

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON CARLOS RIBEIRO BATISTA

**AQUISIÇÃO ELETRÔNICA DE DADOS EM UNIDADE
EXPERIMENTAL DE LEITO FLUIDIZADO**

SANTOS/SP
2018

ANDERSON CARLOS RIBEIRO BATISTA

**AQUISIÇÃO ELETRÔNICA DE DADOS EM UNIDADE
EXPERIMENTAL DE LEITO FLUIDIZADO**

Dissertação submetida à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Sob a orientação da Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes e do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

**SANTOS/SP
2018**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

660.284292 - B336a

Batista, Anderson Carlos Ribeiro.

Aquisição Eletrônica de Dados em Unidade Experimental de Leito Fluidizado/Anderson Carlos Ribeiro Batista - 2018.
81 p.

Orientador: Dra. Marlene Silva de Moraes.

Orientador: Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,
SP, 2018.

1. Leito Fluidizado. 2. Instrumentação Eletrônica de Baixo custo
3. Arduino Uno.

I. Moraes, Marlene S.de

II. Moraes Jr, Deovaldo de

II. Aquisição Eletrônica de Dados em Unidade Experimental
de Leito Fluidizado.

Elaborada pelo SIBI – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta.

Dedico este trabalho à minha amada mãe, Rita de Cássia Ribeiro, por ter renunciado a sua vida por mim e aos meus avós, José Carlos Ribeiro (“in memoriam”) e Joana do Prado Ribeiro Ferreira, por tecerem meu futuro antes mesmo de eu ter nascido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente a **Deus** pela magia da vida.

À Professora Dra. Marlene da Silva Moraes, por todas as lições.

Ao Professor Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, por toda dedicação e altruísmo.

Aos meus tios Elimar Rodrigues Alexandre e Iria Ribeiro Neto Alexandre, por toda a inspiração.

À equipe do Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília: Volnei de Lemos, Vitor Dias de Paula, Álvaro Luiz Moreira Conrado e Irineu Penha da Ressureição pelo apoio técnico na adaptação da unidade experimental.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP).

A todos que contribuíram de alguma forma com este trabalho.

Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo. (Martin Luther King Jr.)

RESUMO

O sistema de fluidização é utilizado por indústrias dos ramos de alimentos, químicas e petroquímicas, em diversos processos, tais como: torrefação do café, secagem de alimentos, produção de fármacos e o beneficiamento do petróleo. A utilização de sistemas de Leito Fluidizado em meios industriais apresenta como problemática a quantificação da perda de carga, que pode ser entendida como a diferença de pressão entre os pontos de entrada e de saída de fluido. A unidade experimental de Leito Fluidizado utilizada pela Universidade Santa Cecília, apresenta os valores de perdas de cargas de forma mecânica, através de um manômetro em “U”, e os valores de vazão, pela técnica da massa pela unidade de tempo, trazendo dessa forma, certa instabilidade para os resultados e um elevado tempo de coleta de dados. Por esta razão, o estudo teve por objetivo geral implementar um sistema de aquisição de dados de baixo custo para a supracitada unidade de fluidização. Os objetivos específicos foram aplicar um microcontrolador dedicado (microcontrolador com funções pré-definidas) e comparar os dados obtidos de forma eletrônica com os dados obtidos de forma mecânica. A pesquisa investigou, além da perda de carga do sistema em operação, as velocidades máximas e mínimas de fluidização. Basicamente o experimento se desenvolveu através das variações das massas das partículas fluidizantes (amostras), de 120 g para 130 g e, posteriormente, 150 g. As análises dos parâmetros da pesquisa foram realizadas por duas ferramentas, a *priori* houve os ensaios mecânicos (triplicata) e *posteriori* os ensaios eletromecânicos (triplicata), considerando em ambos os casos condições externas, como, por exemplo, a variação da temperatura de ensaio e a umidade relativa do ar. Como método de estudo, durante os ensaios, foram obtidos 6 pontos de análises, 2 durante os estados de leito fixo, 1 no início da fluidização, 2 durante o estado de Leito Fluidizado e, por fim, 1 ponto durante o estado de transporte de partículas. Com relação aos resultados, os dados de perdas de cargas relativos aos ensaios eletrônicos se aproximaram em todos os estudos aos dados de perdas de cargas quando ensaiados de forma mecânica, apresentando erro de 6%. Enquanto que os valores de velocidades máximas e mínimas de fluidização obtidos de forma eletrônica apresentaram erro de 5% em relação aos resultados obtidos de forma mecânica; Ainda o tempo útil necessário para a coleta de dados de forma eletrônica foi, no mínimo, vinte vezes menor do que o tempo necessário para a coleta de dados de forma mecânica.

Palavras - chave: Leito Fluidizado. Instrumentação Eletrônica de Baixo Custo. Arduino Uno.

ABSTRACT

The fluidization system is used by industries in the food, chemical and petrochemical sectors in various processes, such as: roasting coffee, drying food, producing drugs and oil processing. The use of fluidized bed systems in industrial environments presents as problematic the quantification of the pressure drop, which can be understood as the pressure difference between the inlet and outlet points of the fluid. Currently, the experimental unit of fluidized bed used by the Santa Cecília University, provides the values of losses of loads in a mechanical way, through a manometer in "U", and the values of flow, by the mass technique by the unit of time, bringing thus, a certain instability for the results and a high time of data collection. For this reason, the general objective of the study was to implement a low cost data acquisition system for the aforementioned fluidization unit. The specific objectives were to apply a dedicated microcontroller (microcontroller with predefined functions) and to compare the data obtained electronically with the data obtained mechanically. The research investigated, in addition to the loss of load of the system in operation, the maximum and minimum fluidization velocities. Basically the experiment was developed through the mass variations of the fluidizing particles (samples), from 120 g to 130 g and, subsequently, 150 g. The analysis of the parameters of the research was carried out by two tools, a priori were the mechanical tests (triplicate) and posteriori the electromechanical tests (triplicate), considering in both cases external conditions, as for example the variation of the test temperature and the relative humidity of the air. As a study method, 6 test points were obtained during the tests, 2 during fixed bed states, 1 at the beginning of fluidization, 2 during the fluidized bed state, and finally 1 point during the transport state of particles. Regarding the results, the data of losses of loads relative to the electronic tests approached in all the studies of the data of losses of loads when tested mechanically, presenting a 6% error. While the values of maximum and minimum fluidization velocities obtained electronically presented a 5% error in relation to the results obtained mechanically; Even the time required for electronic data collection was at least twenty times less than the time required for the data collection mechanically.

