dos procedimentos de execução do projeto; e
- apresentação de resultados, avaliação e compatibilidade.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O atual curso de especialização em mecânico de aviônicos da Aviação do Exército em Taubaté – SP é realizado através de um curso teórico e prático com duração aproximada de seis meses, o curso abordando desde os princípios da eletrotécnica e da eletrônica envolvidas na concepção da aeronave, até a resolução de panes recorrentes e a capacitação da interpretação de diagramas elétricos do manual do fabricante da aeronave.

A frota da Aviação do Exército passa por um processo de modernização, deixando de possuir concepção de sistemas de indicação analógicos, passando para digitais, sendo o estudo dos princípios de funcionamento dos novos sistemas primordial para a execução de tarefas de manutenção de aeronaves.

Desta forma, para facilitar o processo de aprendizado, visualizou-se a concepção de um painel de instrumentos anemométricos analógico-digital, onde fossem abordados todos as etapas que envolvem o processo de conversão destes sistemas. Sendo que o foco do projeto é a utilização da plataforma Arduino e seus periféricos no processo de conversão, funcionando de maneira análoga ao sistema empregado nas aeronaves, com um custo muito menor que o convencional, com uma grande vantagem no quesito custo-benefício.

## 1.3 DISCUSSÃO DO PROBLEMA

A situação do ensino técnico nacional remonta às necessidades atuais do mercado de aviação, por profissionais com rápido aprendizado e boa base teórica, para ampliar sua capacidade de compreensão de tecnologias e aprofundamento em determinadas áreas. O desenvolvimento de painéis didáticos é uma prática de algumas escolas de aviação, como exemplo tem-se a carreta de Aviônica do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), que é dotada de diversos equipamentos aeronáuticos para simulação de panes, utilizados para a formação do Técnico em Manutenção de Aeronaves - modalidade Aviônicos.

A concepção desses painéis confeccionados ainda não é utilizada em nenhum produto do mercado aeronáutico nacional, sendo este modelo uma proposta de um método de ensino comparativo entre o princípio de funcionamento de dois sistemas distintos utilizados comumente, dispendo de ferramentas que permitem a compreensão e a prática de conceitos fundamentais para o aprendizado.

## 1.4 SEQUÊNCIA DOS CAPÍTULOS

Na introdução deste trabalho é apresentada a dinâmica desenvolvida no processo de aprendizado utilizando meios tecnológicos. Sendo neste tópico demonstrado como o projeto desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado, explicitando os objetivos, a motivação e a discussão do problema.

O capítulo dois, “Revisão Bibliográfica”, apresenta a revisão de todos os conceitos e características de equipamentos utilizados para desenvolver o projeto, para permitir o melhor entendimento do leitor.

O capítulo três, “Metodologia”, apresenta todos os processos necessários à confecção do projeto, desde a confecção de diagramas elétricos e projetos de estrutura mecânica, até a obtenção de dados de calibração e curvas finais.

O capítulo quatro, “Resultados e Discussões”, apresenta uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos no projeto, bem como sua aplicabilidade e possibilidade de melhorias.

Por fim, o capítulo cinco, “Conclusões”, trás os comentários sobre o projeto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

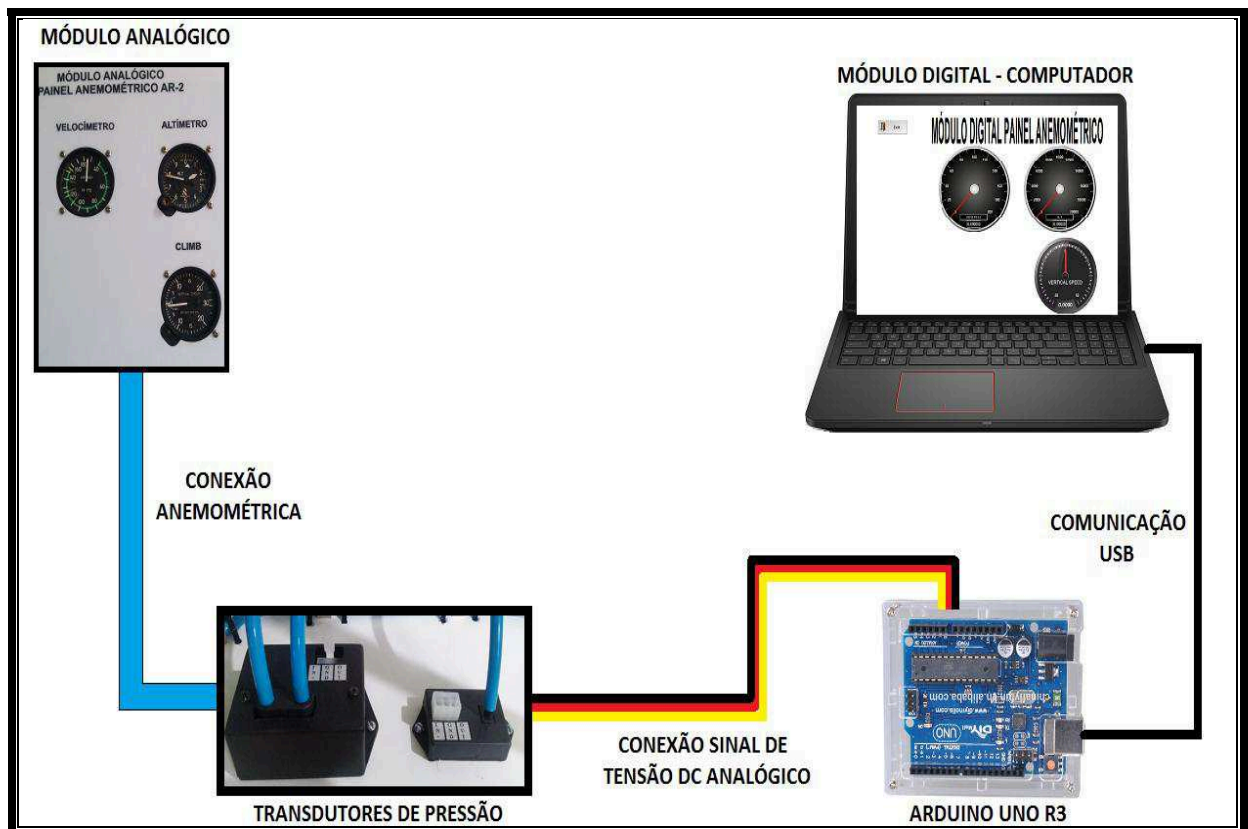
O projeto do painel anemométrico analógico-digital da aeronave AS550A2 FENNEC consiste de dois módulos distintos:

- Módulo Analógico: dotado dos instrumentos de indicação utilizados em uma aeronave convencional com concepção analógica, onde os indicadores são baseados em sistemas mecânicos de medição de pressão.

- Módulo Digital: sistema de indicação em um PC (*Personal Computer* – Computador Pessoal) dotado de um sistema supervisor, e a conversão de grandezas de analógica para digital realizada por um microcontrolador que recebe os sinais analógicos captados por dois transdutores de pressão.

A figura 1 apresenta a arquitetura básica do painel anemométrico desenvolvido.

Figura 1 – Arquitetura básica painel anemométrico analógico-digital.



Fonte: Autor.

Desta forma, para compreender o funcionamento dos módulos e como é executado o processo de conversão e exibição de grandezas, será executada uma revisão dos princípios de funcionamento de cada processo.

## 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE INDICAÇÃO ANEMOMÉTRICO ANALÓGICO

O sistema anemométrico de uma aeronave é o responsável por informar à tripulação os seguintes dados primordiais para o voo da mesma: velocidade, altitude e razão de subida/descida (FAA, 2012).

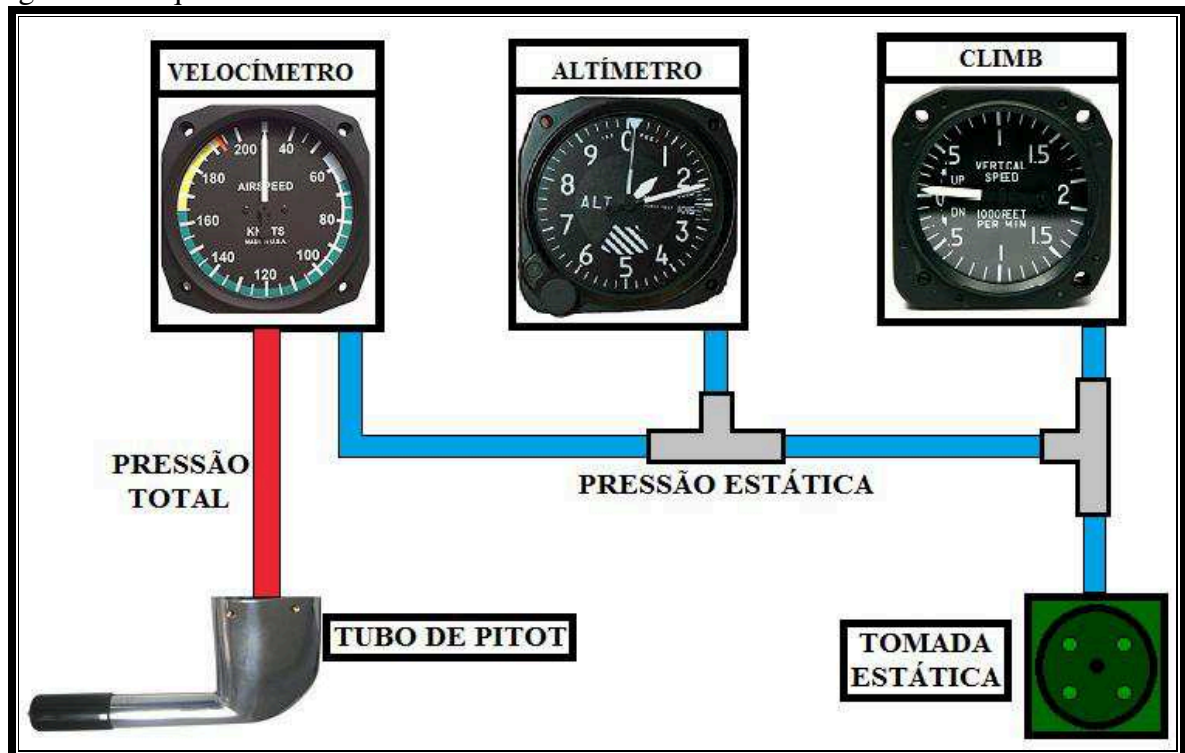
Um sistema anemométrico de concepção analógica possui basicamente os seguintes componentes:

- Velocímetro;
- altímetro;
- *climb* ou indicador de razão de subida/descida;
- tubo de pitot; e
- tomada estática.

Em um sistema anemométrico de uma aeronave os dados de voo de velocidade, altitude e razão de subida/descida são obtidos através dos parâmetros pressão total e pressão estática (FAA, 2012).

A arquitetura básica do sistema anemométrico pode ser visualizada na figura 2.

Figura 2 – Arquitetura básica de um sistema anemométrico.



Fonte: Autor.

Na figura 2 observa-se que o tubo de pitot é o elemento responsável por captar a pressão total do ar que vai alimentar o velocímetro, já a tomada estática é o elemento responsável por captar a pressão estática do ar que vai alimentar os três instrumentos de indicação velocímetro, altímetro e *climb* (FAA, 2012).

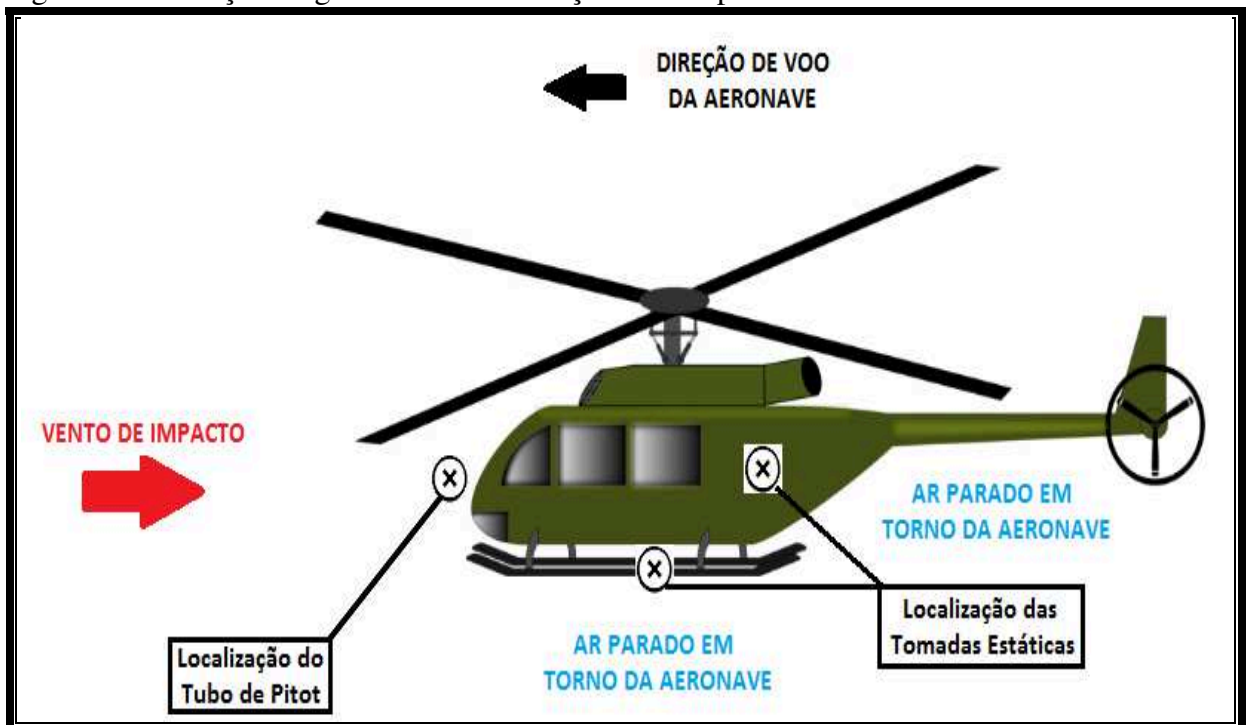
O velocímetro possui mecanismos internos que permitem a este calcular a diferença entre a pressão total e a pressão estática captada, resultando na Pressão Dinâmica Básica (QB).

A pressão dinâmica é a resultante do movimento do ar em um corpo, no caso o chamado de vento relativo. Desta forma, o tubo de pitot é localizado em um ponto que permita captar o vento de impacto da aeronave, sendo nos helicópteros geralmente encontrado no nariz da aeronave.

O outro parâmetro primordial para obtenção dos dados de voo é a Pressão Estática Básica (PB), que é o parâmetro resultante do ar parado a volta da aeronave, no caso a pressão atmosférica. Desta forma, a tomada estática de uma aeronave é encontrada geralmente na sua lateral ou em sua parte inferior.

A figura 3 apresenta a localização da tomada estática, do tubo de pitot na aeronave e obtenção das grandezas.

Figura 3 – Obtenção de grandezas e localização de componentes.



Fonte: Autor.

### 2.1.1 Altímetro

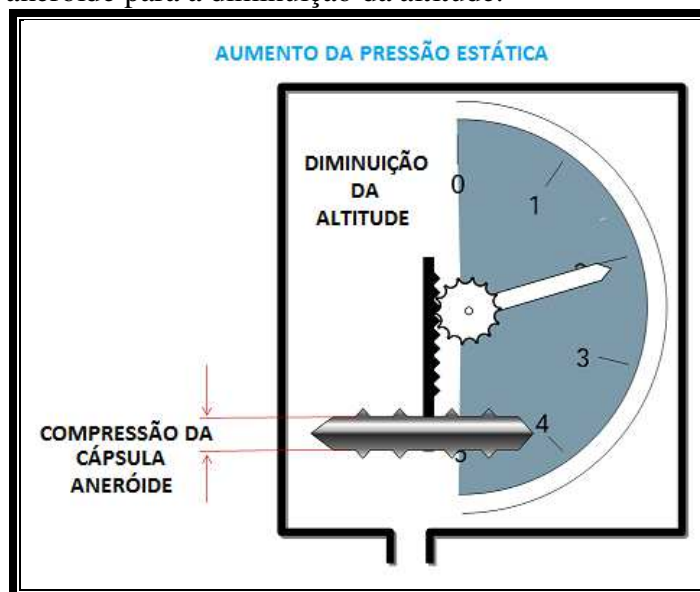
O altímetro é o instrumento usado para medir a altitude em que uma aeronave se encontra, geralmente em forma de um barômetro aneroide destinado a registrar alterações da pressão estática (atmosférica) que acompanham as variações de altitude.

O altímetro é um instrumento básico exigido para todas as aeronaves a serem certificadas, mede a pressão atmosférica e apresenta-a como altitude em ft (*feet* – pés). Sua concepção baseia-se em uma cápsula aneroide. Esta cápsula aneroide possui vácuo parcial em seu interior, para medida da pressão ambiente, e é instalada em uma câmara blindada dotada de uma tomada de pressão estática. Desta forma, ao variar a pressão estática sobre a cápsula aneroide esta também sofre variações, tais variações produzem um movimento de dilatação e contração da cápsula que é transmitido através de um mecanismo e convertido o valor da pressão estática para uma escala linear, representada em pés, indicando a altitude medida (ALTÍMETRO, 2015).

As figuras 4 e 5 demonstram o princípio de funcionamento da cápsula aneroide no interior do Altímetro, que funciona da seguinte forma:

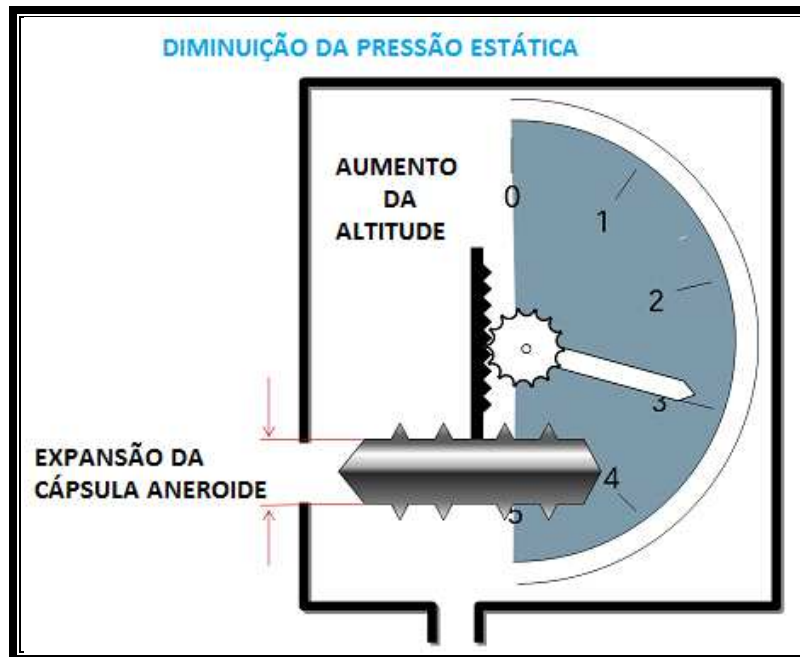
- No aumento da pressão estática ocorre a compressão da cápsula aneroide e por sua vez, a indicação de diminuição da altitude; e
- Na diminuição da pressão estática ocorre a expansão da cápsula aneroide e por sua vez, a indicação de aumento da altitude.

Figura 4 – Cápsula aneroide para a diminuição da altitude.



Fonte: (ALTÍMETRO, 2015).

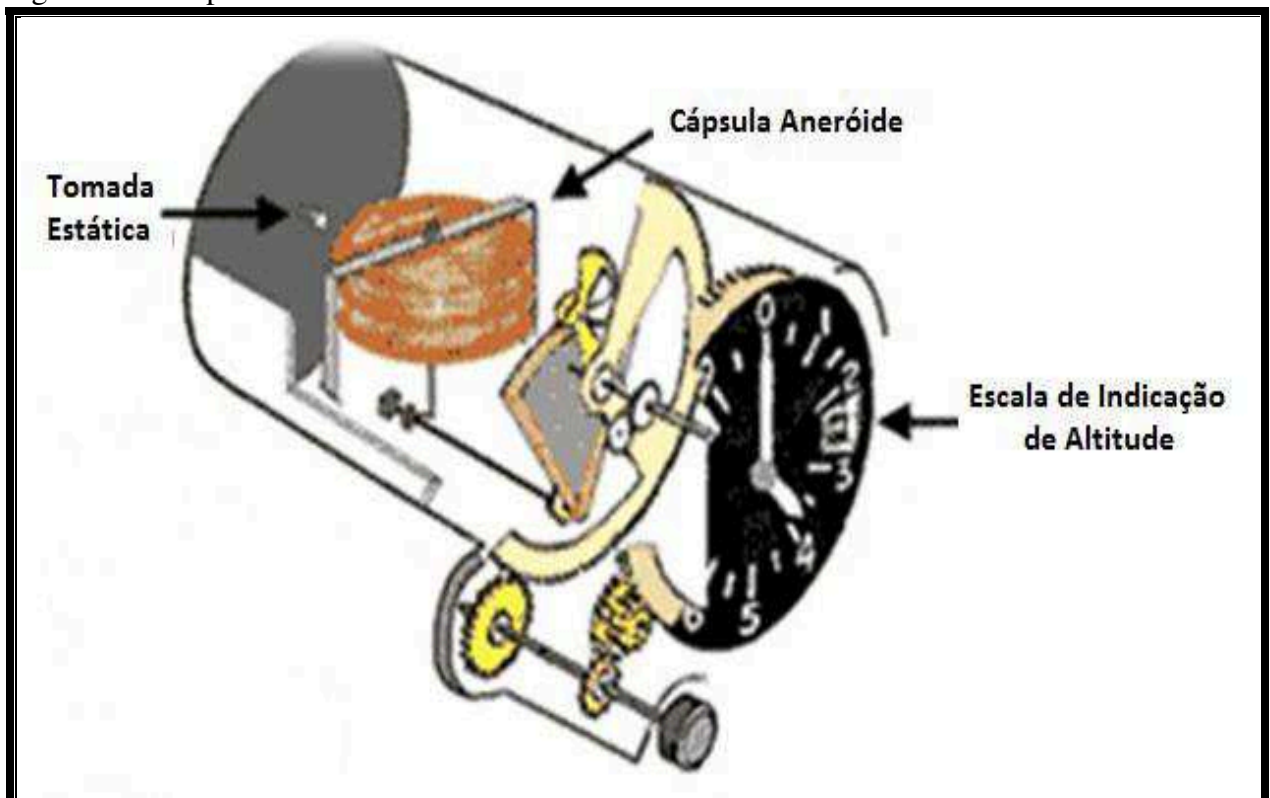
Figura 5 – Cápsula aneróide para o aumento da altitude.