Key - words: Fluidized Bed. Low Cost Eletronic Instrumentation. Arduino Uno.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de secadores de Leito Fluidizado.....	20
Figura 2 - Representação esquemática de um leito de partículas em estado estacionário.	21
Figura 3 - Curva representativa da perda de carga em função da velocidade de fluidização.	22
Figura 4 - Manômetro em “U” aplicado em Leito Fluidizado.....	25
Figura 5 - Tubo de Pitot.....	27
Figura 6 - Faixa de operação admissível para os transdutores.....	29
Figura 7 - Representação da linearidade ideal para um transdutor.....	30
Figura 8 - Representação esquemática da estrutura cristalina do germânio e do silício.	31
Figura 9 - Estrutura interna do transdutor de pressão piezoresistivo.	32
Figura 10 - Circuito Elétrico Ponte de Wheatstone.....	33
Figura 11 - Representação do Circuito Ponte de Wheatstone por meio de divisores de tensão.....	33
Figura 12 - Vista interna do transdutor de vazão.....	36
Figura 13 - Vista geral da unidade experimental “Leito Fluidizado”.....	39
Figura 14 - Unidade experimental.	40
Figura 15 – Sensores: Pressão diferencial (A) e; Vazão volumétrica (B).	41
Figura 16 - Principais conexões do Arduino Uno..	42
Figura 17 - Componentes e conexões do Arduino Uno.....	43
Figura 18 – Diagrama de ligações 1: Arduino Uno (A) e LCD (B) - <i>Liquid Crystal Display</i> (Visor de Cristal Liquido), modelo Shield LCD 16x2.	44
Figura 19 – Diagramas de ligações 2: Arduino Uno - Módulo <i>Bluetooth</i> (modelo HC - 05 (C)) e detalhamento de instalação (D).	45
Figura 20 - Instrumentos auxiliares de medida.....	46
Figura 21 - Detalhamento da instrumentação eletrônica da unidade experimental...	49
Figura 22 - Vista geral da unidade experimental instrumentada (sensores).	49
Figura 23 - Projeto eletrônico.	50
Figura 24 - Protótipo eletrônico.	51
Figura 25 - Interface de programação do Arduino Uno.	51
Figura 26 - Planilha de aquisição de dados PLX - DAQ.....	52

Figura 27 - Polinômio de terceiro grau.	53
Figura 28 - Matriz de Vandermonde.	54
Figura 29 - Ensaio Mecânico 1 - Massa total das esferas de vidro de 130 g.	55
Figura 30 - Ensaio Mecânico 2 - Massa total das esferas de vidro de 130 g (duplicata).....	56
Figura 31 - Ensaio Mecânico 3 - Massa total das esferas de vidro igual a 130 g (triplicata).....	56
Figura 32 - Ensaio Mecânico 4 - Massa total das esferas de vidro de 140 g.	57
Figura 33 - Ensaio Mecânico 5 - Massa total das esferas de vidro de 140 g (duplicata).....	57
Figura 34 - Ensaio Mecânico 6 - Massa total das esferas de vidro de 140 g (triplicata).....	58
Figura 35 - Ensaio Mecânico 7 - Massa total das esferas de vidro de 150 g.	58
Figura 36 - Ensaio Mecânico 8 - Massa total das esferas de vidro de 150 g (duplicata).....	59
Figura 37- Ensaio Mecânico 9 - Massa total das esferas de vidro de 150 g (triplicata).....	59
Figura 38 - Ensaio Eletrônico 10 - Massa total das esferas de vidro de 130 g.....	60
Figura 39 - Ensaio Eletrônico 11 - Massa total das esferas de vidro de 140 g.....	60
Figura 40 - Ensaio Eletrônico 12 - Massa total das esferas de vidro de 150 g.....	61
Figura 41 - Comparativos dos ensaios mecânicos e eletrônicos (perda de carga em Leito Fluidizado).	63
Figura 42 - Comparativos dos ensaios mecânicos e eletrônicos (velocidade mínima de fluidização).	64
 Figura A 1 - Desenvolvimento do circuito eletrônico: (A) Conexões utilizando protoboard; (B) Conexões utilizando trilhas.....	 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos dirigidos aos sistemas de Leito Fluidizado.	16
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da utilização do sistema de Leito Fluidizado.	19
Tabela 3 - Tipos de pressão.....	24
Tabela 4 - Principais unidades de um microcontrolador.....	36
Tabela 5 – Quantidade de memória - ATmega 328	38
Tabela 6 - Características da unidade experimental.	40
Tabela 7 - Sensor de vazão – Efeito <i>Hall</i> YFS201.	42
Tabela 8 - Sensor de pressão - MPX 5010 DP	42
Tabela 9 - Especificações técnicas do Arduino Uno.	43
Tabela 10 - Parâmetros utilizados durante os ensaios mecânicos.....	48
Tabela 11 - Coleta e tratamento matemático de dados.....	48
Tabela 12 - Conexões sensores - plataforma.....	50
Tabela 13 - <i>Software</i> de aquisição e de processamento de dados.	53
Tabela B 1 - Resultados dos cálculos analíticos para a massa de 130 g de esfera de vidro.....	73
Tabela B 2 - Resultados dos cálculos analíticos para a massa de 140 g de esfera de vidro.....	74
Tabela B 3 - Resultados dos cálculos analíticos para a massa de 150 g de esfera de vidro.....	75
Tabela B 4 - Resultados Obtidos durante os ensaios eletrônicos.....	76
Tabela 1, anexo I - Procedimentos de Instalação do Arduino Uno.....	77
Tabela 2, anexo III - Procedimentos de Instalação do PLX - DAQ.....	80
Tabela 3, anexo IV - Cronograma Financeiro.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_A	peso específico da água
γ_T	peso específico do tetracloreto de carbono
W'_h	o trabalho de eixo
W_m	vazão mássica (Kg/h)
f_n	função correspondente ao enésimo ponto
f_0	função correspondente ao ponto x_0
l_w	perda de carga (Pa)
ΔV_b^2	variação da velocidade;
A	corrente (Ampère)
f	frequência (<i>Hertz</i>)
f_c	frequência de corte (Hz)
FCC	Craqueamento Catalítico Fluidizado (<i>Fluid Catalytic Cracking</i>)
G	ganho $\left(\frac{\text{Volts}}{\text{Volts}}\right)$; Adimensional
GND	<i>Ground</i> (terra - ausência de tensão)
H_{tetra}	desnível do tetracloreto de carbono (cm)
IF	início da fluidização
C	constante de descarga do tubo de Pitot (variável dependente das características construtivas do instrumento)
LCD	Visor de Cristal Líquido (<i>Liquid Crystal Display</i>)
LF	leito fixo
L_{leito}	altura do leito (cm)
mA	<i>miliampère</i>
m_{coletada}	massa de água coletada (g)
MHz	frequência (<i>megahertz</i>)
mV	tensão (<i>millivolts</i>)
PLX – DAQ	<i>Parallax Data Acquisition</i>
Q	vazão volumétrica (m ³ /h)
R	resistência elétrica (Ω)
t	tempo (h)
TCC	Craqueamento Catalítico Termofor (<i>Thermofor Catalytic Cracking</i>)
TH	Transporte Hidráulico
U_{fm}	velocidade mínima de fluidização (m/h)

USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V	tensão (Volts)
V_{cc}	tensão de alimentação (Volts)
V_e	velocidade de escoamento de um fluido (m/h)
V_L	volume (m ³)
V_p	velocidade de escoamento medido com tubo de Pitot (m/h)
W	constante de equalização de perturbações (coeficiente de correção de perturbações externas durante o regime de fluidização)
ΔP	perda de carga em Leito Fluidizado (Pa)
Δp	variação de pressão
ρ	densidade da água (g/cm ³)
ρ_f	densidade do fluido (g/cm ³)
a	coeficientes complexos
g	gravidade
m	grau ou ordem de um polinômio
x	variáveis complexas
Δz	desnível

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Generalidades.....	16
1.2	Objetivos.....	17
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	Leito Fluidizado – Contextualização	18
2.2	Leito Fluidizado – Fluidodinâmica.....	21
2.3	Perda de carga e velocidade de escoamento de fluido em tubo de Pitot....	24
2.3.1	Fundamentações iniciais.....	24
2.3.2	Perda de Carga.....	25
2.3.3	Velocidade de Escoamento em Leito Fluidizado	27
2.4	Instrumentação Eletrônica	29
2.4.1	Transdutores.....	29
2.4.1.1	Propriedade dos Transdutores	29
2.4.2	Transdutores de Pressão Diferencial	30
2.4.3	Transdutor de Vazão Volumétrica.....	35
2.5	Eletrônica Embarcada.....	36
2.5.1	Arduino Uno	37
2.5.2	<i>Display</i>	38
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1	Material.....	39
3.1.1	Sensores Eletrônicos.....	41
3.1.2	Unidade de Processamento de Sinais.....	42
3.1.3	Componentes Eletrônicos Periféricos.....	44
3.1.4	Instrumentos de Medidas.	46
3.2.2	Ensaio Eletrônico	49
3.3	Análise Estatística dos Resultados	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Resultados dos Ensaio Mecânicos.....	56
4.2	Resultados dos Ensaio Eletrônicos	61
4.3	Discussão	63
5.	CONCLUSÕES.....	66
6.	SUGESTÕES.....	67
7.	REFERÊNCIAS.....	68
	APÊNDICE A.....	72
	APÊNDICE B.....	73

ANEXO I.....77

ANEXO II.....78

ANEXO III.....80

ANEXO IV81

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Os equipamentos de Leito Fluidizado proporcionam altas transferências de calor e de massas entre os fluidos (líquidos ou gasosos) e os sólidos (partículas fluidizantes), e por essa principal razão, são largamente empregado na indústria. Esta técnica pode ser caracterizada como o processo em que as partículas fluidizantes adquirem energia mecânica por força de um fluxo ascendente de fluido.

Na indústria, o sistema de Leito Fluidizado encontra inúmeras aplicações, dentre as quais estão os processos de secagem de sólidos e o craqueamento do petróleo. Todavia, essas aplicações nem sempre são eficientes, gerando altos custos com energia.

Na Tabela 1 apresenta-se um rol de publicações a respeito do sistema de Leito Fluidizado, onde as discussões correlatas à perda de carga, às velocidades máxima e mínima de fluidização e ao custo do processo podem ser otimizadas com a implementação de sistemas eletrônicos (microcontroladores dedicados, com funções predefinidas).

Nesse contexto, visando melhorar a gestão, a eficiência e a competitividade de novos produtos, as empresas têm apostado cada vez mais em novas tecnologias (*hardwares*).