Fonte: (ALTÍMETRO, 2015).

A figura 6 apresenta os componentes do indicador altímetro.

Figura 6 – Componentes do indicador altímetro.



Fonte: (HANGAR, 2010).



### 2.1.2 Climb

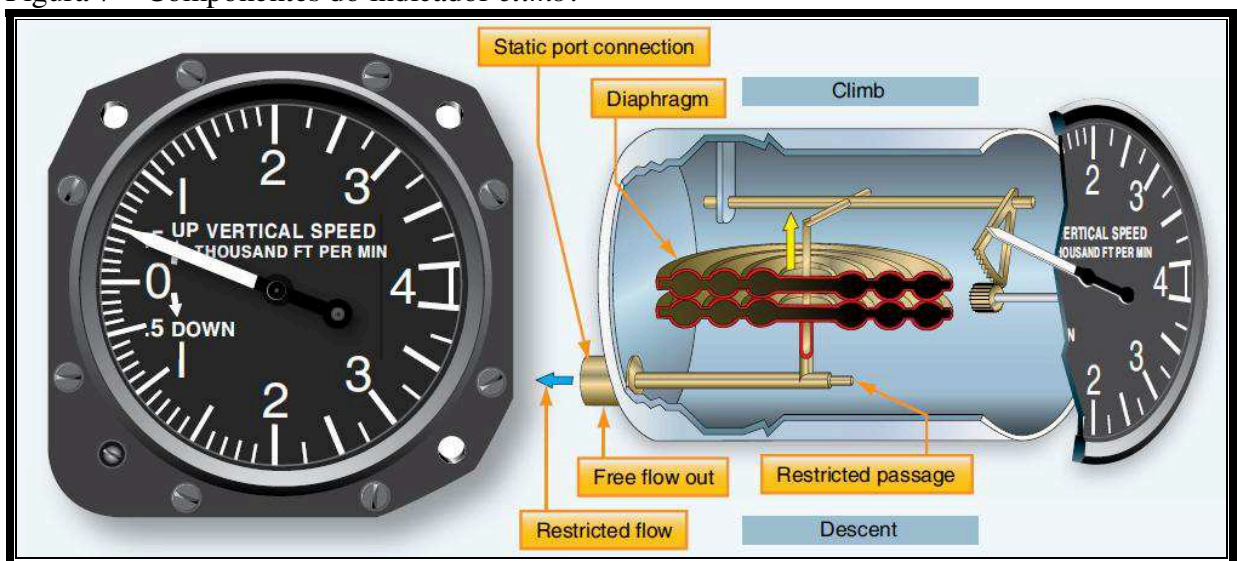
O *climb* também é conhecido como variômetro ou VSI (*Vertical Speed Indicator* – Indicador de Velocidade Vertical). Este é o instrumento responsável por informar ao piloto se a aeronave está subindo, descendo ou em voo nivelado. A taxa de subida ou descida é indicada em fpm (*feet per minute* - pés por minuto) e indicará zero em voo nivelado.

Embora este indicador opere exclusivamente com pressão estática, ele é um instrumento de pressão diferencial. Contém uma cápsula aneroide em conexão com os ponteiros do indicador, esta cápsula aneroide tem seu interior ligado diretamente ao sistema que capta a pressão estática externa a aeronave, já sua área externa encontra-se dentro da caixa do instrumento, que é hermeticamente selado e possui apenas um orifício restritor de fluxo calibrado (FAA, 2012).

Assim, quando a aeronave está ganhando ou perdendo altitude, a pressão existente no interior da cápsula aneroide é retardada com relação à pressão na parte exterior da mesma. O retardo é causado pelo orifício restritor de fluxo calibrado, que limita a mudança brusca da pressão no interior da cápsula aneroide. A diferença resultante de pressão faz com que a cápsula se contraia em uma ascensão e se dilate quando a aeronave esta perdendo altitude. Através de um eixo de atuação os movimentos da cápsula são transmitidos ao ponteiro (FAA, 2012).

A figura 7 apresenta os componentes do indicador *climb*.

Figura 7 – Componentes do indicador *climb*.



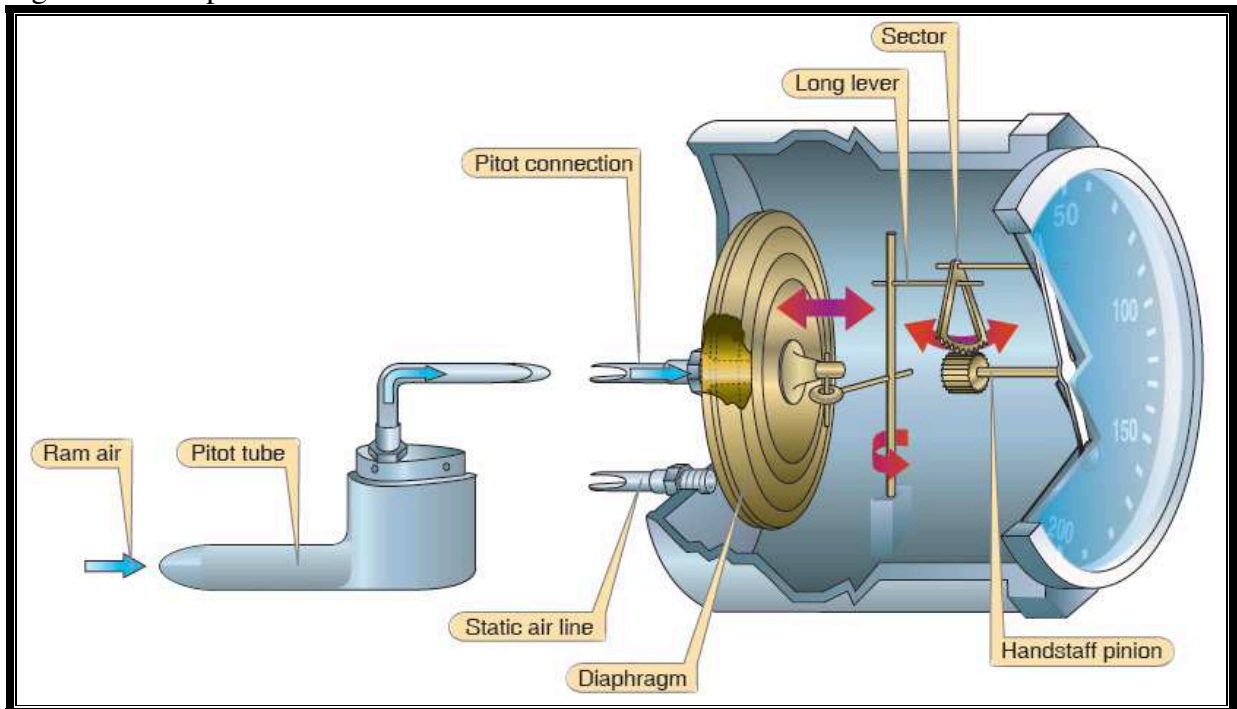
Fonte: (FAA, 2012).

### 2.1.3 Velocímetro

O velocímetro também é chamado de *airspeed* é um instrumento que mede a velocidade da aeronave em relação ao ar, sendo baseado em um diafragma de medição de pressão dinâmica ou diferencial, que recebe pressão total em seu interior e pressão estática no exterior. Desta forma, as pressões estáticas do interior e do exterior se anulam, e a pressão dinâmica faz a cápsula expandir-se, movimentando a agulha no mostrador através de um mecanismo (FAA, 2012). Este instrumento pode ser graduado em kt (*knots* - nós), km/h (quilômetros por hora) ou mph (milhas por hora).

A figura 8 apresenta os componentes do indicador de velocidade.

Figura 8 – Componentes do indicador de velocidade ou velocímetro.



Fonte: (FAA, 2012).

## 2.2 TRANSDUTORES DE PRESSÃO

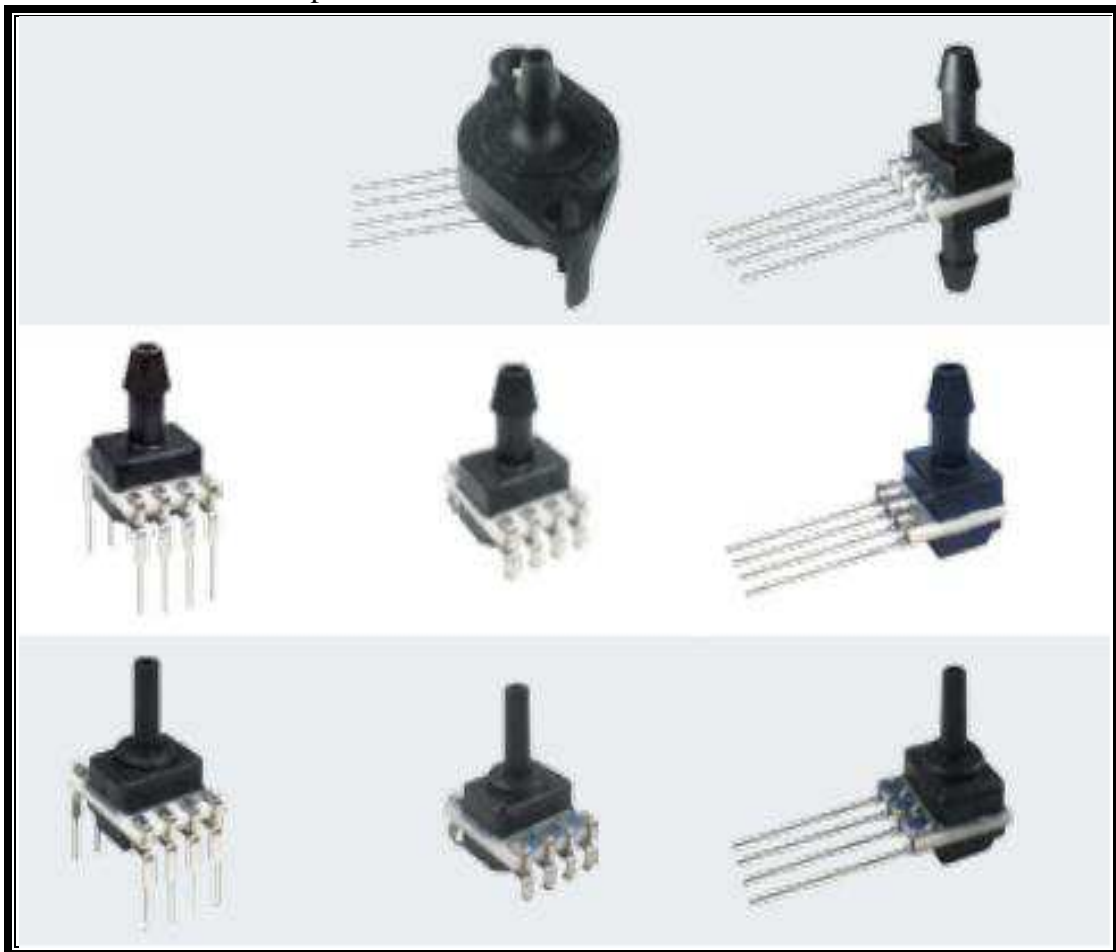
Os transdutores de pressão são elementos responsáveis por captar os parâmetros  $Q_B$  e  $P_B$ , e convertê-los em níveis de tensão analógica ( $V_{DC}$ ).

O transdutor  $P_B$  funciona de maneira análoga ao indicador altímetro e o *climb*, sendo alimentado pela pressão proveniente do ar parado ao redor da aeronave, oferecendo uma saída de tensão analógica proporcional a variação da pressão que o alimenta.

No projeto foi utilizado um transdutor pressão estática piezoresistivo de silício, que em seu interior possui uma célula de medição que consiste de uma pastilha com um pequeno diafragma de silício acoplado, no qual caminhos resistivos são formados pela implantação iônica para transferir o nível exato da força para uma ponte de wheatstone de silício. Quando a pressão é aplicada, a deflexão do diafragma leva a mudanças nas resistências implantadas de acordo com o efeito piezoresistivo. A espessura do diafragma, a área da superfície e o desenho geométrico dos resistores determinam a faixa de pressão que pode ser medida. Efeitos mecânicos do suporte nas células de medição podem largamente ser evitados pelos aspectos estruturais (HOFFMANN, 2016).

A figura 9 apresenta alguns exemplos de transdutores de pressão estática comercializados.

Figura 9 – Transdutores de pressão estática comerciais.



Fonte: (HONEYWELL, 2014).

O transdutor de pressão de PB utilizado é fabricado pela empresa HONEYWELL e tem as especificações discriminadas na tabela 1.

Tabela 1 – Transdutor de PB

PARÂMETRO	VALOR / ESPECIFICAÇÃO
Nomenclatura	SSCDANN030PAA5
Faixa de medição	0 a 30 psi
Alimentação	-0,3 a 6 V <sub>DC</sub>
Consumo de corrente	2,5 mA
Temperatura de operação	- 20 a 105 °C
Erro total de faixa	2 % FSS
Resolução máxima de saída	12 bits

Fonte: (HONEYWELL, 2014).

O transdutor de QB funciona de maneira análoga ao indicador velocímetro da aeronave, sendo alimentado pela pressão proveniente do ar de impacto da aeronave e pela pressão proveniente do ar parado ao redor da aeronave, oferecendo uma saída de tensão analógica proporcional a diferença entre estas duas pressões que o alimenta.

No projeto foi utilizado um transdutor de pressão diferencial piezoresistivo de silício, que em seu interior possui um diafragma de silicone acoplado, cujo interior recebe pressão total e o exterior recebe pressão estática, a deflexão do diafragma causa mudanças das resistências decorrentes do efeito piezoresistivo. Desta forma, os caminhos resistivos são formados pela implantação iônica para transferir o nível exato da força para uma ponte de wheatstone de silício, que é equipada de um circuito integrado amplificador operacional responsável por elevar o nível de tensão obtido, de forma a compatibilizar este nível com o sistema de aquisição de dados utilizado (HOFFMANN, 2016).

A figura 10 apresenta alguns exemplos de transdutores de pressão dinâmica comercializados.

O transdutor de QB utilizado é fabricado pela empresa HONEYWELL, tem as especificações discriminadas na tabela 2 e é apresentado também na figura 10, em evidência.

Tabela 2 – Transdutor de QB

PARÂMETRO	VALOR / ESPECIFICAÇÃO
Nomenclatura	162PC01D
Faixa de medição	0 a 1 psi (diferencial)
Pressão máxima suportada	5 psi
Alimentação	5 a 8 V <sub>DC</sub>
Consumo de corrente	8 a 20 mA
Temperatura de operação	- 40 a 85 °C
Erro total de faixa	0,15 % FSS

Fonte: (HONEYWELL, 2012).

Figura 10 – Transdutores de pressão dinâmica comerciais.



Fonte: (HONEYWELL, 2012).

### 2.3 CONVERSÃO DE DADOS ANALÓGICOS PARA DIGITAIS

O processo de conversão de dados de analógico para digital é o ponto primordial deste trabalho, pois somente garantindo a eficácia desta conversão é possível obter resultados satisfatórios de modo análogo ao sistema utilizado na aeronave AS550A2 FENNEC. Para tanto serão introduzidos alguns conceitos a serem utilizados nas demais etapas de projeto e confecção dos módulos do painel anemométrico.

Para compreender o processo de conversão de sinais primeiramente serão definidos os seguintes conceitos (GOUVEIA, 2009):

- Sinal analógico: é aquele cuja amplitude pode assumir qualquer valor pertencente a um intervalo contínuo de valores, ou seja, varia continuamente no tempo.

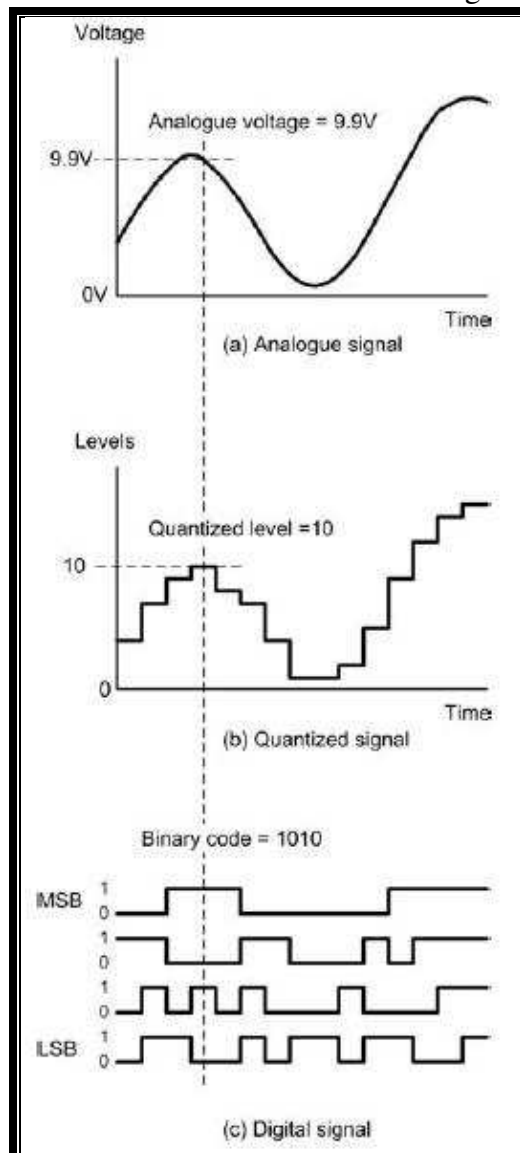
- Sinal digital: é aquele sinal que se caracteriza por apresentar amplitudes dentro de um conjunto de valores finito que varia de forma discreta com o tempo.

Para converter um sinal analógico em digital são necessárias no mínimo 3 etapas:

- 1- Amostragem
- 2- Quantização
- 3- Codificação

Pode-se visualizar as etapas do processo de conversão de sinal analógico para digital na figura 11.

Figura 11 – Etapas do processo de conversão de sinal de analógico para digital.



Fonte: (TOOLEY, 2007).

### 2.3.1 Etapa de amostragem

Um sinal contínuo no tempo possui uma infinidade de valores, mas como os meios de comunicação possuem banda limitada, faz-se necessário transmitir uma certa quantidade de amostras deste sinal. É evidente que quanto maior a frequência de amostragem, mais fácil é reproduzir o sinal, mas haverá desperdício de banda ocupada sem nenhuma melhoria na qualidade (GOUVEIA, 2009).

Para tanto, para obter a qualidade esperada dos dados sem desperdício de banda deve-se seguir o Teorema de Nyquist, que diz que para recuperar um sinal com qualidade deve-se adotar uma frequência de amostragem de no mínimo duas vezes a frequência máxima do sinal amostrado, conforme expresso na equação 1:

$$f_a \geq 2 \cdot f_s \quad (1)$$

Sendo,

$f_a$  = frequência de amostragem; e

$f_s$  = maior frequência do sinal amostrado.

### 2.3.2 Etapa de quantização

A partir das amostras obtidas pelo processo de amostragem, pode-se quantificar as amplitudes, que pertencem a um intervalo contínuo de valores, em um conjunto finito de valores possíveis, chamados níveis de quantização. Cada amplitude é alocada ao nível de quantização mais próxima, ou seja, ao nível que leve ao menor erro absoluto.

O conjunto de níveis possíveis é definido pelo número de bits que são usados na codificação. Desta forma, uma placa de Arduino UNO R3, que possui um conversor analógico-digital (A/D) de 10 bits de resolução, o sinal quantizado por ele possuirá 1024 níveis (GOUVEIA, 2009).

Desta forma, o sinal analógico torna-se um sinal de PAM (*Pulse Amplitude Modulation* – Modulação por Amplitude de Pulsos), através da etapa de amostragem, e estas amostras são quantificadas em uma quantidade finita de bits através do processo de quantização.

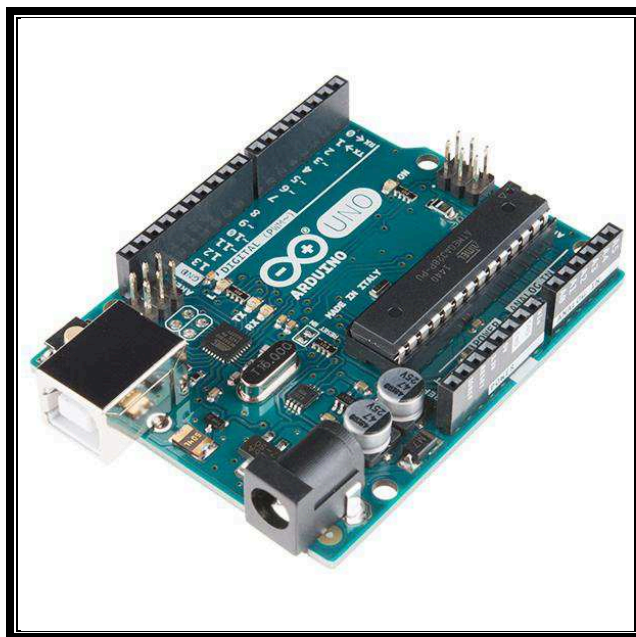
### 2.3.3 Etapa de codificação

Os valores quantizados precisam ser codificados em sequências de bits, pois um sinal digital binário só pode ter dois valores diferentes 0 ou 1. Desta forma os valores quantificados em níveis são transformados em um código que pode ser transmitido e tratado mais facilmente, esse código é chamado PCM (*Pulse Code Modulation* – Modulação por Código de Pulsos) (TOOLEY, 2007).

## 2.4 MICROCONTROLADOR ARDUINO

O microcontrolador Arduino é uma plataforma desenvolvida de modo a fazer com que os computadores possam controlar os objetos físicos. É uma plataforma física de computação *open-source* (código aberto) baseada em uma simples placa microcontroladora e um ambiente de programação para ligar o software produzido à placa. Possui um microcontrolador ATMEL AVR sendo seu modelo variável de acordo com a placa utilizada, com suporte de I/O (*Input/Output*– Entrada /Saída) embutido, uma linguagem de programação padrão, a qual tem origem em *Wiring*, e é essencialmente C/C++. O objetivo do projeto é criar ferramentas acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de usar até mesmo por amadores na área de eletrônica (MCROBERTS, 2011). A figura 12 apresenta uma placa Arduino versão UNO R3.

Figura 12 – Arduino UNO R3.



Fonte: (ARDUINO, 2017).



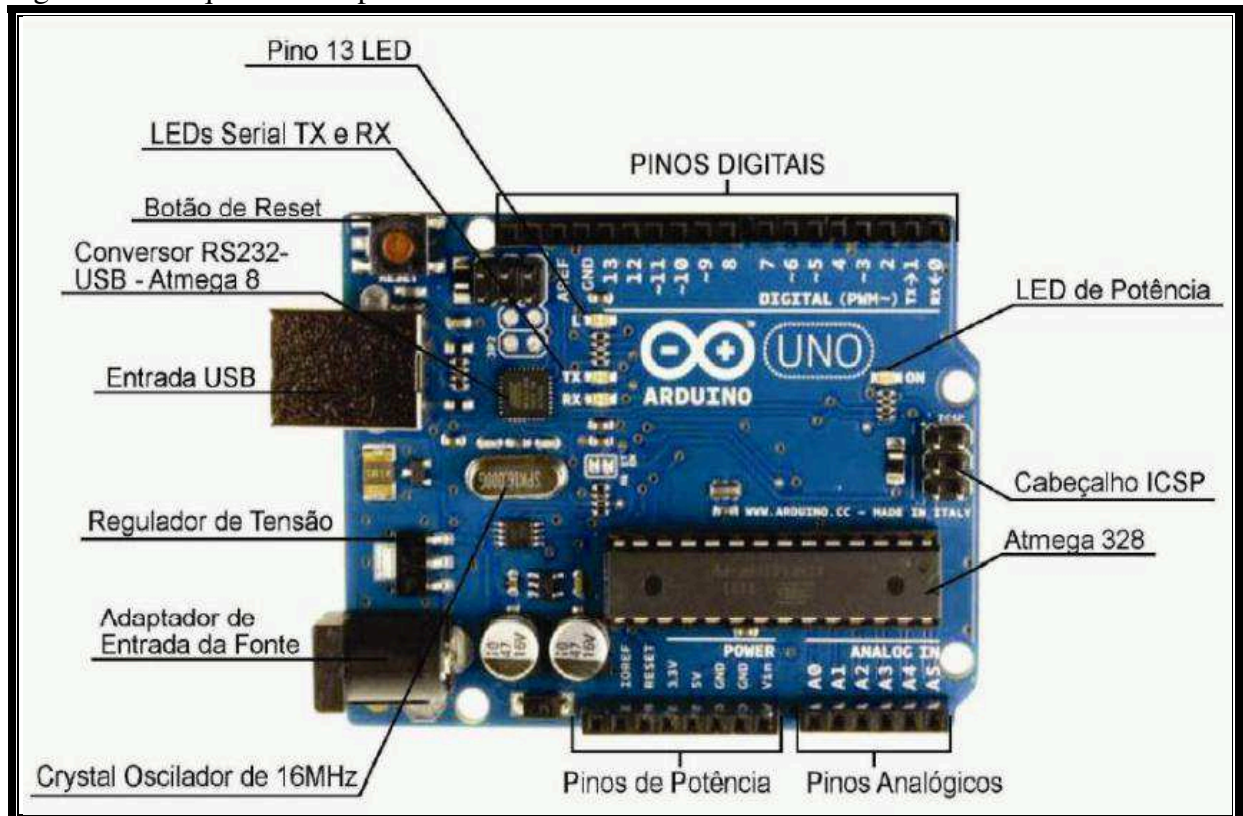
A plataforma Arduino é utilizada para desenvolver projetos interativos, realizar a aquisição e transmissão de dados, comandar dispositivos elétricos e eletrônicos através de seus periféricos de forma fácil e programável (ARNIZAUT, 2014).

#### 2.4.1 Arduino UNO

A placa escolhida para utilização no projeto foi a Arduino UNO R3, que trabalha com um microcontrolador ATMEGA 328 e possui as mesmas características que sua predecessora, o Arduino Duemilanove. A grande diferença para as versões anteriores é que, ao invés de usar um FTDI (*Future Technology Devices International* – Dispositivos Internacionais de Tecnologia do Futuro) para conversão RS (*Recommended Standard* – Padrão Recomendado) 232 - USB (*Universal Serial Bus* - Barramento Serial Universal), ela utiliza o ATMEGA8, programado para a conversão USB-serial. Com essa nova implementação, o arquivo de carregamento do sistema diminuiu de tamanho, economizou memória flash no ATMEGA328 e, dessa forma, contribuiu para a aceleração do processo.

A figura 13 apresenta a arquitetura da placa Arduino UNO R3.

Figura 13 – Arquitetura da placa Arduino UNO R3.



Fonte: (ARNIZAUT, 2014).

O ATMEGA328 é um microcontrolador que possui 32 kbytes de memória Flash de programação. É um microcontrolador que opera com uma tensão de 5 V. UNO significa “um” em italiano e é nomeado para marcar o lançamento do Arduino 1.0. O Arduino UNO (ou 1.0) será, a partir de então, a versão de referência (mais básica) do Arduino. É importante ressaltar que o Arduino UNO já passou por algumas revisões, encontrando-se hoje em sua terceira revisão.

Conforme a figura 13 pode-se visualizar os componentes da placa Arduino UNO R3, sendo a função de cada componente descrita abaixo:

**Portas 0 e 1** - São pinos I/O de comunicação serial com a placa.

**Portas 2 a 13** – São Portas I/O digitais onde sua saída será somente 0 V ou 5 V dependendo do código. As portas que possuem um til (~) do lado (portas 3, 5, 6, 9, 10 e 11) são as 6 portas onde estão disponíveis os canais PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulsos) da placa.

**Portas Analog In (A0 a A5)** - São as 6 portas analógica disponíveis na placa. São portas que possuem a conversão A/D de 10 bits de resolução, sendo assim possuem até 1024 níveis de tensão diferentes (vai de 0 a 1023).

**Portas de Potência** – Possuem pinos de alimentação externa de 5 V e 3,3 V, pinos GND (Ground – Terra) e um pino de reset externo.

**Adaptador de entrada para Fonte** - É uma entrada *Jack* para uma fonte de alimentação externa que não seja o USB. Apesar da placa funcionar com alimentação de 5 V, devido ao regulador de tensão existente na placa, a faixa de tensão de alimentação considerada ideal é de 7,5 V a 10 V, sendo a tensão máxima suportada de 15 V.

**Entrada USB** – É a entrada utilizada para a comunicação e carregamento do programa no microcontrolador do Arduino. Serve também como alimentação da placa já que o USB do computador fornece uma tensão de 5 V estável (ARNIZAUT, 2014).

#### 2.4.2 Interface de programação Arduino UNO

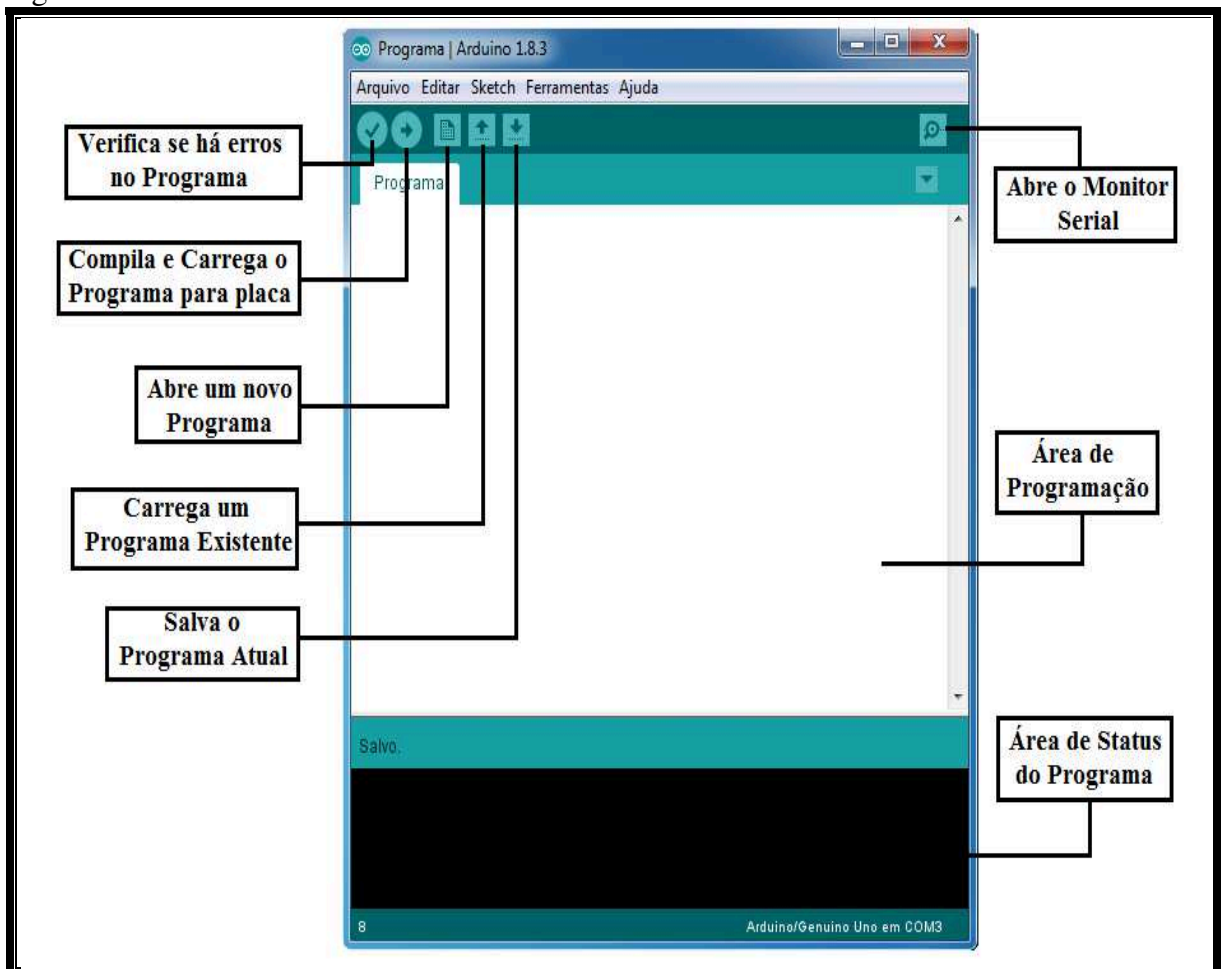
A interface de programação do microcontrolador é realizada através do software Arduino IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente Integrado de Desenvolvimento), desenvolvido para ser o mais simples e compreensível possível, facilitando assim a programação por qualquer um que deseje utilizar placas Arduino e seus periféricos. Esse software serve para qualquer uma das placas Arduino e até mesmo para placas similares.

A IDE do Arduino é uma plataforma multitarefa escrita em JAVA e baseada no projeto *Wiring*, que é uma plataforma de prototipagem que incluía tanto uma fácil interface como uma placa de circuito pronta para uso. A IDE foi criada para pessoas não familiarizadas com programação, de maneira a ser o mais intuitiva possível, permitindo desenvolver programas para as placas, salvar esses programas, compilá-los, modificá-los e verificar se os mesmos estão corretos. Além desses recursos, é através dela que se carrega o *bootloader* (inicializador) em um novo chip microcontrolador. O *bootloader* é um pequeno programa carregado no microcontrolador da placa que permite rodar os códigos Arduino sem nenhum hardware externo (ARNIZAUT, 2014).

A plataforma Arduino possui um monitor serial que, dependendo do programa carregado apresenta a interação entre a placa e o computador, permitindo ainda interagir com o programa enquanto o mesmo está rodando na placa.

A figura 14 apresenta a tela inicial do Arduino IDE com suas funções destacadas.

Figura 14 – IDE Arduino.

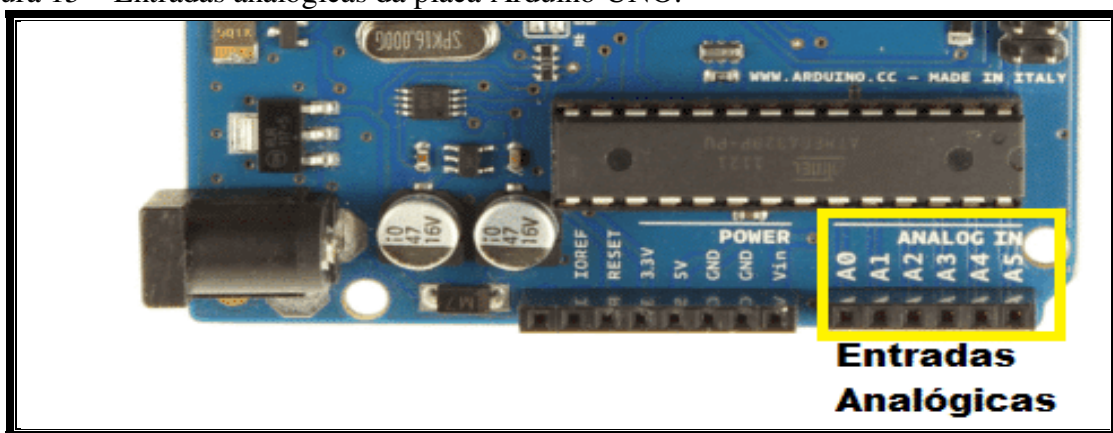


Fonte: Autor.

### 2.4.3 Aquisição de dados analógicos com Arduino UNO

A placa Arduino UNO possui 6 entradas analógicas, de A0 a A5, conforme exposto no item 2.4.1 e visualizadas na figura 15. Estas entradas permitem a aquisição de valores analógicos de tensão, ou seja, permite monitorar parâmetros que variam continuamente em relação ao tempo e podem assumir infinitos valores dentro de uma faixa, como exemplo temperatura e pressão (PUHLMANN, 2015).

Figura 15 – Entradas analógicas da placa Arduino UNO.



Fonte: (PUHLMANN, 2015).

O microcontrolador ATMEGA328 trabalha internamente com dados digitais, portanto é necessário traduzir um sinal analógico para um valor digital. A técnica utilizada para leitura de um sinal analógico pelo Arduino é a conversão analógica-digital. Essa técnica consiste em quantificar o valor analógico coletado, transformando em um valor correspondente digital. Este processo é feito pelo conversor A/D.

O conversor A/D quantifica a quantidade de bits de sua resolução, sendo esta resolução encontrada através da equação 2:

$$Resolução = \frac{V_{REF}}{2^N} \quad (2)$$

Sendo,

$V_{REF}$  = tensão de referência do conversor A/D; e

N = número de bits do conversor.

O conversor A/D do microcontrolador ATMEGA328 possui 10 bits de resolução, sendo encontrada a sua resolução através da equação 2:

$$Resolução = \frac{5}{2^{10}} = \frac{5}{1024}$$

$$Resolução = 4,88 \text{ mV}$$

Conforme o cálculo obtido na equação 2 observa-se que o degrau de conversão do conversor A/D será de 4,88 mV, para a placa Arduino UNO que possui 10 bits de resolução e considerando a alimentação igual a 5 V.

Para análise se os dados adquiridos pelo microcontrolador Arduino UNO atendem as necessidades do sistema utilizado, além da resolução deve-se considerar também a taxa de amostragem obtida através deste, na aquisição valores analógicos.

A taxa de amostragem está diretamente relacionada com a velocidade da conversão executada pelo conversor A/D. Desta forma, para alterar a taxa de amostragem do microcontrolador deve-se alterar velocidade de conversão do conversor A/D.

O valor da velocidade de conversão do conversor A/D é configurada internamente através de bibliotecas. Desta forma não é necessário configurar os registradores internos do ATMEGA328 antes da leitura de um sinal analógico, porém em aplicações que necessitam de uma otimização da leitura é necessário entender o funcionamento do conversor A/D do microcontrolador e a correta configuração dos seus registradores que atenda as necessidades do projeto (SOUZA, 2014).

O conversor A/D pode funcionar de duas maneiras:

- conversão simples: neste modo é necessária a inicialização de cada conversão a ser efetuada; e
- conversão contínua: neste modo, será dado o comando para iniciar a primeira conversão e o conversor iniciará automaticamente as próximas conversões, logo após completada a anterior.

A velocidade de conversão é ajustada pelo *clock* do conversor A/D, e o recomendado para o ATMEGA328 é de 50 kHz a 200 kHz para uma resolução de 10 bits. O bloco *prescaler* do microcontrolador controla o *clock* do conversor, assim o seu *clock* será uma fração do *clock* do oscilador principal, conforme o fator do *prescaler* (SOUZA, 2014).

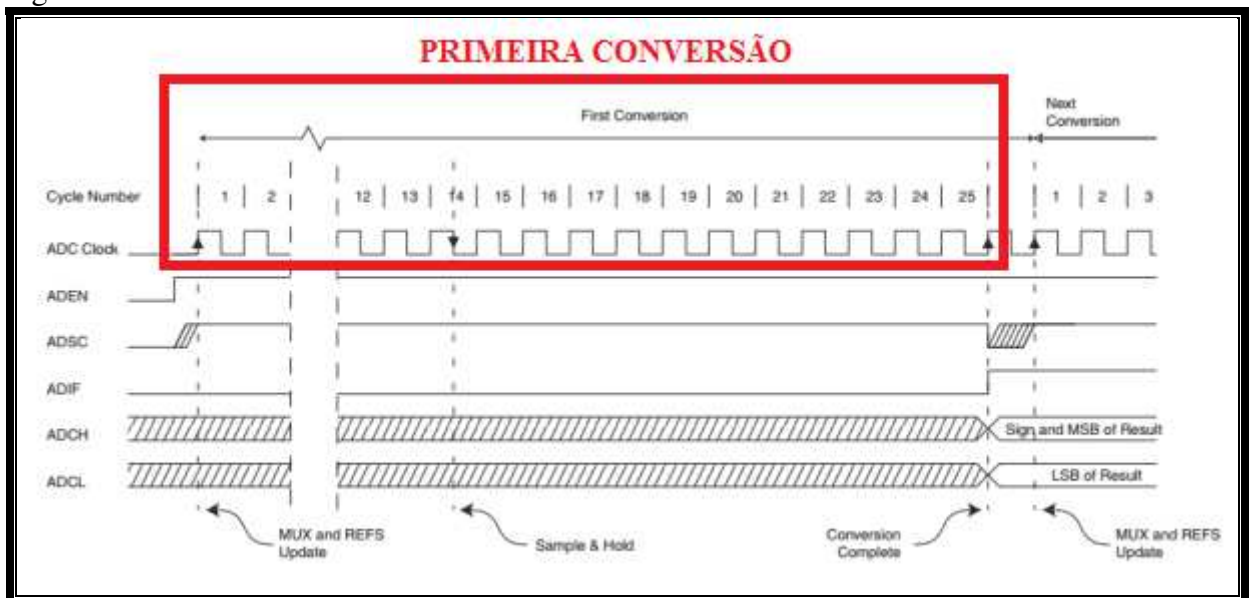
O fator *prescaler* do microcontrolador pode assumir os seguintes valores: 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128. Sendo que a placa do Arduino UNO roda com um cristal de 16 MHz, o *clock* do conversor A/D pode assumir os seguintes valores:

- $16 \text{ MHz} / 2 = 8 \text{ MHz}$
- $16 \text{ MHz} / 4 = 4 \text{ MHz}$
- $16 \text{ MHz} / 8 = 2 \text{ MHz}$
- $16 \text{ MHz} / 16 = 1 \text{ MHz}$
- $16 \text{ MHz} / 32 = 500 \text{ kHz}$
- $16 \text{ MHz} / 64 = 250 \text{ kHz}$
- $16 \text{ MHz} / 128 = 125 \text{ kHz}$

Como mencionado anteriormente o *clock* do conversor A/D deve estar entre 50 kHz e 200 kHz para garantir a precisão de 10 bits na resolução. Assim, observando os valores anteriores só se pode usar o *prescaler* de 128, caso seja necessário uma aplicação muito específica deve-se trocar o cristal da placa do Arduino (SOUZA, 2014).