Tabela 1 - Estudos dirigidos aos sistemas de Leito Fluidizado

Tema	Fonte
Eficiência na remoção de NAT, DBO e DQO utilizando reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos associado ao decantador de coluna em uma produção intensiva de tilápia.	MATSUMOTO, 2016
Precipitação química de estruvita: Recuperação de nutrientes em reator cônico de leito fluidizado utilizando magnésio industrial de baixo custo.	CASTRO, 2015
Transferência de oxigênio em reatores de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos em meios bifásico e trifásico com variação da relação entre diâmetros	ARAÚJO, 2010
Modelagem e Simulação de um Leito Fluidizado: Um Estudo Comparativo.	HODAPP, 2009

Continua

Tabela 1 - Estudos dirigidos aos sistemas de Leito Fluidizado (continuação).

Tema	Fonte
Influência da imobilização de biomassa e do tamanho da partícula na fluidodinâmica de um reator anaeróbio de leito fluidizado.	FREIRE, 2008
Aerodinâmica de leitos vibrofluidizados: uma revisão	PARK, 2006
Desempenho de um Reator Aeróbico de Leito Fluidizado no Tratamento de Esgoto Sanitário.	GERABA, 2006

Fonte: Matsumoto, 2016; Castro, 2015; Araújo, 2010; Hodapp, 2009; Freire, 2008; Park, 2006; Geraba, 2006.

1.2 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo geral implementar um sistema de instrumentação eletrônica em uma unidade experimental de Leito Fluidizado.

O estudo visou, como objetivos específicos:

- I. Desenvolver funções lógicas para um microcontrolador (linhas de códigos) como ferramenta para se otimizar o processo de fluidização com esferas de vidro.
- II. Relacionar as curvas obtidas por meio dos ensaios mecânicos e eletrônicos da perda de carga em função da velocidade ascendente de fluido (água).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Leito Fluidizado – Contextualização

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), a primeira aplicação em larga escala de um sistema de Leito Fluidizado ocorreu no ano de 1922 em uma planta de gaseificação de carvão. A Primeira Guerra na Europa despertou o interesse pelo desenvolvimento de novos processos industriais, em decorrência das necessidades quanto à utilização de tipos específicos de combustíveis.

No início do século XX, o sistema de Leito Fluidizado se mostrou como uma tecnologia sólida dentro da indústria petroleira. Nesse período inicial de desenvolvimento, o custo do beneficiamento do petróleo era elevado, tornando a produção de derivados desvantajosa, principalmente em aplicações que utilizassem o leito fixo, em consequência do catalisador precisar ser regenerado, além de outras dificuldades, como por exemplo, o controle de altas temperaturas.

Visando o desenvolvimento de tal tecnologia, tornando-a mais vantajosa, surgiu o *Thermoform Catalytic Cracking* ou Craqueamento Catalítico Termofor (TCC), composto por dois leitos interligados, o primeiro com a função de reator e o segundo com a função de regenerador (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

O craqueamento catalítico em larga escala para a fabricação do querosene deu início ao processo de modernização industrial, através da implantação de circuitos de transporte pneumático; Esses circuitos envolviam Leitos Fluidizados além das linhas de transporte, tecnologia essa que ficou conhecida como *Fluid Catalytic Cracking* ou Craqueamento Catalítico Fluidizado (FCC).

No ano de 1942 surgiu nos Estados Unidos a primeira unidade comercial de FCC, provocando uma corrida comercial que enfrentou sérios problemas além da necessidade de regenerar o catalisador, como a erosão das linhas de transporte e aeração do leito (LLOYD, 2011).

Os sistemas de Leito Fluidizado encontraram algumas utilidades fora da indústria do petróleo, com destaque para os processos de secagem de pós e grãos. Kunii e Levenspiel (1991) citam algumas vantagens e desvantagens quanto à utilização do sistema de Leito Fluidizado, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da utilização do sistema de Leito Fluidizado.

Vantagens	Desvantagens
Rápida mistura dos sólidos a condições quase que isotérmicas, facilitando a operação e controle do equipamento.	Dificuldade para se descrever o fluxo do fluido, com grandes desvios do escoamento, <i>plug – flow</i> e com <i>by-pass</i> de sólidos devido à formação de bolhas
A circulação de sólidos entre dois leitos fluidizados possibilita o transporte de grandes quantidades de calor, necessário em reatores em larga escala.	A rápida mistura dos sólidos no leito conduz a um tempo de residência não uniforme dos sólidos nos reatores
O sistema pode ser adaptado para aplicações em larga escala.	Sólidos finos são pulverizados e entram para a fase gasosa devendo ser substituídos
A transferência de massa e calor entre o fluido e os sólidos é elevada.	Erosões dos tubos por abrasão de partículas
A transferência de calor dentro do leito é elevada, consequentemente as trocas de calor nos leitos fluidizados requerem áreas superficiais de contato relativamente pequenas.	Para operações não catalíticas a altas temperaturas existe a aglomeração de partículas finas que podem exigir um abaixamento de temperatura para a operação

Fonte: Kunii e Levenspiel, 1991.

A escolha do equipamento adequado para cada processo de secagem é uma função direta do tipo e da quantidade de material em que se empregará o sistema (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

Alguns tipos de secadores estão representados na Figura 1.