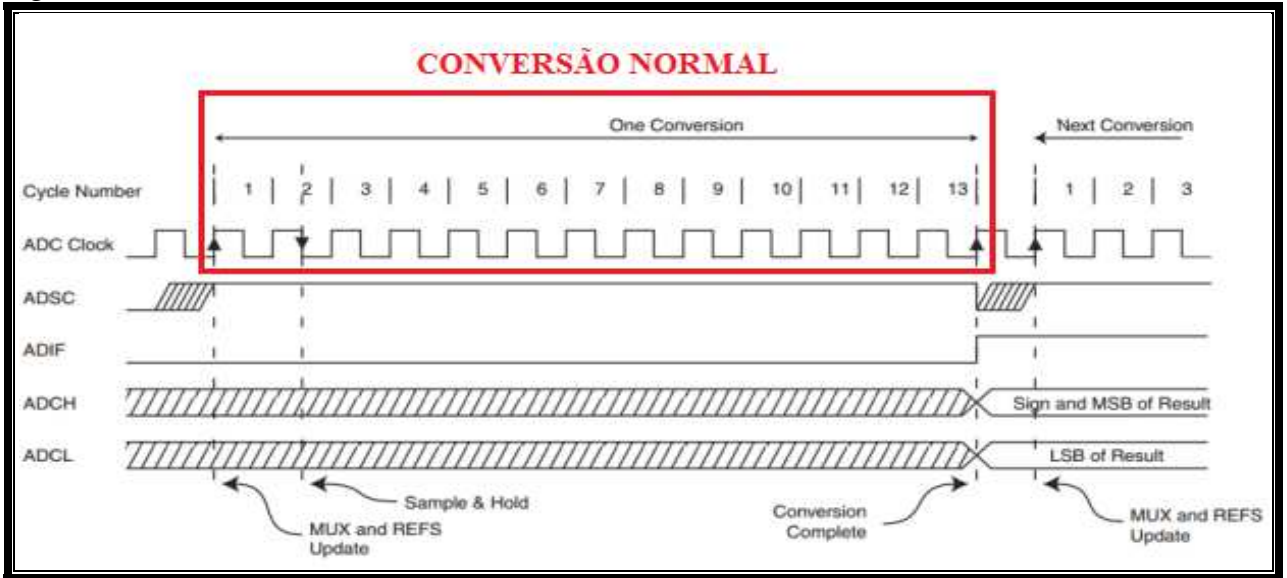
A primeira conversão necessita de 25 pulsos de *clock*, conforme exibido na figura 16. Uma conversão normal necessita de 13 pulsos de *clock* no conversor A/D, conforme a figura 17. Desta forma, o valor da amostragem do conversor A/D depende dos pulsos de *clock* de cada conversão, ou seja, o valor do *clock* deve ser dividido por 13 para determinar a taxa de amostragem da placa.

Figura 16 – Primeira conversão.



Fonte: (SOUZA, 2014).

Figura 17 – Conversão normal.



Fonte: (SOUZA, 2014).

Assim, para determinar a taxa de amostragem do Arduino UNO divide-se a taxa de conversão do *clock* do conversor A/D de 125 kHz por 13, sendo a taxa de amostragem obtida de 9615,384615 Hz.

## 2.5 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para exibição dos parâmetros captados e tratados pelo microcontrolador faz-se necessária à utilização de um sistema supervisório. Os sistemas supervisórios são ferramentas de software que, através da interação com os dispositivos de hardware presentes em plantas industriais, possibilitam o gerenciamento de processos em tempo real, ou através de dados históricos. O software supervisório utilizado neste projeto foi o Indusoft (SANTOS e MASSELLI, 2014).

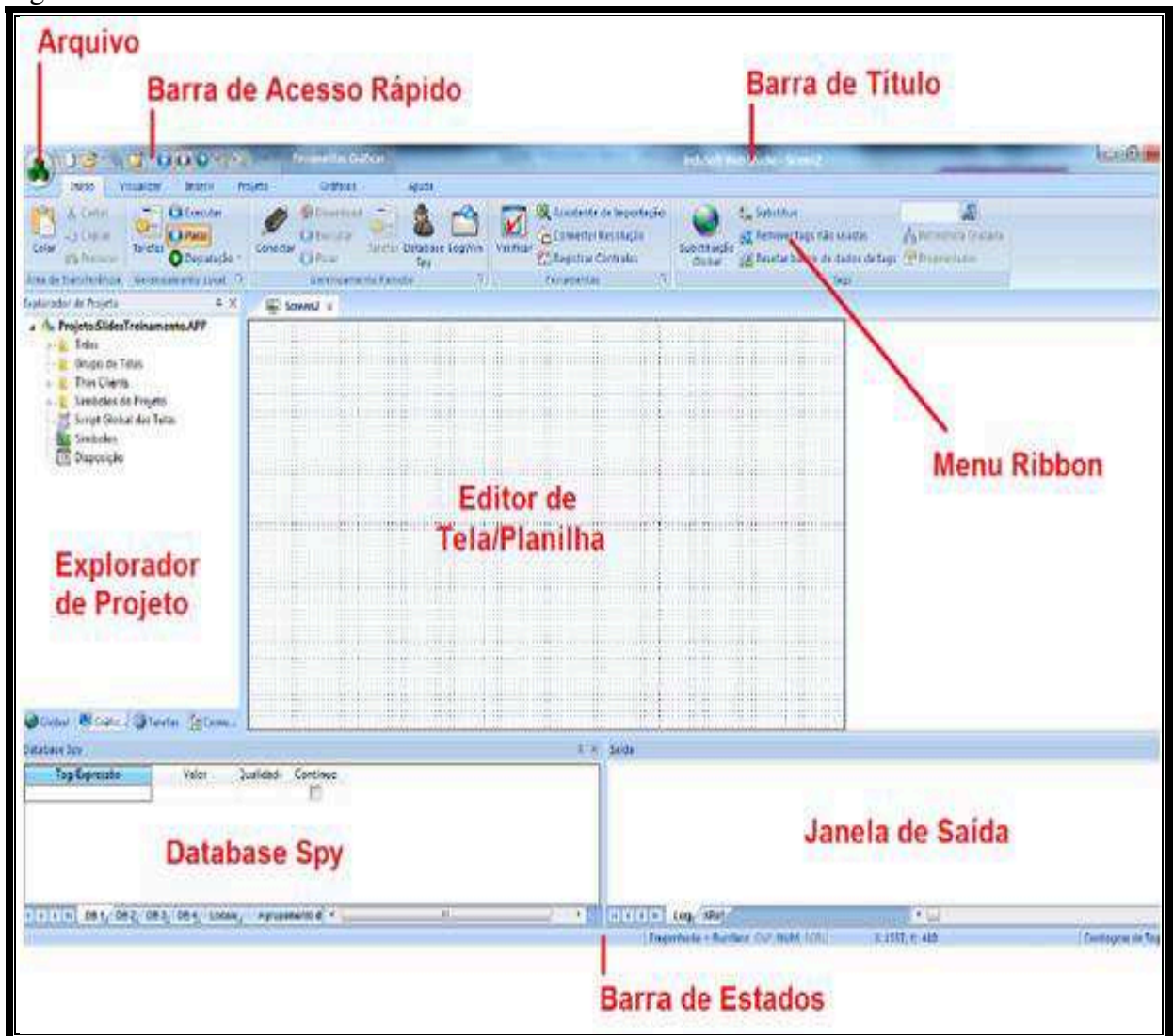
O IWS (*Indusoft Web Studio* – Plataforma de Rede Indusoft) é uma ferramenta que explora as funcionalidades dos sistemas operacionais Microsoft e permite construir aplicações completas SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados) ou IHM (Interface Homem Máquina) para a indústria da automação.

Os projetos Indusoft são executados em microcomputadores conectados em tempo real com máquinas ou processadores através de controladores programáveis, equipamentos de I/O remotos, e outros equipamentos de aquisição de dados. Estes projetos consistem de telas com interfaces animadas de operação, *drivers* configuráveis de Controlador Lógico Programável e

outros dispositivos controláveis de I/O, um banco de dados de *tags* do projeto e módulos opcionais como monitores de alarme, lógica e indicadores de parâmetros (INDUSOFT, 2017).

A interface do software apresentada na figura 18 é baseada na faixa de opções do Windows para fornecer um integrado e amigável ambiente de desenvolvimento.

Figura 18 – Ambiente de desenvolvimento do IWS.



Fonte: (INDUSOFT, 2017).

O microcontrolador Arduino é capaz de estabelecer comunicação serial UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter* – Transmissor e Receptor Assíncrono Universal), e comunicação com computadores através de porta USB, possui um *driver* que possibilita o gerenciamento da comunicação entre o sistema supervisório e os controladores em campo através do protocolo de comunicação, que neste projeto será utilizado o protocolo MODBUS RTU.



O protocolo MODBUS é uma estrutura de mensagem aberta desenvolvida pela Modicon na década de 70, utilizada para comunicação entre dispositivos *Master/Slave* (Mestre/Escravo). A Modicon foi posteriormente adquirida pela Schneider e os direitos sobre o protocolo foram liberados pela organização MODBUS (FREITAS, 2014). Muitos equipamentos industriais utilizam o MODBUS como protocolo de comunicação, e graças às suas características, este protocolo também tem sido utilizado em uma vasta gama de aplicações como:

- Instrumentos e equipamentos de laboratório;
- automação residencial e
- automação de veículos.

O MODBUS pode ser utilizado em diversos padrões de meio físico, como:

- USB;
- RS-232; e
- RS-485.

Na especificação do protocolo estão definidos dois modos de transmissão ASCII (*American Standard Code for Information – Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação*) e RTU (*Remote Terminal Unit – Unidade de Terminal Remoto*).

No modo RTU cada mensagem de 8 bits contém caracteres hexadecimais de 4 bits. A principal vantagem desse modo é que sua maior densidade de caracteres permite um melhor processamento de dados do que o modo ASCII para o mesmo *baudrate* (velocidade de comunicação). Cada mensagem deve ser transmitida em um fluxo contínuo de caracteres, conforme a figura 19.

Figura 19 – Fluxo de caracteres.

<b>Address (endereço)</b>	<b>Function (Função)</b>	<b>Data (Dados)</b>	<b>CRC - Cyclic Redundancy Check (Verificação Cíclica Redundante)</b>
1 byte = 8 bits	1 byte = 8 bits	0 a 252 bytes (N x 8 bits)	2 bytes = 16 bits

Fonte: Autor.

Desta forma, a utilização e configuração do protocolo de comunicação MODBUS RTU através da estrutura USB, permite realizar a transferência dos dados adquiridos através da plataforma Arduino para exibição no sistema supervisorio Indusoft.

## 2.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E EXIBIÇÃO DE DADOS AERONAVE FENNEC MODERNIZADA

As aeronaves FENNEC AS550A2 da Aviação do Exército passaram por um processo de modernização onde deixaram de ter sistemas de indicação analógicos (figura 20) e passaram a ter sistemas digitais de indicação (figura 21).

Figura 20 – Painel FENNEC antes da modernização.



Fonte: Autor.

Antes da modernização, o sistema de indicação da aeronave era composto por diversos indicadores, cada um correspondente a um parâmetro ou sistema, tais como para os dados

anemométricos, como o velocímetro, o altímetro e o *climb*, onde cada indicador era alimentado individualmente pelo sinal ou dado coletado do parâmetro por ele coletado.

Após a modernização os indicadores individuais para cada parâmetro foram suprimidos, passando a ser utilizadas três telas que fornecem os dados necessários ao voo da aeronave, conforme visualizado na figura 21.

Figura 21 – Painel FENNEC após a modernização.



Fonte: (Próprio Autor, 2017).

Desta forma, os dados anemométricos antes tratados conforme descrito no item 2.1 deste trabalho deixaram de funcionar desta forma, passando a ser coletados por um sistema eletrônico específico, capaz de coletar os dados de pressão, convertê-los em dados eletrônicos e enviá-los para indicação nas telas da aeronave modernizada.

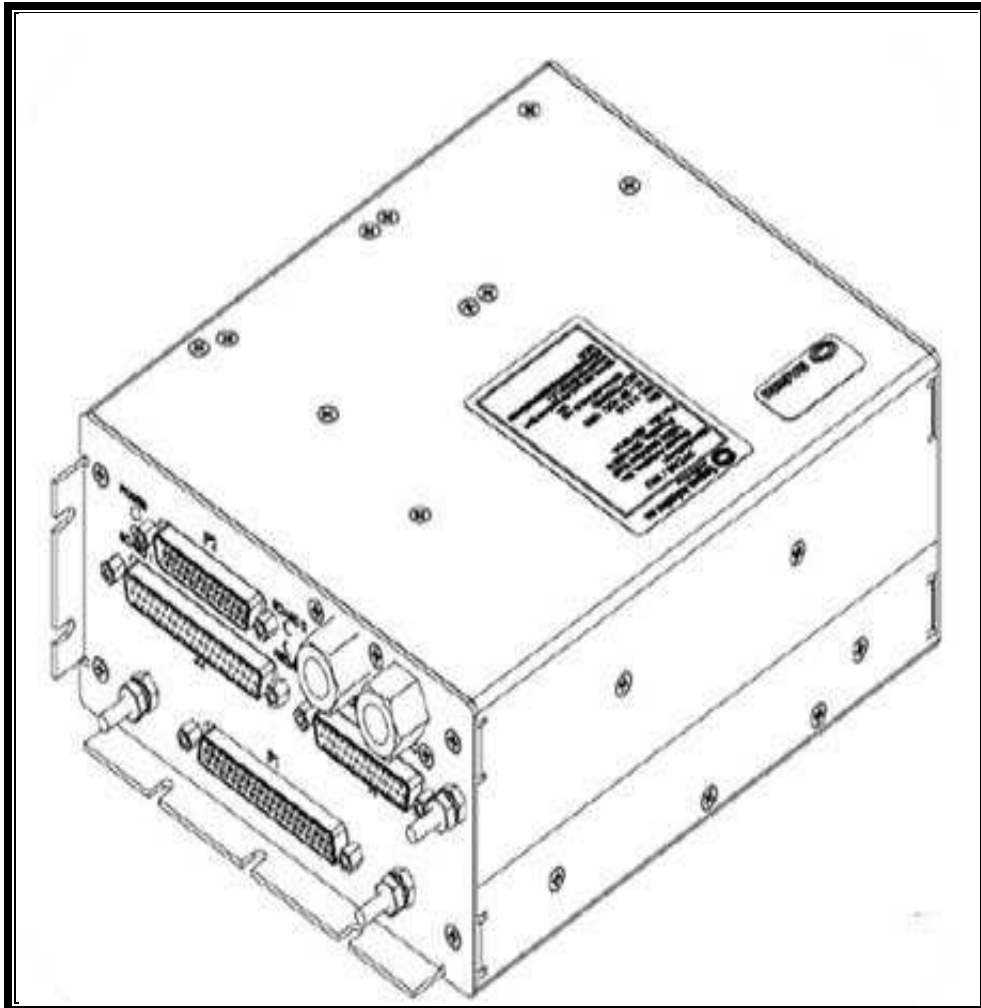
O equipamento responsável por captar os parâmetros anemométricos da aeronave e enviá-los as telas de visualização dos parâmetros é o PFD 35 (*Primary Flight Display – Display Primário de Voo*).

O PFD35 possui duas portas para alimentação anemométrica, uma para pressão estática e uma para pressão total. Estes dados são adquiridos e convertidos em sinais digitais, e

transmitidos às telas de visualização dos parâmetros da aeronave através de comunicação serial RS-232. A representação construtiva do PFD35 pode ser visualizada na figura 22.

Durante o estudo do equipamento foi contatado o fabricante para obtenção de parâmetros mais específicos do PFD 35, mas não foi disponibilizado os dados requeridos, devido ao nível de manutenção empregado na Aviação do Exército ser somente de operador. Desta forma não foi possível obter a taxa de amostragem de obtenção dos parâmetros pressão total e pressão estática, bem como os *labels* de endereçamento de palavras do protocolo RS-232.

Figura 22 – PFD35.



Fonte: (HELIBRAS, 2017).

## 2.7 MALETA DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS

A maleta de calibração é um equipamento padrão utilizado para verificar a conformidade dos indicadores utilizados nos sistemas anemométricos analógicos utilizados na aeronave. Desta forma, neste projeto ela foi utilizada como um padrão de calibração normatizado e a descrição de suas peculiaridades encontra-se na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros maleta de calibração

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
Nomenclatura	GENERATEUR T105
Fabricante	Crouzet
MPN	87202130V-10
Data de Fabricação	Julho/1993
Data de Calibração	Março/2017

Fonte: (CROUZET, 2017).

A maleta de calibração pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 – Maleta de calibração.



Fonte: (CROUZET, 2017).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 PROJETO DO PAINEL ANALÓGICO

Conforme já visualizada na arquitetura básica do sistema exposta na Figura 1, o painel analógico receberá três indicadores; velocímetro, altímetro e *climb*. Para tanto foi necessário realizar o projeto de uma estrutura capaz de suportar estes indicadores e permitir a correta fixação e visualização dos parâmetros encontrados por estes.

A estrutura projetada inicialmente foi um painel de acrílico com espessura de 3 mm e furação nas dimensões dos encaixes e fixações dos instrumentos utilizados, bem como o dimensionamento das legendas de identificação dos equipamentos e o painel de acrílico projetado pode ser visualizado no Anexo A.

Para suportar o painel de acrílico foi confeccionada uma estrutura com chapas de aço galvanizado e canaletas de alumínio. A parte interna da estrutura foi pintada com esmalte sintético na cor branca, para permitir maior visualização dos componentes utilizados e a parte externa foi pintada na cor verde, para permitir o realce do acrílico de fixação dos instrumentos na parte frontal do painel. Uma das laterais da estrutura foi confeccionada em acrílico transparente para permitir a visualização de toda a montagem interna do painel, como transdutores, mangueiras de pressão e o microcontrolador Arduino. O projeto da estrutura confeccionada pode ser visualizada no Anexo B.

Os indicadores utilizados no projeto são todos equipamentos sucateados que já não poderiam ser utilizados em aeronaves. Desta forma, estes indicadores apresentam certas limitações devido ao tempo de uso, apresentando alguns vazamentos e erros intrínsecos. Apesar das peculiaridades, isto não se torna um limitante do projeto, tendo em vista a sua finalidade didática de compreensão de funcionamento, estes defeitos irão auxiliar o desenvolvimento da instrução. A tabela 4 apresenta a identificação de cada indicador utilizado com seu respectivo MPN (*Manufacturing Part Number* – Número de Manufatura da Peça).

Tabela 4 – Identificação dos indicadores utilizados

INDICADOR	MPN
Altímetro	37500-5847
Velocímetro	38210-3941
<i>Climb</i>	38399-490-02

Fonte: Autor.

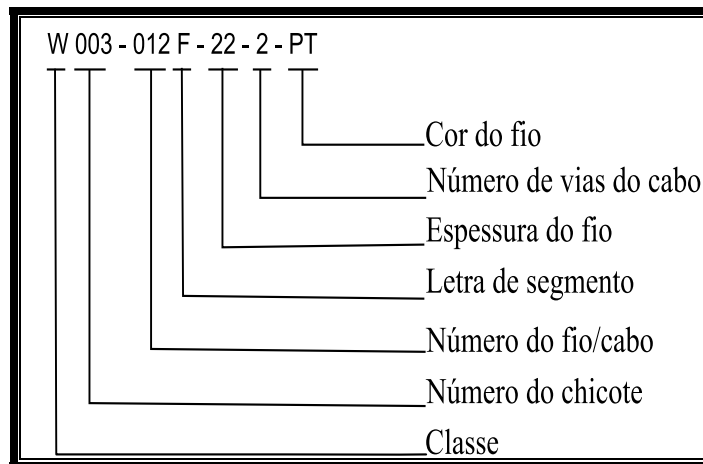
### 3.2 DIAGRAMAS ELÉTRICO E ANEMOMÉTRICO

O diagrama elétrico e das conexões anemométricas tem por finalidade orientar a confecção dos conectores, facilitar a localização de componentes e em caso de panes orientar os testes e procedimentos para resolução destes.

O diagrama elétrico do Painel Anemométrico Analógico – Digital foi confeccionado através do software executável Inkscape seguindo os padrões de normatização de instrumentação aeronáutica vigente (IPEV, 2011).

A nomenclatura utilizada para confecção dos chicotes seguiu os padrões expostos na Figura 24.

Figura 24 – Nomenclatura.



Fonte: (IPEV, 2011).

Sendo cada divisão especificada a seguir:

- Classe: foi utilizada a letra W para designar os chicotes principais de cablagem.
- Número do Chicote: numeração que designa qual é o chicote que se encontra o condutor, sendo o projeto constituído por 3 chicotes principais.
- Número do fio/cabo: cada condutor possui uma numeração específica para facilitar sua identificação e compreender a natureza do sinal que o alimenta.
- Letra de Segmento: serve para referenciar o início e o final de um condutor, ou seja, quando este condutor trafega por conectores de passagem ou superfícies hermeticamente isoladas essa letra vai sendo modificada, por exemplo, ao sair de seu ponto inicial recebe a letra “A”, após passar por um conector de passagem passa a receber a letra de segmento “B”,

- Espessura do fio: designada através o padrão AWG (*American Wire Gauge* - Escala Americana de Bitola de Fios).