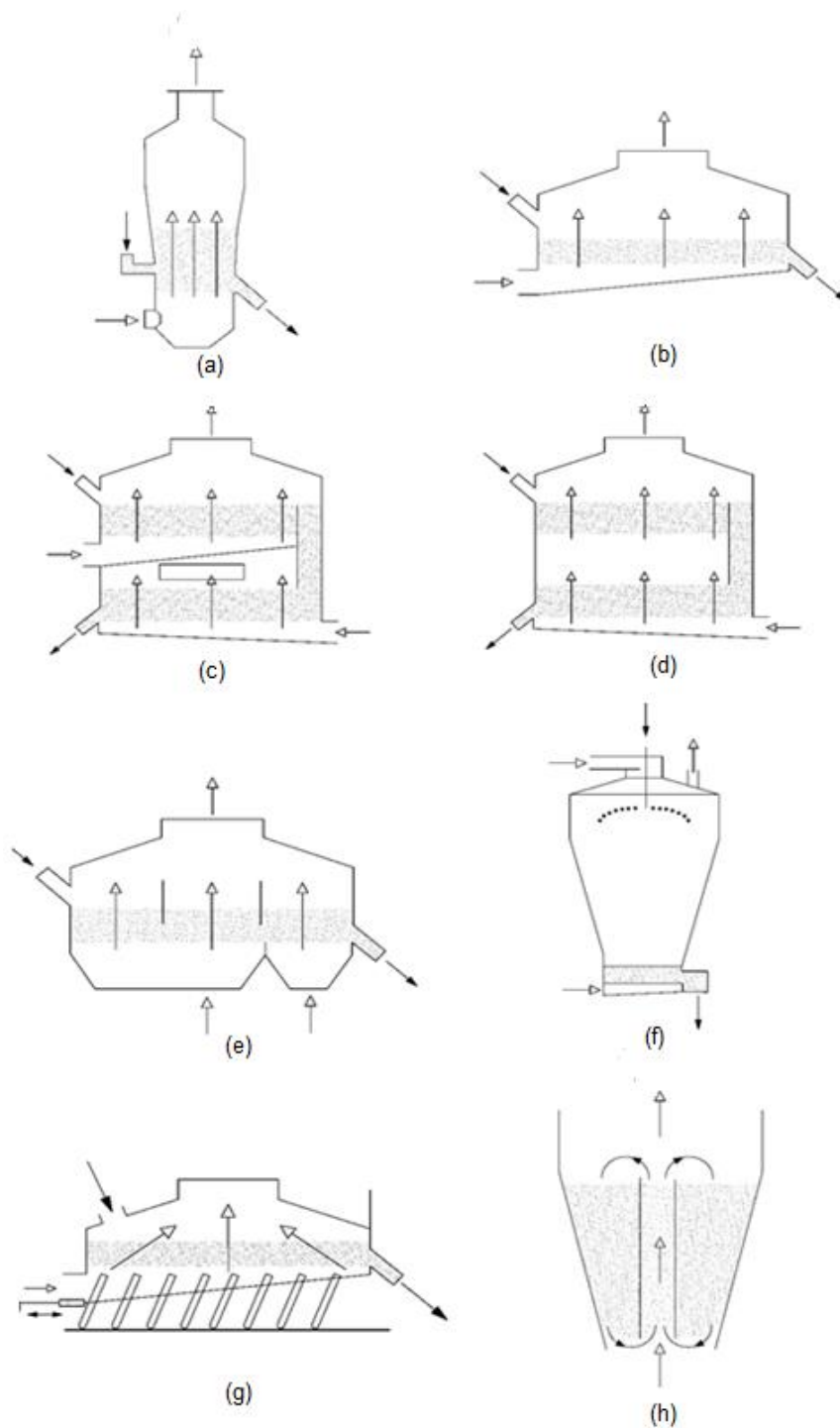


Figura 1 - Tipos de secadores de Leito Fluidizado: (a) Câmara convencional; (b) Fluxo pistonado de estágio simples; (c) Duplo estágio com correntes de ar independentes; (d) Duplo estágio contracorrente; (e) Múltiplos estágios com chicanas; (f) Fluidização pós- atomização; (g) Vibro – fluidização; (h) leito de jarro.

Fonte: Kerkhof, 1996.

Ao se trabalhar com projetos, há a necessidade de aproveitar ao máximo os pontos positivos oferecidos pelo sistema (Leito Fluidizado), principalmente com relação à escolha dos equipamentos, com a intenção de que esses pontos positivos se sobressaíam em relação aos seus pontos negativos (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

2.2 Leito Fluidizado – Fluidodinâmica

O leito de fluidização pode ser entendido como um substrato de partículas homogêneas depositadas linearmente sobre um distribuidor de fluxo, conforme Figura 2.

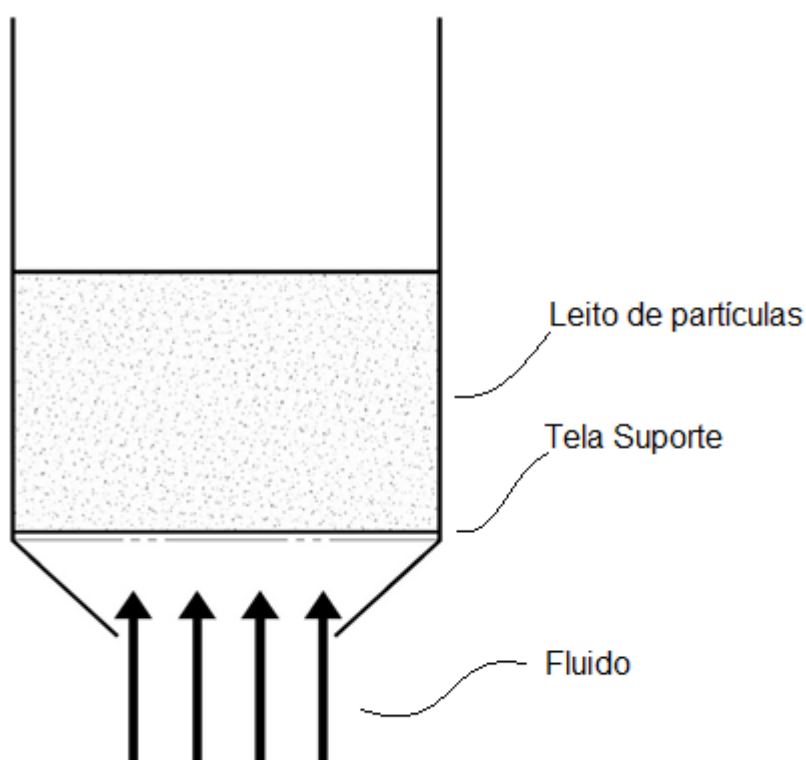


Figura 2 - Representação esquemática de um leito de partículas em estado estacionário.
Fonte: Nitz e Guardani, 2008.