- Número de vias do cabo: especifica o número de vias do cabo que alimenta determinado transdutor ou sistema.

- Cor do fio: facilita a identificação das conexões e solução de panes.

Os condutores utilizados para confecção das conexões com os transdutores foi o condutor 20 AWG, com capacidade de condução de 9 A, e este condutor foi proveniente de uma fonte de alimentação de um computador sucateado tipo Desktop, sendo sua capacidade de condução mais que suficiente para suportar os 40 mA, máximos, provenientes de cada porta do microcontrolador Arduino. Os conectores elétricos utilizados nos transdutores são provenientes também da fonte sucateada e são do padrão PCI Express de 6 pinos.

O cabo USB utilizado para comunicar a placa Arduino com o computador foi um cabo de impressora de 1,5 m de comprimento.

As mangueiras utilizadas nas conexões anemométricas possuem as devidas certificações aeronáuticas e tem diâmetro de  $\frac{1}{4}$  de polegada.

O diagrama final obtido encontra-se no Anexo C.

### 3.4 CONFECÇÃO DO PAINEL ANALÓGICO

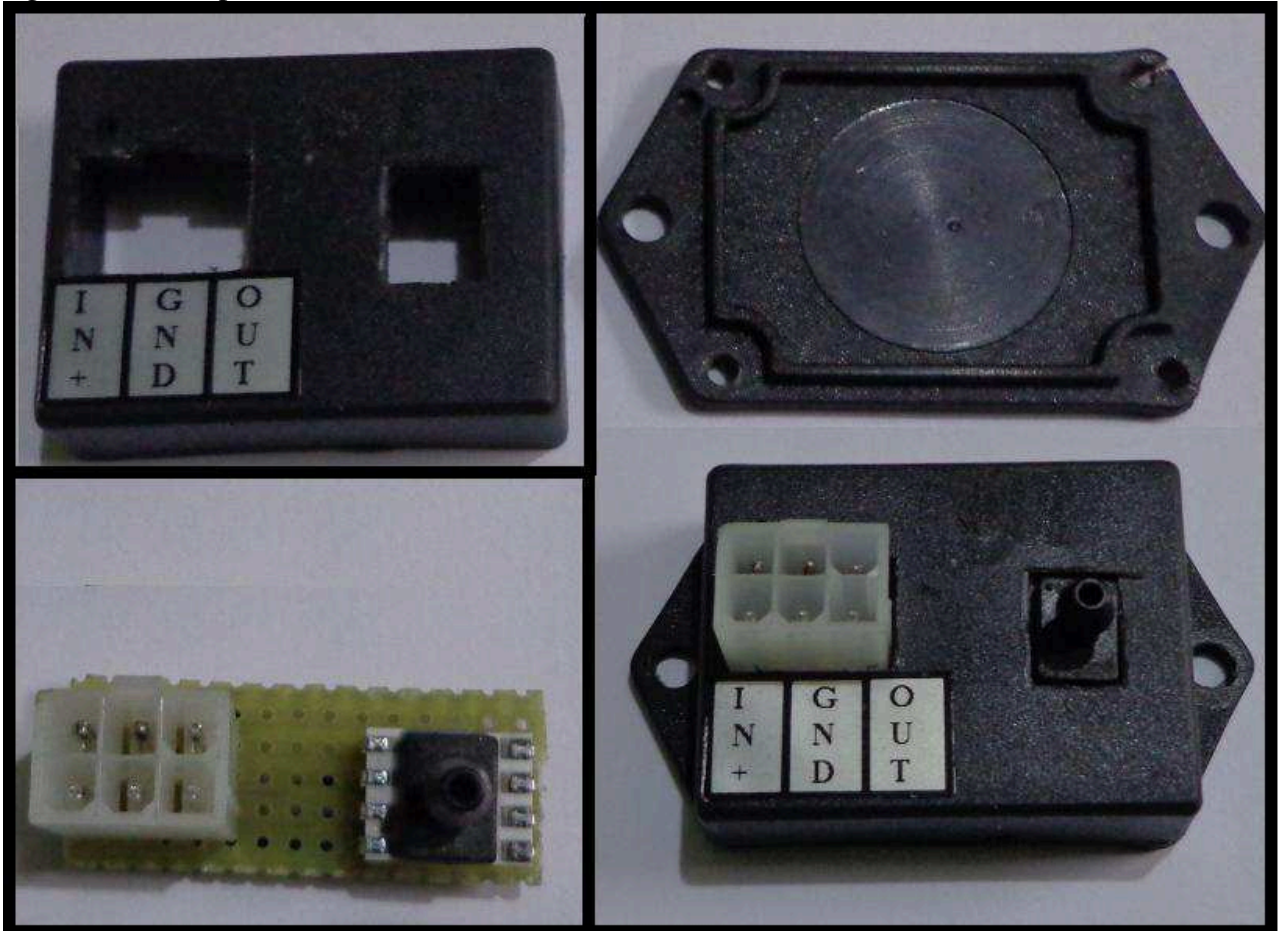
A partir do projeto mecânico e elétrico confeccionados foi possível a realização da montagem do projeto. Conforme já citado anteriormente, os indicadores utilizados são sucateados, bem como os transdutores, tendo em vista o elevado custo destes equipamentos no mercado, a maneira mais viável de confecção do projeto foi pela utilização da sucata disponível.

A fase inicial de implementação foi a confecção dos suportes dos transdutores de PB e QB. Como são dispositivos semicondutores foi necessário realizar um encapsulamento em *case*, de forma permitir sua conexão via conectores, conforme o diagrama elétrico do Anexo C. A utilização do encapsulamento facilita a manipulação dos transdutores e permite que este suporte maiores esforços decorrentes do uso em diferentes locais e aplicações necessárias a instrução.

As Figuras 25 e 26 apresentam o encapsulamento dos transdutores utilizados.



Figura 25 – Encapsulamento do transdutor de PB.



Fonte: Autor.

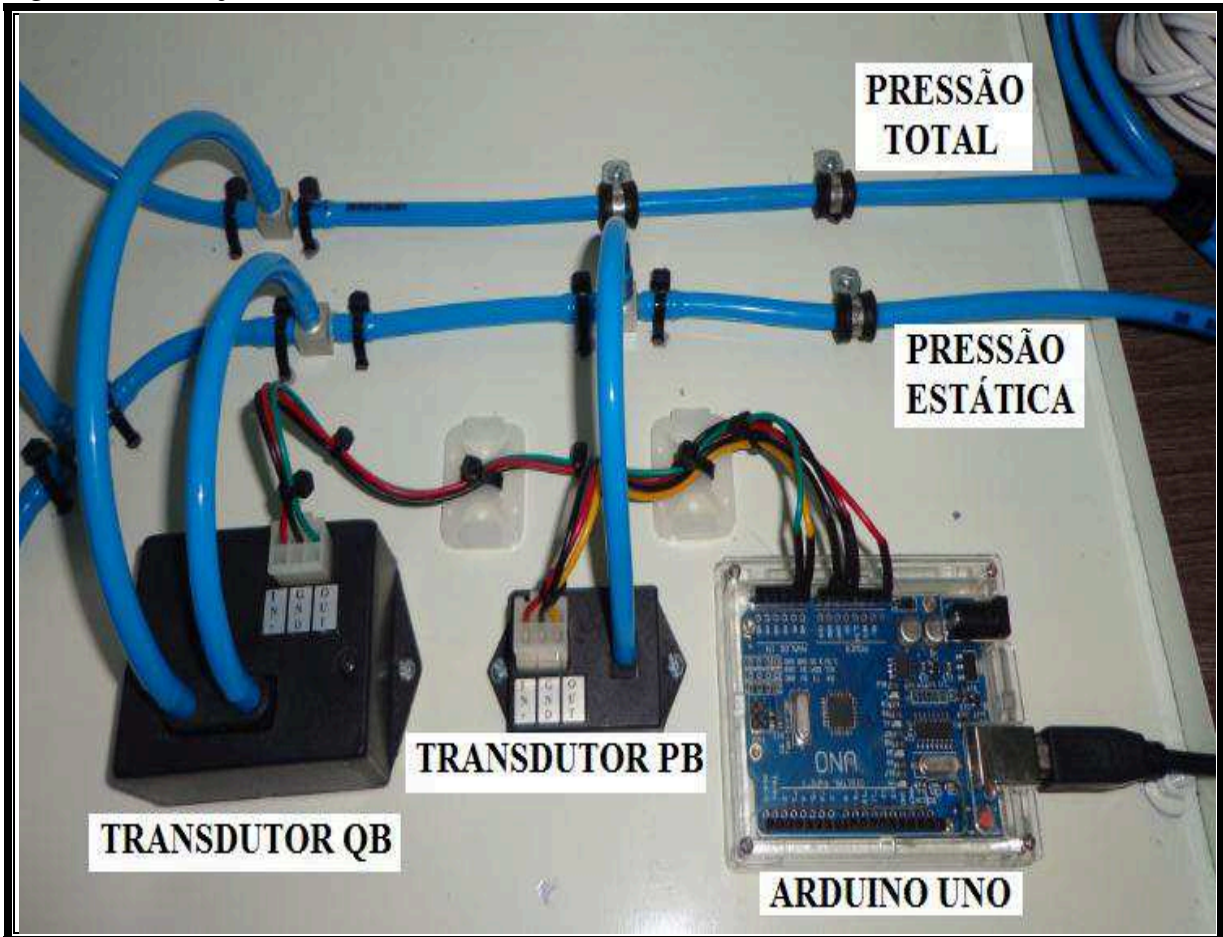
Figura 26 – Encapsulamento do transdutor de QB.



Fonte: Autor.

Após confeccionados os encapsulamentos, os transdutores foram fixados na traseira do painel analógico ao lado do microcontrolador Arduino, com quem estabelecem as devidas conexões elétricas e recebem ainda os sinais de pressão necessários ao funcionamento, conforme se visualiza na figura 27.

Figura 27 – Fixação dos transdutores do Arduino UNO.



Fonte: Autor.

Os indicadores foram fixados conforme o projeto do Anexo A. O acrílico confeccionado conforme o Anexo A furação foi realizada por meio de interface computadorizada.

Na parte traseira do painel de acrílico confeccionado foi adicionado um reforço de aço galvanizado, para impedir o cisalhamento do acrílico devido à manipulação necessária durante a instrução.

A fixação dos indicadores pode ser visualizada na figura 28.

Figura 28 – Fixação dos indicadores.



Fonte: Autor.

### 3.3 DEFINIÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM

Apesar dos cálculos teóricos realizados para a taxa de amostragem do microcontrolador, os valores encontrados podem ser diferentes dos valores reais, para tanto para garantir a exatidão da taxa de amostragem especificada realizou-se um teste de medição desta, através de um programa próprio para isto.

O conversor A/D do Arduino apesar de possuir seis entradas analógicas, tem capacidade de efetuar a conversão de apenas uma destas entradas por vez, sendo assim como a taxa de amostragem especificada pelo fabricante é de 9615,384615 Hz. Desta forma, o tempo de aquisição por canal analógico da placa seja conforme calculado na equação 3.

$$\text{Tempo de Aquisição} = 1/f_{aq} \quad (3)$$

$$\text{Tempo de Aquisição} = \frac{1}{9615,384615}$$

$$\text{Tempo de Aquisição} = 104 \mu s$$

O programa utilizado para especificação da taxa de amostragem está descrito na figura 29.

Figura 29 – Programa para medição da taxa de amostragem.

```

MEDI_A0_TAXA_DE_AMOSTRAGEM §
// Variáveis para armazenar os resultados
unsigned long tempo_inicio;
unsigned long tempo_fim;
unsigned long valor_A0;
unsigned long valor_A1;

void setup() {
  Serial.begin(9600); //inicia a comunicação serial
}
void loop() {
  // leitura
  tempo_inicio = micros(); //marca tempo de inicio de leitura
  valor_A0 = analogRead(A0); //le valor convertido
  valor_A1 = analogRead(A1); //le valor convertido
  tempo_fim = micros(); //le tempo no fim da conversão

  //exibe valor lido e tempo de conversão
  Serial.print("Valor_A0 = ");
  Serial.print(valor_A0);
  Serial.print("-- Valor_A1 = ");
  Serial.print(valor_A1);
  Serial.print(" -- Tempo leitura = ");
  Serial.print(tempo_fim - tempo_inicio);
  Serial.println(" us");
  delay(500);
}

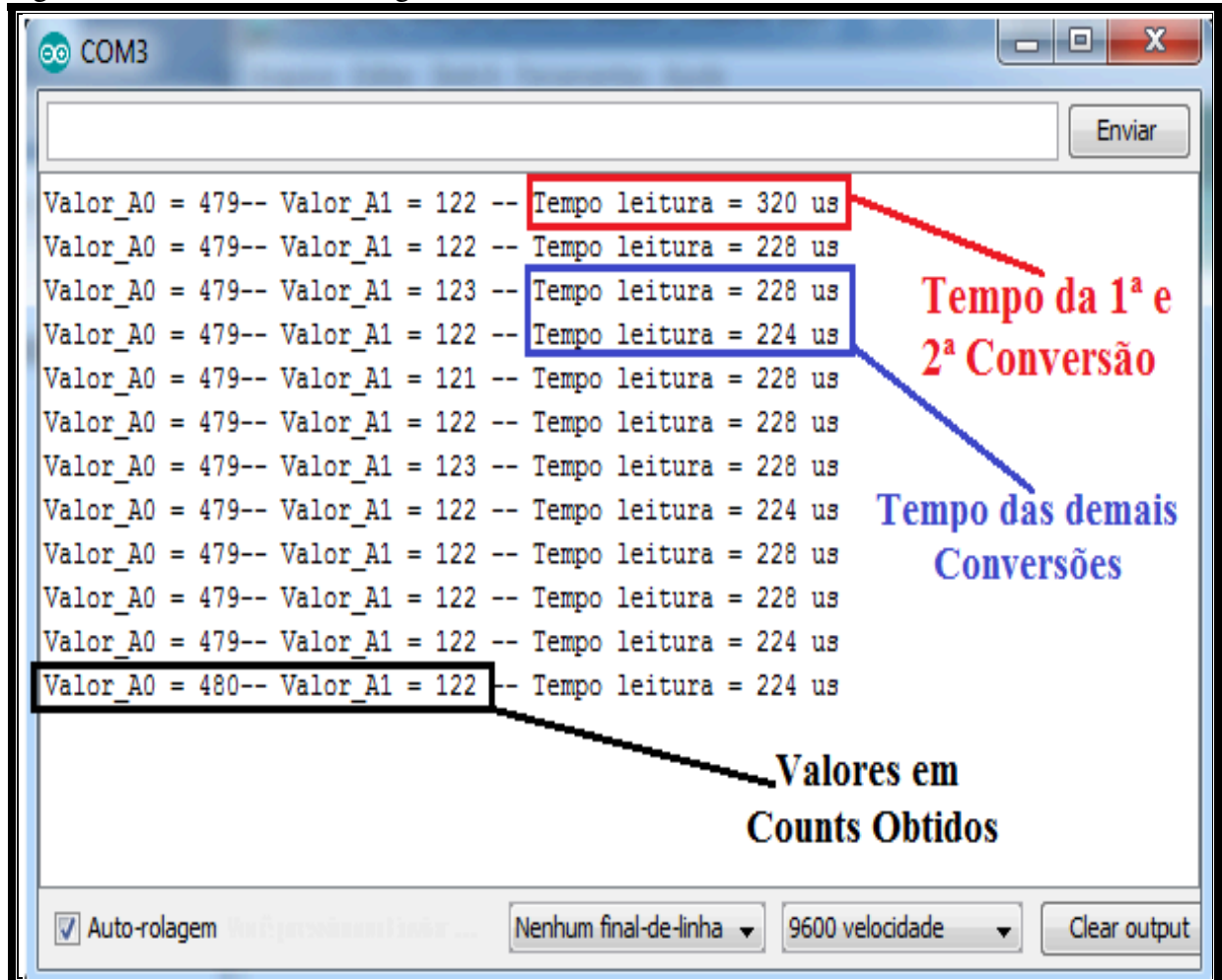
```

Fonte: Autor.

Através do leitor da interface serial do microcontrolador Arduino é possível visualizar a taxa de amostragem obtida, bem como os valores lidos convertidos em *counts*. Estes valores podem ser visualizados na figura 30, onde se observa que os tempos demonstrados são para a

conversão de dois canais analógicos lidos. O primeiro valor de tempo lido refere-se a 1ª e a 2ª conversão de dados, sendo este tempo lido maior que os demais devido à primeira conversão efetuada pelo conversor A/D do microcontrolador Arduino, onde são necessários 25 pulsos de *clock* para conversão completa. As demais conversões utilizam somente 13 pulsos de *clock*, sendo o tempo necessário para a conversão completa menor.

Figura 30 – Dados de amostragem obtidos.



Fonte: Autor.

Observa-se que o tempo de conversão para os dois canais analógicos lidos (A0 e A1) oscila entre 224  $\mu$ s e 228  $\mu$ s, sendo a média do tempo de conversão para dois canais então de 226  $\mu$ s. Desta forma, o tempo de conversão por canal obtido de maneira prática é de 113  $\mu$ s, que é um número bem próximo ao tempo teórico especificado pelo fabricante de 104  $\mu$ s. Dado estes obtidos, a taxa de amostragem pode ser obtida através da equação 4.

$$f_{aq} = \frac{1}{\text{Tempo de Aquisição}} \quad (4)$$

$$f_{aq} = \frac{1}{113 \mu s}$$

$$f_{aq} = 8849,6 \text{ Hz}$$

Assim, a taxa de amostragem obtida para o sistema é de 8849,6 Hz, tendo em vista que a taxa de amostragem dos parâmetros exibidos na aeronave geralmente limita-se a 100 Hz, a taxa obtida para o projeto em questão atende aos requisitos esperados satisfatoriamente, mesmo tendo apresentado um erro de 765,784615 Hz em relação à taxa de amostragem especificada pelo fabricante. Este erro ocorreu devido a não utilização de interrupção no programa de obtenção de dados do Arduino. Se esta instrução fosse utilizada ela garantiria a taxa de amostragem especificada pelo fabricante.

### 3.4 CALIBRAÇÃO E OBTENÇÃO DAS CURVAS DOS INSTRUMENTOS

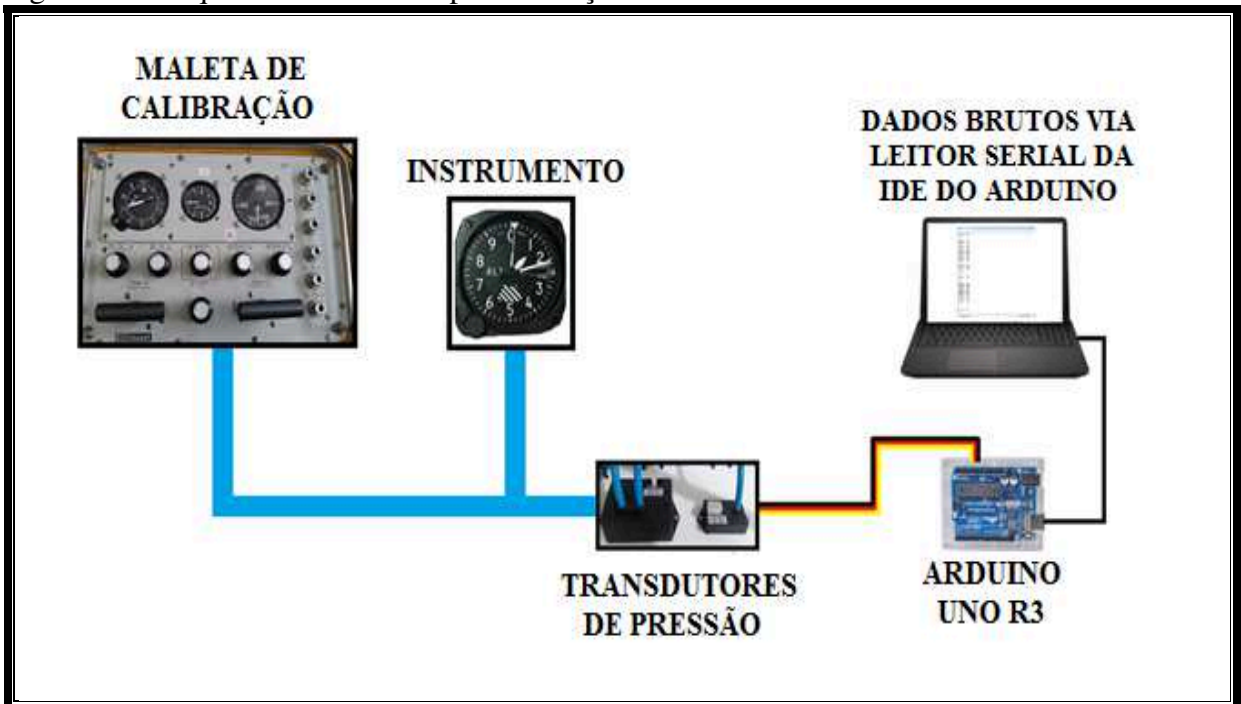
O procedimento de calibração de um parâmetro permite obter a curva de comportamento deste a partir dos dados brutos obtidos. Este processo consiste em comparar o dado bruto obtido com o valor indicado no instrumento real analógico. Para tanto, este processo foi obtido em duas etapas distintas, o processo de obtenção dos dados brutos e o processo de obtenção das curvas.