Na Figura 3 têm-se a curva da perda de carga em função da velocidade de fluidização.

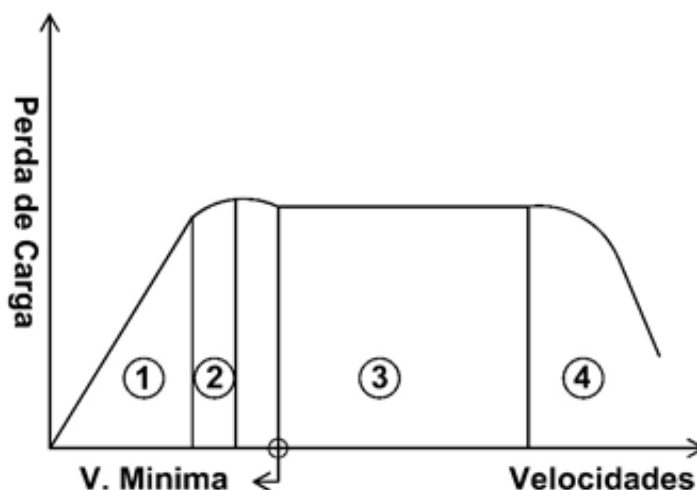


Figura 3 - Curva representativa da perda de carga em função da velocidade de fluidização: (1) Leito fixo; (2) Leito em expansão; (3) Leito fluidizado; (4) Leito Móvel.
Fonte: Teixeira, 2017.

Em observação à Figura 3, em um instante inicial (região 1; Figura 3), o fluxo ascendente de fluido (água) apenas percola por entre os espaços vazios deixados pelos materiais depositados, sem promover agitação, possibilitando que o leito permaneça em estado estacionário; O leito estacionário é caracterizado pelo fácil controle e, nesse estado as tubulações não sofrem desgastes, em decorrência da baixa velocidade do fluido de entrada e da alta queda de pressão (GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

Em um segundo instante (região 2; Figura 3), o material começa a adquirir velocidade e energia mecânica em consequência do aumento progressivo da velocidade do fluido de entrada, nesse momento, as esferas tendem a se separar e o leito alcança o estado de expansão; Essa região é conhecida como a fase de grandes instabilidades, é onde os maiores gradientes de perda de carga são atingidos (GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

Com o incremento da vazão do fluido de entrada, atinge a velocidade

mínima para o início da fluidização, ou seja, o estado de fluidização incipiente; A fluidização mínima é alcançada quando a somatória das forças impostas pelo fluido ascendente se iguala à força peso total das partículas fluidizantes (GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

Com o aumento progressivo da velocidade, chega - se ao regime de fluidização borbulhante, que ocorre entre o estado da fluidização incipiente e o estado da fluidização turbulenta. Admite-se que quando o leito é constituído por pequenas partículas, com densidade menor que $1,44 \text{ g/cm}^3$, ocorre uma considerável expansão desse material no interior do tubo, antes de surgirem as bolhas e em contrapartida, no caso em que as partículas são mais densas, entre $1,44 \text{ g/cm}^3$ e 4 g/cm^3 , a expansão do leito continua com o mesmo módulo apresentado durante a fluidização incipiente e as bolhas surgem no instante em que é alcançada a velocidade de mínima fluidização (GELDART, 1973).

No estágio da fluidização turbulenta, as oscilações de queda de pressão diminuem devido ao desaparecimento das bolhas e dos espaços vazios; Esse estado precede ao regime do leito de arraste, também conhecido como regime de fluidização rápida (BI *et al.*, 2000).

Os estados de fluidização incipiente - borbulhante e turbulenta delimitam o estado de Leito Fluidizado (região 3; Figura 3), fase onde a variação da perda de carga é ascensional, porém desprezível, em razão do coeficiente angular que descreve o comportamento desse período tender a zero; Em contrapartida a alta transferência de calor e massa, características dessa fase, existe a necessidade de constantes inspeções a partes mecânicas, devido a eventuais desgastes por atritos (GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

Quando a velocidade terminal de sedimentação das partículas é atingida, ocorre o início do arraste das esferas e, em seguida têm - se o estado de leito móvel (região 4; Figura 3); Nesse estado (leito móvel), diminuem os gradientes de perda de carga, é reduzida a formação de canal preferencial, aumentando o contato superficial entre sólido e fluido (GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

Segundo Gupta e Sathiyamoorthy (1999), no estado de leito móvel podem ocorrer às quebras das partículas fluidizantes e as inspeções quanto ao desgaste de partes mecânicas devem ser redobradas.

2.3 Perda de carga e velocidade de escoamento de fluido em tubo de Pitot

2.3.1 Fundamentações iniciais

Ao se aplicar uma determinada força perpendicular à superfície plana de um corpo, constitui-se a grandeza física escalar denominada por pressão (SCHNEIDER, 2000).

Desta forma, quando um fluido escoar, devido ao atrito entre as suas partículas e as paredes de um recipiente de contenção, ocorre o fenômeno da redução de pressão, ou seja, a perda de carga devido à energia desperdiçada (WHITE, 2002).

Em sistemas de controle de processos, as perdas de carga inerentes ao fluxo de fluidos em tubulações e em equipamentos são constantemente monitoradas, pois através desses gradientes, é possível se inferir outras variáveis de processo, tais como o nível, o volume, a vazão e a densidade (CASSIOLATO, 2008).

É comum em análises de campo ocorrer erro na coleta de uma amostra de pressão.

Classificam-se os tipos de pressão na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de pressão.

Pressões	Descrição	Referência
Pressão Diferencial	A pressão diferencial é a resultante entre duas tomadas de pressões, tendo como referência um ponto comum.	CASSIOLATO, 2008
Pressão Manométrica	A pressão manométrica é proporcional à diferença entre a pressão medida e a pressão atmosférica.	
Pressão Absoluta	A pressão absoluta adota o vácuo como padrão de referência.	
Pressão Estática	A pressão estática representa a pressão termodinâmica, e é aferida sem que o fluido esteja em movimento.	SCHNEIDER, 2000
Pressão dinâmica	A pressão dinâmica leva em consideração a energia cinética do fluido, ou seja, sua massa e velocidade de escoamento.	

Fonte: Cassiolato, 2008; Schneider, 2000.

2.3.2 Perda de Carga.

O ponto crítico no estudo de sistemas de Leito Fluidizado é mensurar a perda de carga que o fluido sofre ao passar pelo leito de partículas em processo de fluidização (DIAS, 2011).

Este gradiente pode ser verificado com o emprego de um manômetro em “U”, instrumento utilizado para medir baixos níveis de pressão (MORAES & MORAES, 2014).

Apresenta-se na Figura 4 o esboço de um manômetro “U” acoplado a um Leito Fluidizado.

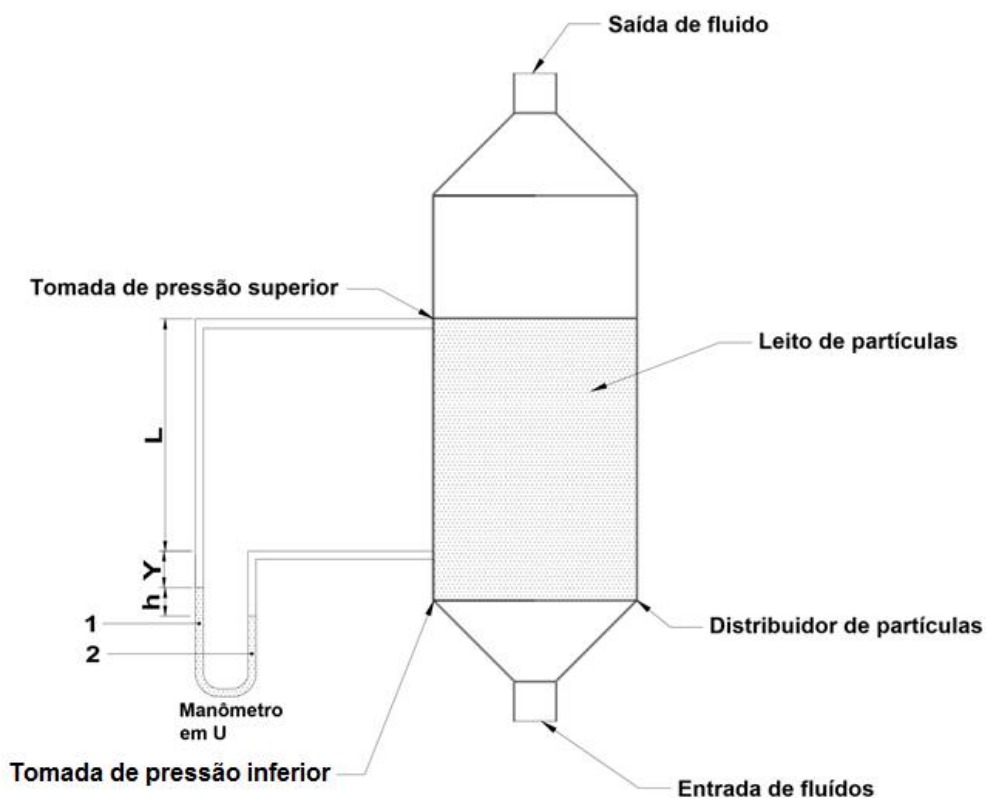


Figura 4 - Manômetro em “U” aplicado em Leito Fluidizado.

FONTE: Moraes e Moraes, 2014.

O tetracloreto de carbono (massa específica de $1549,00 \text{ Kg/m}^3$ a 28° C), apesar das descobertas que apontam que este composto pode fazer mal a saúde humana (tóxico para o fígado), ainda é encontrado como fluido líquido manométrico de preenchimento em conjunto com a água (massa específica de $996,25 \text{ Kg/m}^3$ a 28° C).

Pode-se determinar a perda de carga de um sistema de Leito Fluidizado, interpretando a Equação 1, Lei de Pascal.

$$P_2 = P_1 \quad (1)$$

Em que:

P_1 e P_2 são pontos de pressão no fluido manométrico.

Mostra-se na Equação 2 o resultado do emprego da Lei de Pascal e Stevin entre os pontos 1 e 2 da Figura 4.

$$P_2 + \gamma_A L + \gamma_A y + \gamma_T h = P_1 + \gamma_A y + \gamma_A h \quad (2)$$

Sendo:

L a distância no plano vertical entre as tomadas de pressão;

h o desnível do líquido de preenchimento;

y o desnível manométrico;

γ_A o peso específico da água;

γ_T o peso específico do tetracloreto de carbono.

Na Equação 3 demonstra-se a simplificação das parcelas comuns aos dois membros da igualdade ($\gamma_A y$).

$$P_2 + \gamma_A L + \gamma_T h = P_1 + \gamma_A h \quad (3)$$

Apresenta-se na Equação 4 a perda de carga do Leito Fluidizado, conforme ilustrado na Figura 4.

$$\Delta P = |P_2 - P_1| = h (\gamma_T - \gamma_A) + \gamma_A L \quad (4)$$

Em que:

ΔP é a perda de carga no Leito Fluidizado.

2.3.3 Velocidade de Escoamento em Leito Fluidizado

Para a quantificação da perda de carga em sistemas de Leito Fluidizado é fundamental que se determine as variações das velocidades de escoamento do fluido.