#### 3.4.1 Obtenção dos dados brutos

Os dados brutos obtidos são os níveis de tensão quantizados pelo conversor A/D do microcontrolador em uma faixa de 0 a 1023 níveis, estes valores são obtidos através das entradas analógicas do microcontrolador que podem receber uma faixa de tensão de 0 a 5 V<sub>DC</sub>.

Os dados brutos dos instrumentos foram obtidos individualmente, para minimizar as perdas por possíveis vazamentos nas conexões dos instrumentos e o obter uma curva mais fiel ao comportamento deste.

Figura 31 – Esquema de conexões para obtenção dos dados brutos.



Fonte: Autor.

Após efetuadas as devidas conexões, realizou-se a configuração do software Arduino de modo a obter a correta leitura dos parâmetros obtidos, sendo o código fonte utilizado para leitura dos parâmetros apresentado na figura 32.

Figura 32 – Programa de obtenção dos dados brutos.

```
PROGRAMA_DADOS_BRUTOS $

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

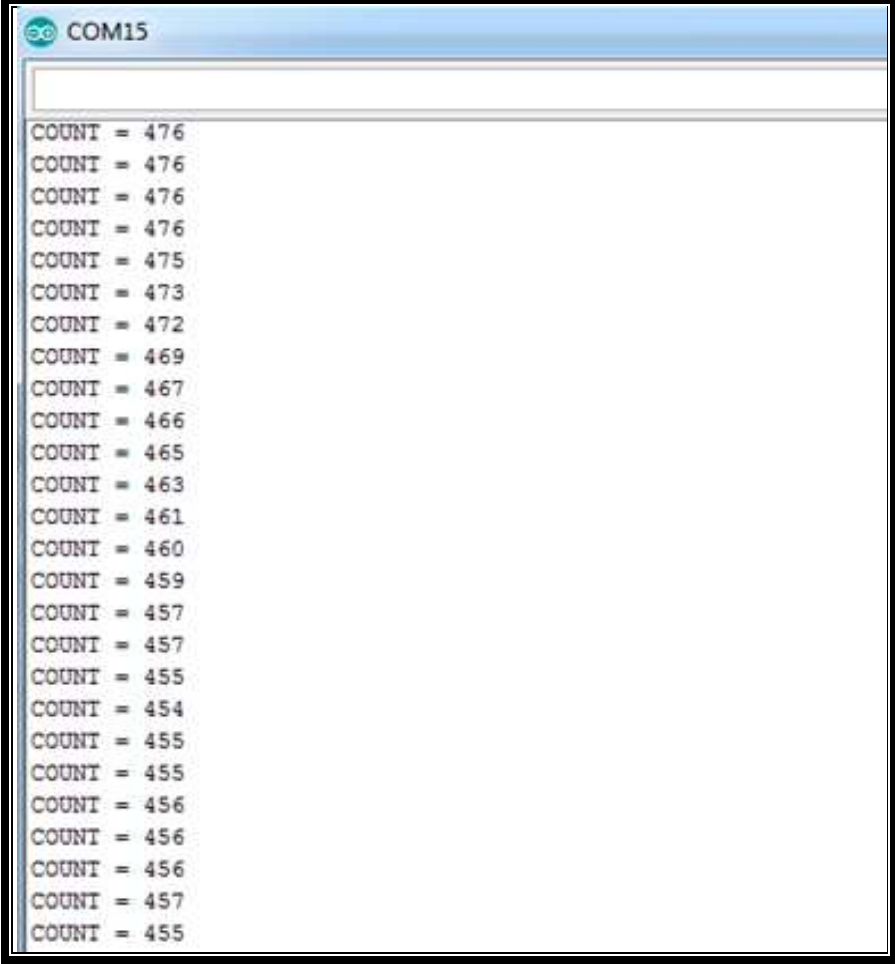
void loop() {
  ADC = analogRead(A0);
  Serial.print("COUNT = ");
  Serial.print(ADC);
  Serial.println("");
}

```

Fonte: Autor.

Após carregado o programa na placa do Arduino é possível visualizar os dados brutos obtidos, também chamados de *counts*, demonstrados na figura 33.

Figura 33 – Leitor de dados da serial da IDE do Arduino.



```
COM15  
COUNT = 476  
COUNT = 476  
COUNT = 476  
COUNT = 476  
COUNT = 475  
COUNT = 473  
COUNT = 472  
COUNT = 469  
COUNT = 467  
COUNT = 466  
COUNT = 465  
COUNT = 463  
COUNT = 461  
COUNT = 460  
COUNT = 459  
COUNT = 457  
COUNT = 457  
COUNT = 455  
COUNT = 454  
COUNT = 455  
COUNT = 455  
COUNT = 456  
COUNT = 456  
COUNT = 456  
COUNT = 457  
COUNT = 455
```

Fonte: Autor.

### 3.4.2 Obtenção das curvas

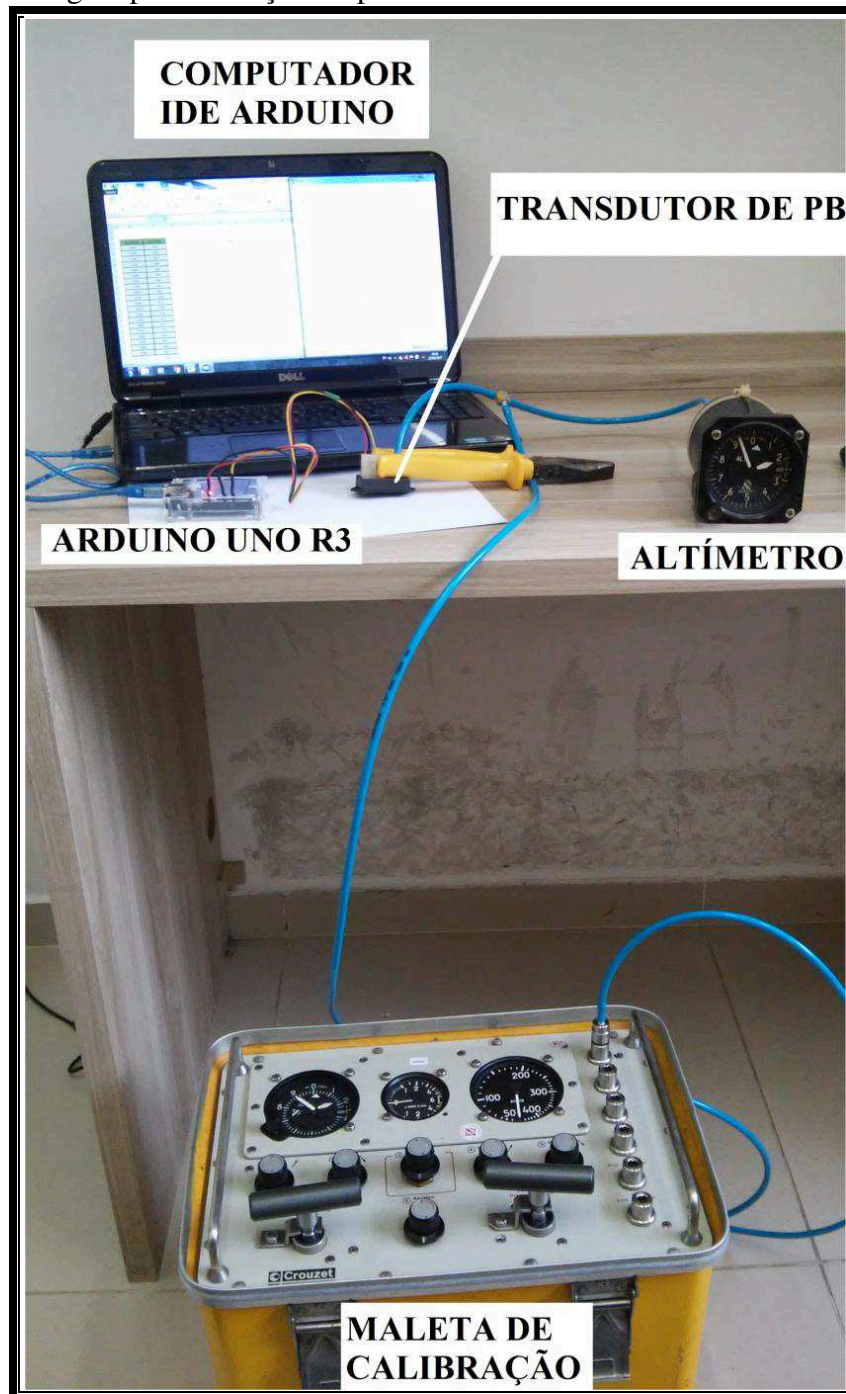
A partir da obtenção dos dados brutos é possível realizar o procedimento de calibração de cada instrumento, de forma a obter as a curvas de cada parâmetro.

#### 3.4.2.1 Curva do parâmetro altitude

Para obtenção do parâmetro altitude, os dados indicados no altímetro analógico foram comparados com os *counts* obtidos pela IDE do microcontrolador. O esquema de montagem utilizado para o procedimento de calibração pode ser visualizado na figura 34.



Figura 34 – Montagem para obtenção do parâmetro altitude.



Fonte: Autor.

A partir dos dados brutos obtidos segundo o procedimento descrito no item 3.4.1, foi possível construir uma planilha de calibração do parâmetro no excel, onde para cada tomada de calibração foi ajustada uma altitude no indicador analógico e obtido os dados brutos em *counts*, a tabela 5 e a tabela 6 apresentam os dados obtidos para calibração do parâmetro Altitude.

Tabela 5 – Dados obtidos da calibração do parâmetro altitude (parte 1).

<b>TOMADA</b>	<b>ALTITUDE (ft)</b>	<b>COUNTS</b>	<b>TOMADA</b>	<b>ALTITUDE (ft)</b>	<b>COUNTS</b>
1	1000	492	39	4700	441
2	1100	490	40	4800	439
3	1200	489	41	4900	438
4	1300	488	42	5000	437
5	1400	486	43	5100	436
6	1500	484	44	5200	434
7	1600	483	45	5300	433
8	1700	482	46	5400	432
9	1800	481	47	5500	431
10	1900	478	48	5600	430
11	2000	477	49	5700	428
12	2100	476	50	5800	427
13	2200	474	51	5900	426
14	2300	473	52	6000	425
15	2400	472	53	6100	424
16	2500	470	54	6200	422
17	2600	468	55	6300	421
18	2700	467	56	6400	420
19	2800	466	57	6500	419
20	2900	465	58	6600	418
21	2900	465	59	6700	417
22	3000	463	60	6800	415
23	3100	462	61	6900	414
24	3200	461	62	7000	413
25	3300	460	63	7100	411
26	3400	458	64	7200	410
27	3500	457	65	7300	409
28	3600	455	66	7400	408
29	3700	454	67	7500	407
30	3800	453	68	7600	406
31	3900	452	69	7700	405
32	4000	451	70	7800	404
33	4100	450	71	7900	402
34	4200	449	72	8000	401
35	4300	448	73	8100	400
36	4400	446	74	8200	399
37	4500	444	75	8300	398
38	4600	442	76	8400	396

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Dados obtidos da calibração do parâmetro altitude (parte 2).

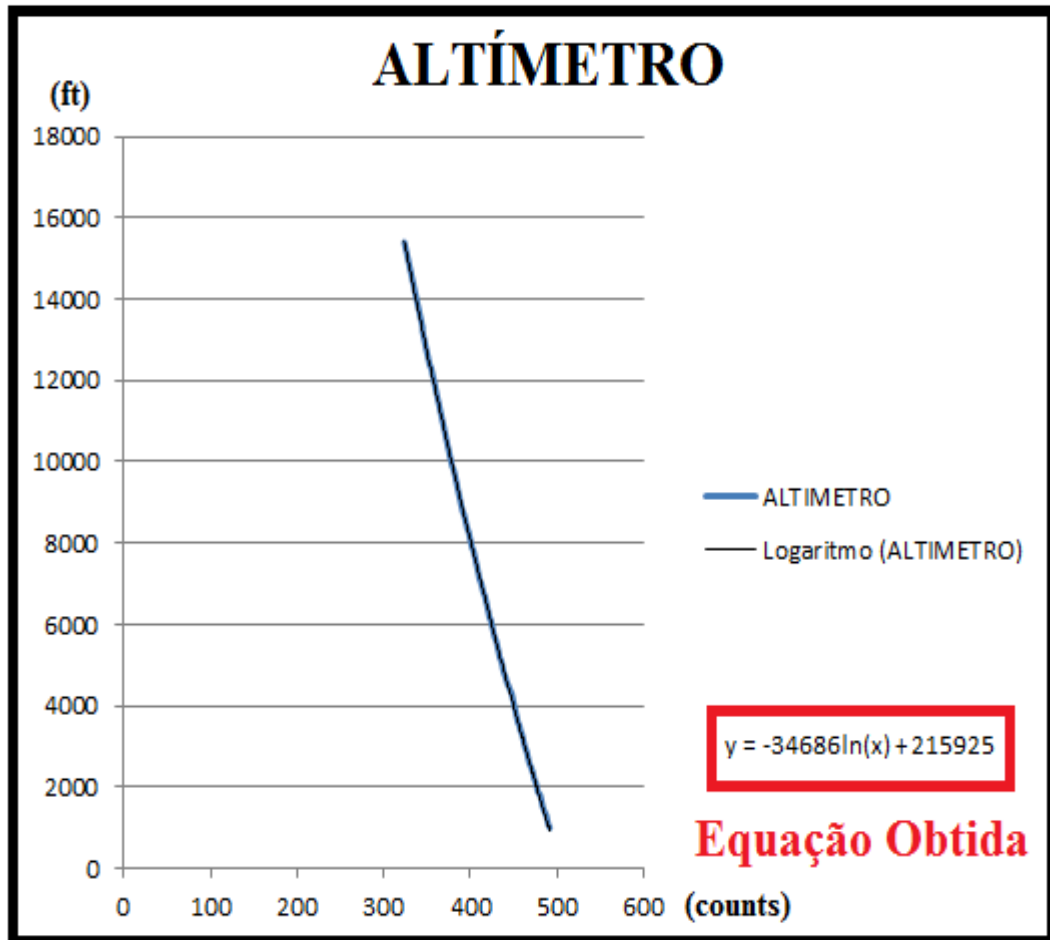
<b>TOMADA</b>	<b>ALTITUDE (ft)</b>	<b>COUNTS</b>	<b>TOMADA</b>	<b>ALTITUDE (ft)</b>	<b>COUNTS</b>
77	8500	395	112	12000	358
78	8600	394	113	12100	357
79	8700	393	114	12200	356
80	8800	391	115	12300	355
81	8900	390	116	12400	353
82	9000	389	117	12500	352
83	9100	388	118	12600	351
84	9200	387	119	12700	350
85	9300	386	120	12800	349
86	9400	385	121	12900	348
87	9500	384	122	13000	347
88	9600	383	123	13100	346
89	9700	382	124	13200	345
90	9800	381	125	13300	345
91	9900	379	126	13400	344
92	10000	378	127	13500	343
93	10100	377	128	13600	342
94	10200	376	129	13700	341
95	10300	375	130	13800	340
96	10400	374	131	13900	339
97	10500	373	132	14000	338
98	10600	372	133	14100	337
99	10700	371	134	14200	336
100	10800	370	135	14300	335
101	10900	369	136	14400	334
102	11000	368	137	14500	333
103	11100	367	138	14600	332
104	11200	366	139	14700	331
105	11300	365	140	14800	330
106	11400	364	141	14900	329
107	11500	363	142	15000	328
108	11600	362	143	15100	327
109	11700	361	144	15200	326
110	11800	360	145	15300	325
111	11900	359	146	15400	324

Fonte: Autor.

A partir dos dados obtidos nas tabela 5 e 6 é possível traçar uma curva de resposta do indicador altímetro de Altitude x *Counts*, onde através dos recursos do excel é possível

adicionar uma linha de tendência, que permite retirar a equação deste gráfico. Este gráfico pode ser visualizado na figura 35.

Figura 35 - Curva do parâmetro altitude.



Fonte: Autor.

A equação retirada foi utilizada para converter os dados brutos no parâmetro altitude propriamente dito em ft e desta forma a obtem-se a equação 5.

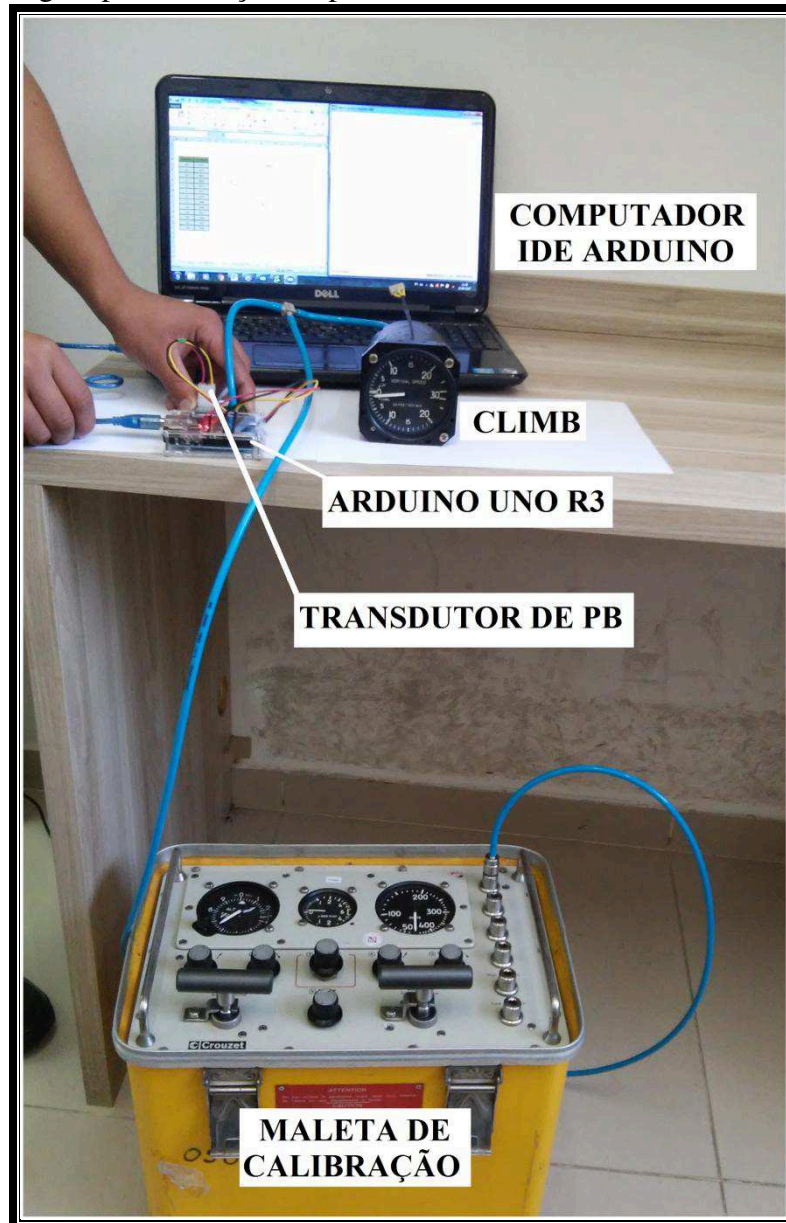
$$Altitude = -34686 \cdot \ln(x) + 215925 \quad (5)$$

#### 3.4.2.2 Curva do parâmetro razão de subida e descida

Para obtenção do parâmetro razão de subida e descida, os dados indicados no *climb* analógico foram comparados com os *counts* obtidos pela IDE do microcontrolador Arduino.

O esquema de montagem utilizado para o procedimento de calibração pode ser visualizado na figura 36.

Figura 36 – Montagem para obtenção do parâmetro razão de subida e descida.



Fonte: Autor.

A partir dos dados brutos obtidos segundo o procedimento descrito no item 3.4.1, foi possível construir uma planilha de calibração do parâmetro no excel, onde para cada tomada de calibração foi ajustada uma razão de subida ou descida no indicador analógico e obtido os dados brutos em *counts*, e a tabela 7 apresenta os dados obtidos para calibração do parâmetro razão de subida e descida.

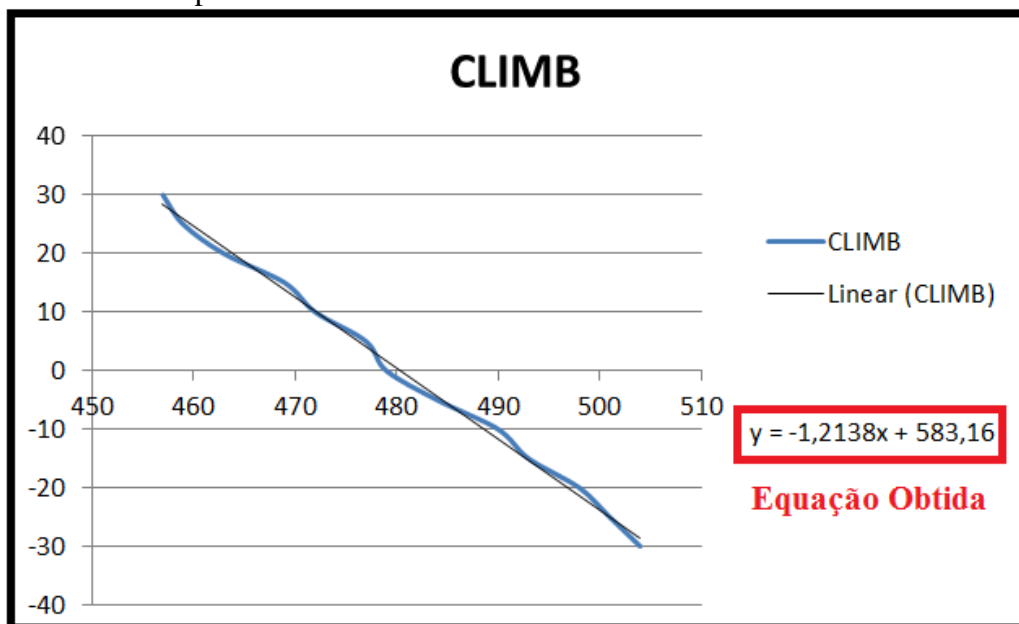
Tabela 7 – Dados obtidos da calibração do parâmetro razão de subida e descida

TOMADA	RAZÃO (x100 ft/min)	COUNTS
1	30	457
2	25	459
3	20	463
4	15	469
5	10	472
6	5	477
7	0	479
8	-5	484
9	-10	490
10	-15	493
11	-20	498
12	-25	501
13	-30	504

Fonte: Autor.

A partir dos dados obtidos na Tabela 6 é possível traçar uma curva de resposta do indicador *climb* de Razão de Subida ou Descida x *Counts*, onde através dos recursos do excel é possível adicionar uma linha de tendência, que permite retirar a equação deste gráfico. Este gráfico pode ser visualizado na figura 37.

Figura 37 – Curva do parâmetro razão de subida e descida.



Fonte: Autor.

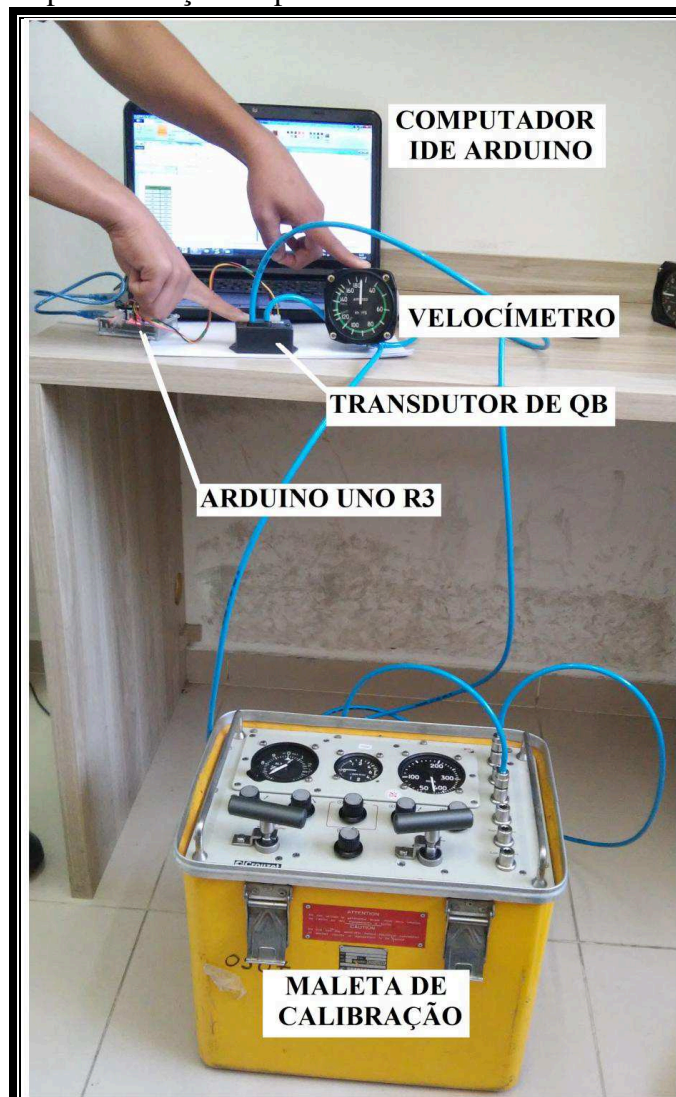
A equação retirada foi utilizada para converter os dados brutos no parâmetro razão de subida e descida propriamente dito em graduações vezes 100 pés por minuto ( $x 100 \text{ ft/min}$ ) e desta forma a equação final obtida é a equação 6.

$$\text{Razão} = -1,2138.x + 583,16 \quad (6)$$

### 3.4.2.3 Curva do parâmetro velocidade

Para obtenção do parâmetro velocidade, os dados indicados no velocímetro analógico foram comparados com os *counts* obtidos pela IDE do microcontrolador Arduino. O esquema de montagem utilizado para o procedimento de calibração pode ser visualizado na figura 38.

Figura 38 – Montagem para obtenção do parâmetro velocidade.



Fonte: Autor.

A partir dos dados brutos obtidos segundo o procedimento descrito no item 3.4.1, foi possível construir uma planilha de calibração do parâmetro no excel, onde para cada tomada de calibração foi ajustada uma velocidade no indicador analógico e obtido os dados brutos em *counts*, e a tabela 8 apresenta os dados obtidos para calibração do parâmetro velocidade.

Tabela 8 – Dados obtidos da calibração do parâmetro velocidade.

<b>TOMADA</b>	<b>VELOCIDADE (kt)</b>	<b>COUNTS</b>
1	0	119
2	10	128
3	40	138
4	50	148
5	60	165
6	70	183
7	80	205
8	90	229
9	100	259
10	110	289
11	120	319
12	130	357
13	140	394
14	150	434
15	160	475
16	170	525
17	180	581

Fonte: Autor.

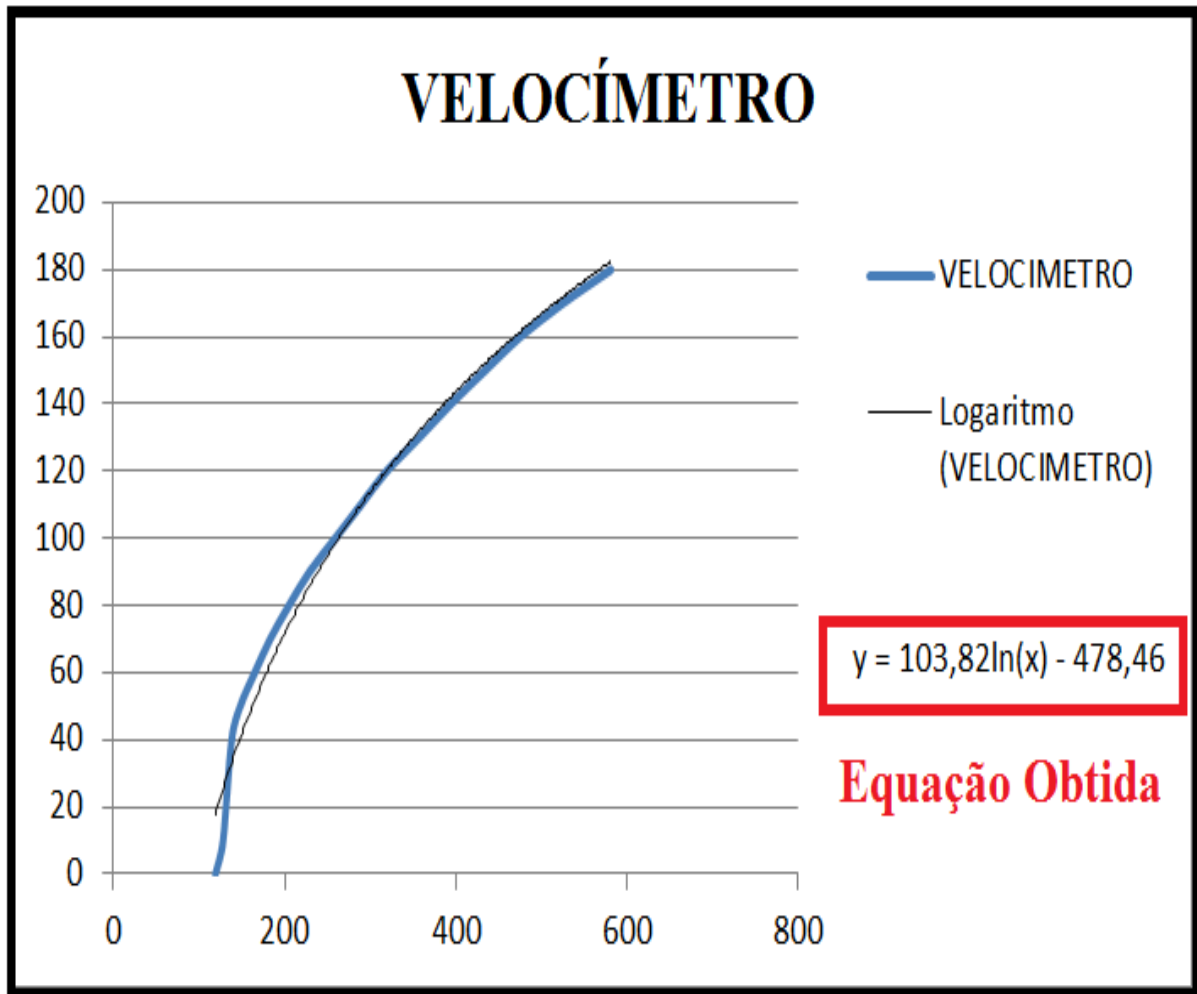
A partir dos dados obtidos na tabela 7 é possível traçar uma curva de resposta do indicador de velocidade  $x$  *counts*, onde através dos recursos do Excel é possível adicionar uma linha de tendência, que permite retirar a equação deste gráfico. Este gráfico pode ser visualizado na figura 39.

A equação retirada foi utilizada para converter os dados brutos no parâmetro razão de subida e descida propriamente dito em nós (*knots - kt*), desta forma a equação final obtida é a equação 7.

$$Velocidade = 103,82 \cdot \ln(x) - 478,46 \quad (7)$$



Figura 39 – Curva do parâmetro velocidade.



Fonte: Autor.

### 3.5 PROGRAMA FINAL

Após a obtenção das curvas de cada parâmetro é possível determinar o programa final a ser carregado no microcontrolador Arduino. Este programa deve ser dotado da biblioteca de comunicação MODBUS RTU, necessária para estabelecer a comunicação entre o microcontrolador e o software Indusoft.

Para facilitar a identificação dos dados do programa foram estabelecidas variáveis com denominações já conhecidas e em uma sequência que possibilite o entendimento lógico do programa. As demais particularidades dos comandos utilizados estão denominadas através de comentários no corpo do programa, que podem ser visualizados na figura 40.

Figura 40 – Programa final obtido.

```

Programa_Final_Painel

#include <ModbusSlave.h> // inclui a biblioteca do protocolo de comunicação MODBUS RTU
float count_PB = 0; // estabelece como variável os dados brutos parâmetro PB
float count_QB = 0; // estabelece como variável os dados brutos parâmetro QB
float Altimetro = 0; // Estabelece a variável do Altimetro Digital
float Climb = 0; // Estabelece a variável do Climb Digital
float Velocimetro = 0; // Estabelece a variável do Velocimetro Digital

enum
{
holdingRegs0,
holdingRegs1,
holdingRegs2,
holdingRegs3,
holdingRegs4,
holdingRegs5,
holdingRegs6,
holdingRegs7,
holdingRegs8,
holdingRegs9,
holdingRegs10,
holdingRegs11,
holdingRegs12,
holdingRegs13,
    HOLDING_REGS_SIZE
};
unsigned int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];

void setup()
{
    modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N2, 1, 2, HOLDING_REGS_SIZE, holdingRegs);
    modbus_update_comms(9600, SERIAL_8N2, 1);
}

void loop()
{
    modbus_update();

    //AQUISIÇÃO DOS DADOS BRUTOS
    count_PB = analogRead(A0); // a variável count_PB recebe os dados brutos da entrada A0
    count_QB = analogRead(A1); // a variável count_QB recebe os dados brutos da entrada A1

    //CONVERSÃO DE DADOS BRUTOS EM PARÂMETROS
    Altimetro = -34686*log(count_PB)+215925; // conversão dos dados brutos do count_PB em Altitude
    Climb = -1.2138*(count_PB)+583.16; // conversão dos dados brutos do count_PB em Razão de Sub. ou Desc.
    Velocimetro = 103.82*log(count_QB)-478.46; // conversão dos dados brutos do count_QB em Velocidade

    //ENVIO DOS DADOS CONVERTIDOS PARA OS REGISTRADORES DO SOFTWARE INDUSOFT
    holdingRegs[1]= Altimetro;
    holdingRegs[2]= Climb;
    holdingRegs[3]= Velocimetro;
}

```

Fonte: Autor.

### 3.6 COMUNICAÇÃO COM SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para exibição dos parâmetros convertidos pelo microcontrolador Arduino é necessário realizar as configurações do software INDUSOFT. Para tanto são necessários procedimentos sequenciais de configuração, cuja correta execução leva ao êxito na obtenção da indicação dos parâmetros do sistema. Desta forma, deve-se seguir os seguintes procedimentos:

- 1- Ao abrir o programa é aberta a opção de criação de projeto, e deve-se escolher um nome para este, que no caso foi “Projeto: Painel FENNEC”.
- 2- Após nomear o projeto deve-se escolher qual a porta de comunicação USB será utilizada, no caso a porta utilizada foi a COM 3.
- 3- O próximo passo é o de configuração do protocolo de comunicação a ser utilizado e a velocidade de comunicação, sendo selecionado o protocolo “MODBUS RTU” e a velocidade de tráfego de dados de 9600 bps (*bits per second* – bits por segundo).
- 4- A partir das configurações iniciais realizadas é possível prosseguir criando a tela com os indicadores e símbolos, bem como as nomeações através de caixas de texto. Conforme pode ser visualizado na figura 41.
- 5- Após inseridos os indicadores devem ser criadas suas tag’s, onde é possível determinar os registros de armazenamento dos parâmetros. Estes registros devem coincidir com os configurados na IDE do software Arduino. As páginas de configuração de tag’s utilizadas são exibidas nas figuras 42 e 43.
- 6- O próximo passo consiste na seleção da faixa dos parâmetros a serem visualizados nos indicadores, a faixa selecionada dever ser coerente com as dos indicadores analógicos. A figura 44 apresenta como exemplo a seleção de faixa do indicador Altímetro.

Figura 41 – Tela criada no software Indusoft.



Fonte: Autor.

Figura 42 – Folha principal do driver.

Indicações Sistema ANEMO.SCC | Tags do Projeto | MODBU - FOLHA PRINCIPAL DE DRIVER

Descrição:

Desativar:

Leitura Completa:  Estado da Leitura:

Escrita Completa:  Estado da Escrita:   Mín:  Máx:

	Nome da Tag	Estação	Endereço I/O	Ação	Scan	Div	Adição
	<input type="text" value="Filtro de Texto"/>	<input type="text" value="Filtro de T"/>	<input type="text" value="Filtro de Texto"/>	<input type="text" value="(Todos)"/>	<input type="text" value="(Todos)"/>	<input type="text" value="Filtro de Te"/>	<input type="text" value="Filtro de Te"/>
1	ALT	1	1X:1	Ler+Escrev...	Sempre		
2	CLIMB	1	0X:1	Ler+Escrev...	Sempre		
3	AIRSPEED	1	3X:1	Ler+Escrev...	Sempre		
*				Ler+Escrev...	Sempre		
*				Ler+Escrev...	Sempre		
*				Ler+Escrev...	Sempre		

Fonte: Autor.

Figura 43 – Página de endereçamento.

Indicações Sistema ANEMO.SCC MODBU001.DRV

Descrição:   Aumentar prioridade

Disparo de Leitura:  Habilita Leitura Automática:  Leitura Completa:  Estado da Leitura:

Disparo de Escrita:  Habilita Escrita Automática:  Escrita Completa:  Estado da Escrita:

Estação:  Cabeçalho:   Mín:   
 Máx:

Nome da Tag	Endereço	Div	Adição
<input type="text" value="Filtro de Texto"/>	<input type="text" value="Filtro de Texto"/>	<input type="text" value="Filtro de Te:"/>	<input type="text" value="Filtro de Te:"/>
1 ALT	2		
2 CLIMB	3		
3 AIRSPEED	4		
*			
*			
*			
*			
*			

**Soma-se "1" no endereço correspondente**

Fonte: Autor.

Figura 44 – Seleção de faixas dos indicadores.

Propriedades do Objeto

Substituir... Dica:  Linked Symbol

Nome: Meters\RoundMeter\_  Usar tamanho vinculado Expandir

Categoria:  Mostrar propriedades de todas as categorias

Propriedade	Valor
Main.Label	"ALT"
Main.Max	20000
Main.Min	0
Main.TagName	ALT

Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MONTAGEM FINAL OBTIDA

A construção final obtida para o painel analógico pode ser visualizada nas figuras 45 a 49. Onde se verifica que a montagem final obtida foi satisfatória, pois permite a visualização e acesso de todos os componentes utilizados no projeto, facilitando a manipulação na instrução.

As dimensões do projeto permitem sua utilização do painel analógico ao lado do painel digital para instrução, o que facilita seu deslocamento e emprego.

Figura 45 – Vista lateral painel analógico.



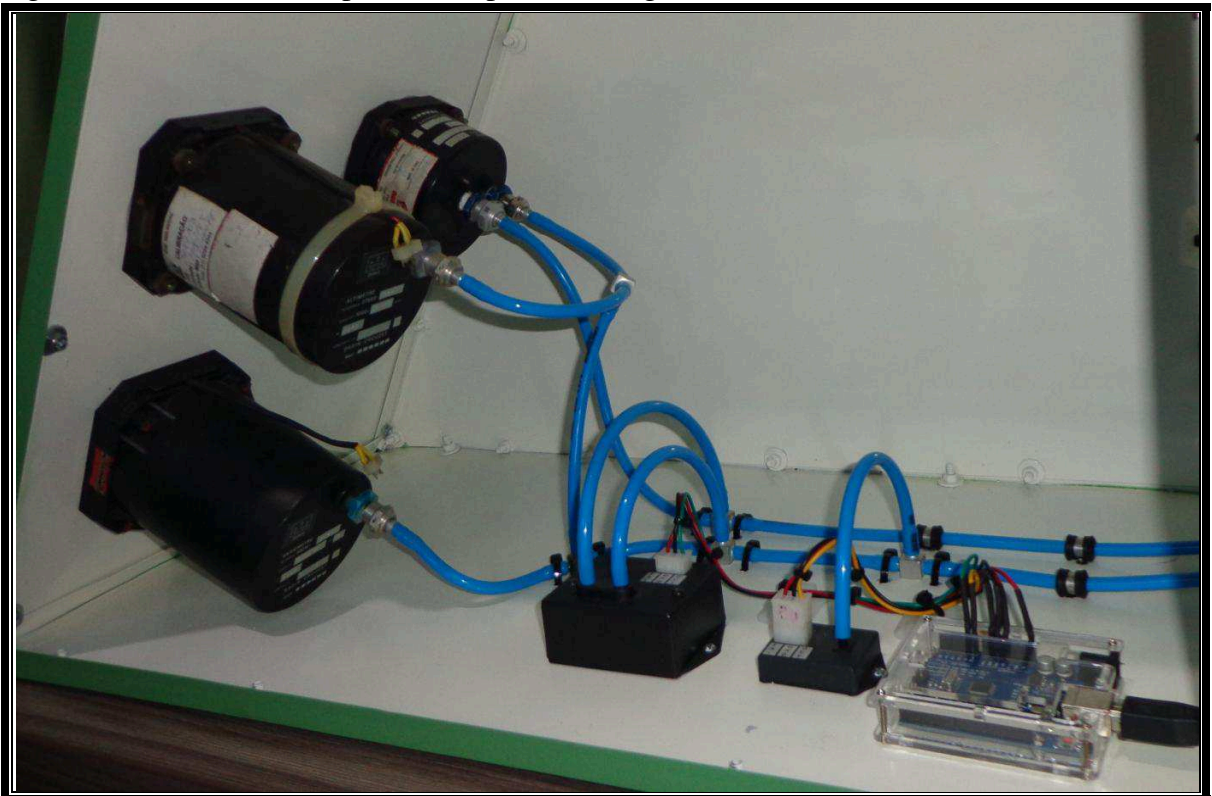
Fonte: Autor.

Figura 46 – Vista interna painel analógico.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Vista interna aproximada painel analógico.



Fonte: Autor.

Figura 48 – Conexão painel analógico e digital.



Fonte: Autor.

Figura 49 – Vista frontal da conexão painel analógico e digital.



Fonte: Autor.



## 4.2 ANÁLISE COMPARATIVA E ERRO OBTIDO

Com a finalidade de obtenção de parâmetros quantitativos para avaliação de compatibilidade do painel foi calculado o erro entre as indicações fornecidas pelos instrumentos do painel digital em comparação ao painel analógico.

O procedimento de simulação foi análogo ao utilizado para calibração dos instrumentos, sendo que neste caso os dados coletados foram empregados para o cálculo do erro entre as medições.

### 4.2.1 *Climb*

O indicador *climb* digital não ofereceu resposta coerente com o indicador do painel analógico. Isto aconteceu devido à resolução do transdutor de pressão estática utilizado não oferecer resposta satisfatória, foram buscadas alternativas para troca do transdutor, mas devido ao custo e o tempo de transporte não foi possível trocá-lo, tendo em vista que todo material utilizado foi sucateado ou disponibilizado a um baixo custo, conforme já citado anteriormente. Desta forma, somente o indicador *climb* do painel analógico não oferece resposta satisfatória.

Devido à ocorrência desta discrepância, foram estudadas algumas alternativas que serão amadurecidas futuramente, estas alternativas são:

- utilização de um transdutor de pressão estática capacitivo de maior resolução, e como sua saída não compatível com o microcontrolador Arduino, deve-se utilizar também um conversor DC-DC (*Direct Current* – Corrente Contínua) para condicionar o sinal;

- aquisição via licitação de um transdutor de pressão estática piezoresistivo de maior resolução; e

- implementação de uma curva de resposta equivalente à taxa de variação de altitude adquirida pelo altímetro. Esta alternativa se torna viável pois uma curva é derivada da outra, pois velocidade de subida e descida é derivada da altitude, sendo possível a obtenção de curva de tendência do *climb* através de interpolação, sendo um método a ser estudado.

### 4.2.2 Altímetro

O erro comparativo obtido para o altímetro é apresentado na tabela 9, onde são apresentados também o erro de medição total e percentual.

Tabela 9 – Erro obtido para o indicador altímetro.

<b>ALTÍMETRO</b>			
<b>VALOR INDICADO PAINEL ANALÓGICO (ft)</b>	<b>VALOR INDICADO PAINEL DIGITAL ( ft)</b>	<b>ERRO DE MEDIÇÃO ( ft)</b>	<b>ERRO DE MEDIÇÃO (%)</b>
1000	995	-5	-0,50%
1500	1493	-7	-0,47%
2000	1998	-2	-0,10%
2500	2511	11	0,44%
3000	3031	31	1,03%
3500	3484	-16	-0,46%
4000	4019	19	0,48%
4500	4485	-15	-0,33%
5000	4997	-3	-0,06%
5500	5515	15	0,27%
6000	6002	2	0,03%
6500	6495	-5	-0,08%
7000	6995	-5	-0,07%
7500	7485	-15	-0,20%
8000	8018	18	0,23%
8500	8453	-47	-0,55%
9000	8994	-6	-0,07%
9500	9430	-70	-0,74%
10000	9975	-25	-0,25%
10500	10436	-64	-0,61%
11000	10900	-100	-0,91%
11500	11470	-30	-0,26%
12000	11900	-100	-0,83%
12500	12440	-60	-0,48%
13000	12900	-100	-0,77%
13500	13400	-100	-0,74%

Fonte: Autor.

A partir da tabela 9, conclui-se que os resultados de medição obtidos para o indicador altímetro foram satisfatórios, tendo em vista que o erro máximo obtido para toda a faixa analisada foi de 1,03 %. Desta forma, as indicações do painel digital seguiram de maneira fiel as indicações do painel analógico, permitindo sua utilização de maneira elucidativa para instrução e aplicações práticas correntes.

### 4.2.3 Velocímetro

O erro comparativo obtido para o velocímetro é apresentado na tabela 10, onde são apresentados também o erro de medição total e percentual, onde é possível verificar que o erro de medição acentua-se na faixa de medição de 0 a 50 kt, sendo este erro causado principalmente devido a esta faixa de medição do indicador analógico não ser exata, devido aos aspectos construtivos do instrumento. Desta forma, o erro para esta referida faixa não deve ser considerado, pois este erro obtido não se torna um fator impeditivo para utilização do painel como instrumento de instrução, tendo em vista que para as demais faixas analisadas o erro médio obtido foi em torno de -1,22 %.

Tabela 10 – Erro obtido para o indicador velocímetro

<b>VELOCÍMETRO</b>			
<b>VALOR INDICADO PAINEL ANALÓGICO (ft/min)</b>	<b>VALOR INDICADO PAINEL DIGITAL (ft/min)</b>	<b>ERRO DE MEDIÇÃO (ft/min)</b>	<b>ERRO DE MEDIÇÃO (%)</b>
0	1	1	--
30	28	-2	-6,67%
40	35	-5	-12,50%
50	45	-5	-10,00%
60	55	-5	-8,33%
70	65	-5	-7,14%
80	76	-4	-5,00%
90	87	-3	-3,70%
100	99	-1	-1,33%
110	110	0	-0,30%
120	121	1	1,11%
130	132	2	1,54%
140	142	2	1,43%
150	152	2	1,56%
160	162	2	1,25%
170	173	3	1,57%
180	183	3	1,48%

Fonte: Autor.

#### 4.2.4 Custos do projeto

O custo de confecção do projeto foi bem reduzido se comparados aos padrões de custo de equipamentos aeronáuticos, isto se tornou possível devido a quantidade de equipamentos utilizadas ser a maioria sucateada. Este custo detalhado pode ser visualizado na tabela 11.

Tabela 111 – Custos do projeto

ITEM	DESCRIÇÃO	CUSTO
INDICADOR VELOCÍMETRO	Instrumentos sucateados	R\$ 0,00
INDICADOR ALTÍMETRO		
INDICADOR CLIMB		
Transdutor de Pressão Estática (PB)	Transdutor sucateado	R\$ 0,00
Transdutor de Pressão Estática (PB)	Transdutor sucateado	R\$ 0,00
Microcontrolador	Arduino Uno R3	R\$ 50,00
Estrutura de Suporte	Placas de aço galvanizado	R\$ 60,00
Estrutura Frontal	Acrílico recortado e moldado	R\$ 100,00
Pintura	Tintas e solventes	R\$ 70,00
Conexões Anemométricas	Mangueiras e conectores sucateados	R\$ 0,00
Conexões Elétricas	Condutores e conectores sucateados	R\$ 0,00
Iluminação	Lâmpada LED, conectores, guias e chave	R\$ 40,00
<b>CUSTO TOTAL</b>		<b>R\$ 320,00</b>

#### 4.2.5 Aplicações do projeto

O projeto pode ter aplicações diversas em treinamentos e instruções, e a tabela 12 apresenta as aplicações do projeto.

Tabela 122 – Áreas de aplicação do projeto

CURSO	DISCIPLINA	CONTEÚDO	METODOLOGIA DE EMPREGO
<b>CURSO DE FORMAÇÃO DE PILOTOS DE AERONAVES</b>	Teoria de Voo de Helicópteros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introdução a Anemometria.</li> <li>- Conceitos Básicos de Instrumentos Anemométricos Analógicos e Digitais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Após a introdução teórica do conteúdo, através da inserção de pressão estática e total, permite a simulação de funcionamento dos instrumentos. Facilitando a assimilação dos conceitos explicados.</li> </ul>
<b>CURSO DE FORMAÇÃO DE GERENTES DE AERONAVES</b>			
<b>CURSO DE FORMAÇÃO DE MECÂNICOS DE AERONAVES</b>			
<b>CURSO DE FORMAÇÃO DE MECÂNICOS DE AVIÔNICOS</b>	Eletrônica Digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conversão Analógico-Digital.</li> <li>- Fundamentos de Aquisição de Dados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Explicação das etapas de conversão de um sistema analógico para digital: Amostragem, Quantização e Codificação.</li> <li>- Definição de Taxa de Amostragem</li> <li>- Apresentação dos Circuitos Componentes do Sistema através de demonstrações Práticas</li> <li>- Simulação de Panes</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barramento Digital em Aeronaves.</li> <li>- Protocolos de Comunicação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apresentação da dinâmica e os parâmetros de programação de um barramento</li> <li>- Demonstração da formação da Palavra de Dados de um barramento através de um osciloscópio</li> <li>- Simulação de Panes</li> </ul>

Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÃO

A frota de aeronaves da Aviação do Exército Brasileiro passa por um processo de modernização onde a concepção de seus sistemas deixa de ser analógica e passa a ser digital. Este processo introduz novos conceitos no curso de formação de mecânicos de aviônicos, ministrado pelo Centro de Instrução de Aviação do Exército. O enfoque deste trabalho foi facilitar a compreensão destes novos conceitos a um baixo custo de implementação e, para isso, apresenta as principais etapas do projeto e confecção de um Painel Anemométrico Analógico-Digital da aeronave AS550A2 FENNEC, a ser utilizado como meio de instrução.

A apresentação da arquitetura básica foi realizada na revisão bibliográfica, a partir da qual foi possível introduzir conceitos importantes para entendimento do projeto, de forma sequencial e didática.

A apresentação do embasamento teórico foi realizada com o estudo de todos os conceitos abrangidos no projeto, incluindo as regulamentações e dados vigentes. Sendo utilizadas fontes confiáveis como referência.

No decorrer da metodologia do trabalho foram apresentados os diagramas e desenhos confeccionados, que foram à base para o desenvolvimento e confecção do protótipo, sendo apresentadas as principais etapas de desenvolvimento, instalação. Durante estas etapas foi necessário um grande esforço devido à obtenção e confecção de suportes principalmente, de forma a obter o perfil mais adequado para enquadramento em instrução.

Um dos pontos principais do desenvolvimento do projeto foi à obtenção de curvas de tendência dos instrumentos através do processo de calibração. O que envolveu um grande tempo de envolvimento devido à complexidade da montagem exigida e análise de curvas, de forma a adequar aquela que melhor representasse o funcionamento de determinado instrumento.

Também foi apresentada uma análise detalhada da resposta dos instrumentos de indicação digital em relação aos instrumentos de indicação analógicos, a partir do cálculo do erro relativo entre elas. Sendo possível comparar quantitativamente o erro obtido para a indicação digital. Esta etapa envolveu determinados conhecimentos de estatística.

Também foi apresentada a aplicabilidade do trabalho nas diversas instruções e treinamentos atualmente ministrados, abrindo oportunidades de melhoria e de implementação de novos sistemas interativos de instrução através dessa tecnologia, com custo reduzido, conforme determinado também nos resultados do projeto.

Este projeto pode ser aprimorado em futuros trabalhos e, uma delas seria a utilização de interrupção no programa do microcontrolador, sendo possível assim obter uma taxa de amostragem igual à teórica calculada. A concepção deste tipo de arquitetura pode ser utilizada em outros sistemas da aeronave, como o do Grupo Turbomotor e o de Comandos de Voo, tendo em vista a dinâmica de ensino obtida e elucidação de conteúdos a serem ministrados nos treinamentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTÍMETRO. **El altímetro convencional y el ciclo de histéresis**. 2015. El vuelo de La Gran Avutarda. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/emilio/index.html>>. Acesso em: 29 de Julho de 2017.

ARDUINO. **Introduction to Arduino Microcontroller**. 2017. ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 08 de Agosto de 2017.

ARNIZAUT, Guilherme. **Sistema de Monitoramento e Registro de Dados para Apoio à Navegação de um Veículo Solar**. 2014. 115f. Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Elétrica. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014, Cap. 2, p. 24-29. Cap. 3, p. 29-34.

CROUZET. **Operator Manual**. 2017. Crouzet Automation. Disponível em: [www.crouzet-automation.com](http://www.crouzet-automation.com)>. Acesso em: 20 de Agosto de 2017.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Aviation Maintenance Technician Handbook**. ed. United States of America: Department of Transportation v.2, 2012, 564p.

FREITAS, C. M. **Protocolo Modbus: Fundamentos e Aplicações**. 2014. EMBARCADOS. Disponível em: < <https://www.embarcados.com.br/protocolo-modbus/> >. Acesso em: 18 de Agosto de 2017.

GOUVEIA, T. F.; NEVES, A. P. **Do Analógico ao Digital: Amostragem, Quantização e Codificação**. In: II Simpósio de Iniciação Científica da Universidade Federal do ABC. 2009. 3p. Santo André: UFABC, 2009.

HANGAR. **Altímetro – Noções Básicas**. 2010. Hangar do Heinz. Disponível em: < <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/emilio/index.html> Acesso em: 29 de Julho de 2017.



HELIBRAS. **Manual de Descrição de Funcionamento**. 2017. Helicópteros do Brasil. Itajubá-MG, 2017.

HOFFMANN, E. G. N. **Transdutores de Pressão de Silício**. 2016. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: < <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/emilio/index.html>>. Acesso em: 03 de Agosto de 2017.

HONEYWELL. **Interactive Catalog Replaces Pressure Sensors**. 2012. Honeywell Automation. Disponível em: < [http://www.mouser.com/ds/2/187/c15\\_41-740382.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/187/c15_41-740382.pdf)>. Acesso em: 10 de Junho de 2017.

HONEYWELL. **TrueStability Board Mount Pressure Sensor**. 2014. Honeywell Automation. Disponível em: <<http://www.mouser.com/ds/2/187/honeywell-sensing-trustability-ssc-series-standard-740340.pdf>>. Acesso em: 10 de Junho de 2017.

INDUSOFT. **Apostila Treinamento Básico: Indusfot Web Studio**. 2017. Disponível em: < <http://www.indusoft.com/Documentation> >. Acesso em: 17 de Agosto de 2017.

IPEV. Instituto de Pesquisas e Ensaio em Voo. Normatização para Confecção de Diagramas Elétricos. São José dos Campos: DCTA, 2011. 6p.

JOLY, M. C. R. A. **A tecnologia no ensino: implicações para a aprendizagem**. São Paulo: Casa do Psicólogo, 2002. 162p.

MCROBERTS, MICHAEL. **Arduino Básico**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2011.

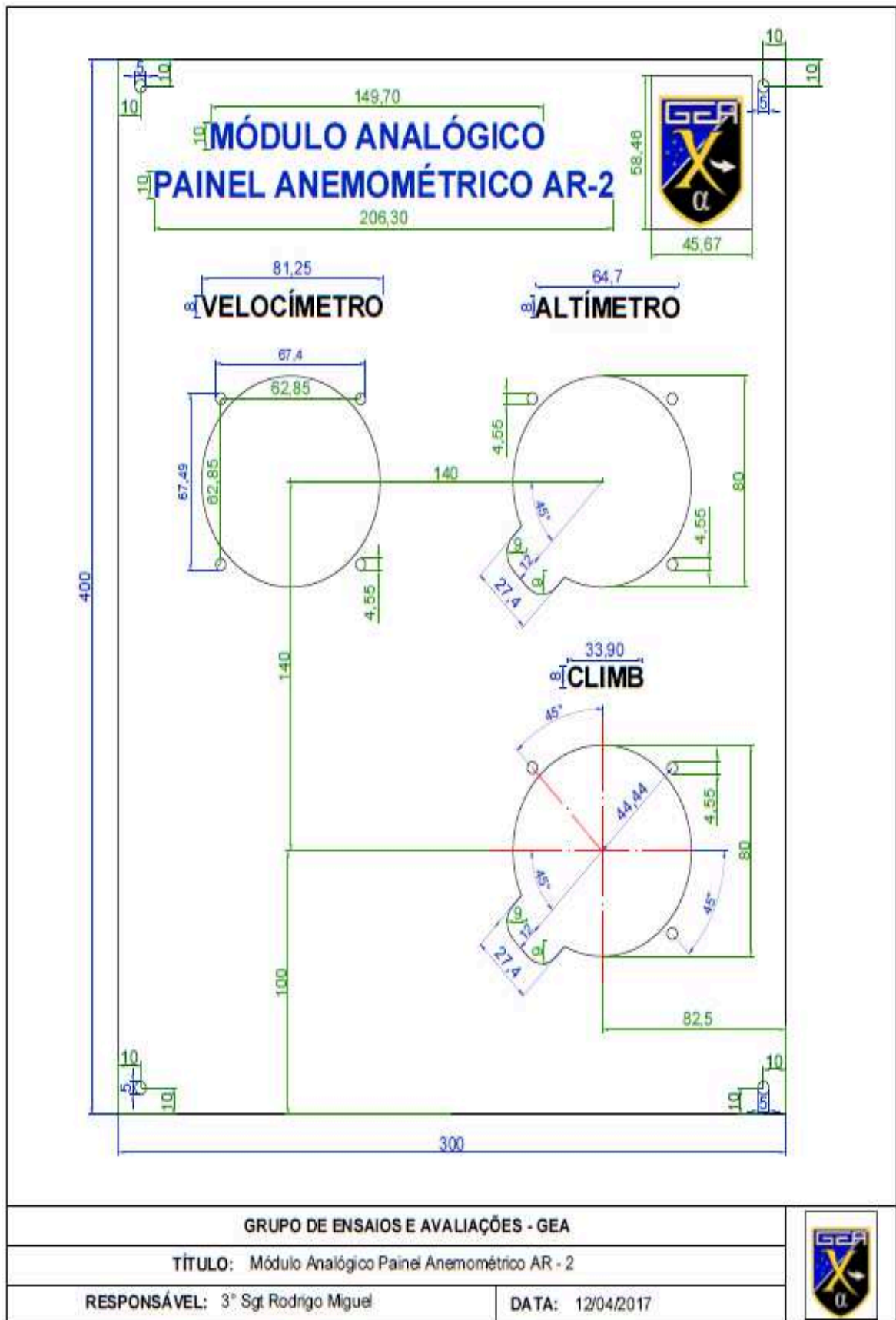
PUHLMANN, H. **Trazendo o Mundo Real para dentro do Processador: Conversor A/D**. 2015. EMBARCADOS. Disponível em: < <https://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/> >. Acesso em: 17 de Agosto de 2017.

SANTOS, L. B.; MASSELLI Y. C. M. **Sistemas Supervisórios para Controlador Arduino**. 2014. Inatel, Santa Rita do Sapucaí. Disponível em: < [www.inatel.br/biblioteca/pos-seminarios/seminario-de-automacao-industrial-e-sistemas-eletronicos/sistemas-supervisorios-para-controlador-arduino](http://www.inatel.br/biblioteca/pos-seminarios/seminario-de-automacao-industrial-e-sistemas-eletronicos/sistemas-supervisorios-para-controlador-arduino)>. Acesso em: 17 de Agosto de 2017.

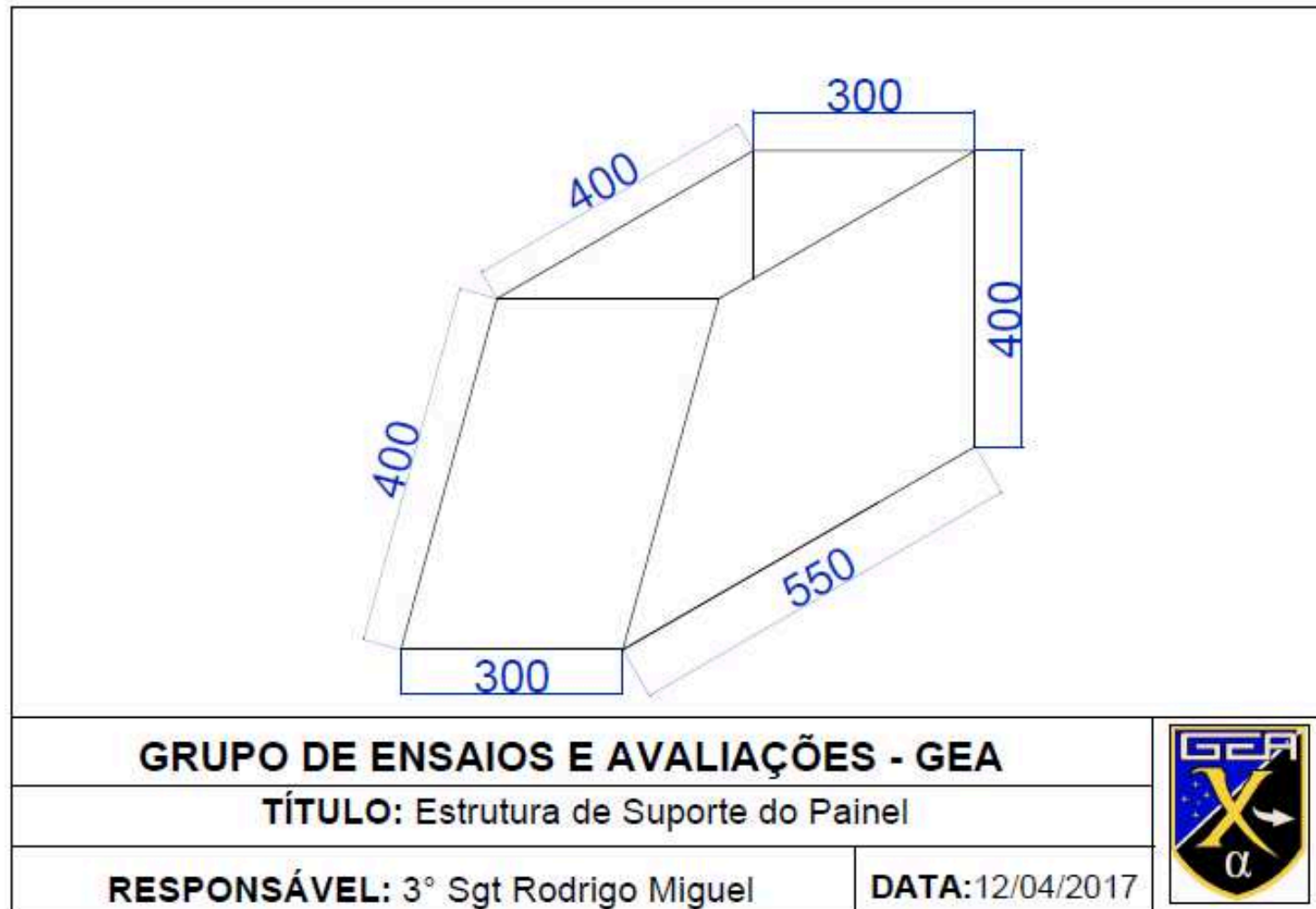
SOUZA, F. **Arduino UNO**: Taxa de Amostragem do Conversor A/D. 2014. EMBARCADOS. Disponível em: < <https://www.embarcados.com.br/arduino-taxa-de-amostragem-conversor-ad/> >. Acesso em: 17 de Agosto de 2017.

TOOLEY, M. **Aircraft Digital Electronic and Computer Systems**: Principles, Operation and Maintenance. United States of America: Elsevier, 2007. 209p.

**ANEXO A – PROJETO PAINEL DE ACRÍLICO**



## **ANEXO B – PROJETO DA ESTRUTURA DE SUPORTE DO PAINEL**



## **ANEXO C – DIAGRAMA ELÉTRICO**