O método mais utilizado para tal análise foi introduzido por Henri Pitot em 1732 (o tubo de Pitot).

Este medidor permite determinar a velocidade de escoamento através da identificação da pressão dinâmica que incide sobre a seção transversal de um tubo (BORGO, PIEBARSKI & KASAI, 2005).

Mostra-se na Figura 5 uma representação esquemática do tubo de Pitot.

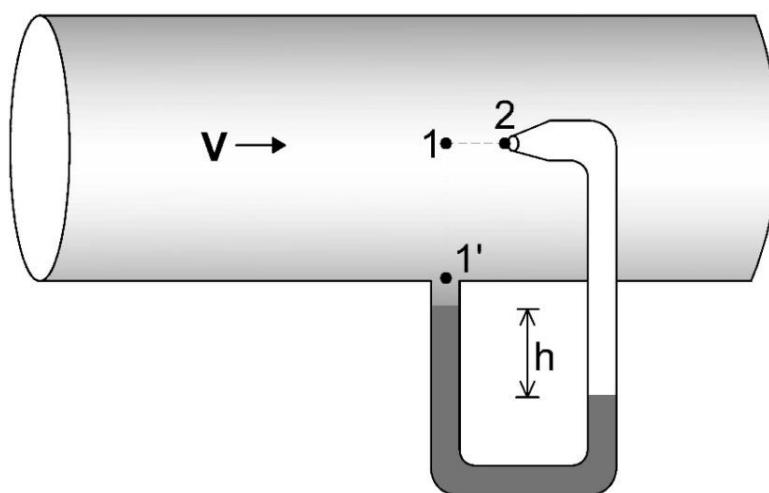


Figura 5 - Tubo de Pitot.
Adaptada: Borgo, Piebarski e Kasai, 2005.

Através do balanço de energia ente os pontos 1 e 2 (Figura 5; Equação 5), com tomada piezométrica, pode-se determinar a equação da velocidade em função das pressões e densidade do fluido (MORAES & MORAES, 2014).

$$\frac{\Delta V_b^2}{2g} + \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho_f g} + l_w - W'_h = 0 \quad (5)$$

Sendo:

W'_h	o trabalho de eixo;
l_w	a perda de carga;
Δz	o desnível;
ρ_f	a densidade do fluido;
ΔV_b^2	a variação da velocidade;
Δp	a variação da pressão (a perda de carga do fluído no tubo de Pitot).
g	a gravidade.

Considerando que os pontos 1 e 2 encontram-se no mesmo nível ($\Delta z = 0$), e que não há trabalho de eixo ($W'_h = 0$ e $l_w = 0$), e que a velocidade no ponto 2 (V_2) tende a zero ($V_2 = 0$), a Equação 5 pode ser reescrita conforme representado na Equação 6.

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho_f}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_f}} \quad (6)$$

Conforme a Equação 4, esta pode ser reescrita segundo a Equação 7 (para o tubo de Pitot), considerando que a parcela referente ao desnível entre as tomadas de pressão é igual a zero ($\gamma_A L$).

$$\Delta P = h (\gamma_T - \gamma_A) \quad (7)$$

Reorganizando a Equação 6, a velocidade de escoamento em um tubo Pitot pode ser entendida como apresentado na Equação 8.

$$V_p = \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} = \sqrt{\frac{2h (\gamma_T - \gamma_A)}{\gamma_A}} \quad (8)$$

2.4 Instrumentação Eletrônica

2.4.1 Transdutores

Um sensor pode ser caracterizado pela capacidade de apontar eventos aleatórios dentro de um sistema controlado, como exemplo: a variação de pressão, de temperatura e outras.

Já o transdutor é um circuito eletromecânico capaz de converter esses eventos aleatórios, em sinais elétricos (LADIM, 2015).

Neste estudo, não será feita distinção entre sensor e transdutor, visto que o sensor é parte integrante do transdutor.

2.4.1.1 Propriedade dos Transdutores

Conforme representa a Figura 6, a faixa de operação de um sensor é obtida em termos de amplitude (eixo da ordenada) e de frequência (eixo da abscissa) de um sinal de entrada. Sendo a frequência de corte (f_c), o limite de operação para o bom funcionamento do dispositivo (LADIM, 2015).

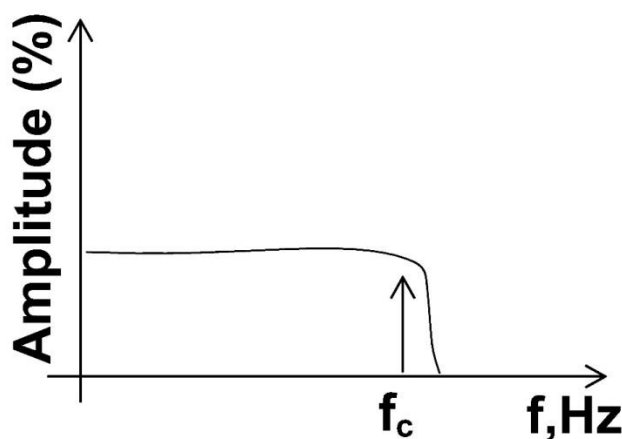


Figura 6 - Faixa de operação admissível para os transdutores.
Fonte: Ladim, 2015.

Segundo Ladim (2015), para que o sensor se mantenha operacional dentro de uma determinada faixa de frequência, é necessário que haja a apropriação dos níveis admissíveis de sinais de entrada. Ainda, com relação à sua sensibilidade, esta propriedade vislumbra o nível máximo e o nível mínimo

de sinal que por ele pode ser detectado, considerando as ponderações necessárias entre a máxima sensibilidade e o mínimo ruído.

Já a resolução de um sensor pode ser entendida como a menor escala permissível para a leitura de dados de um sensor. Isto é, a resolução é o menor incremento em que se pode assegurar uma leitura de sinal confiável.

A Figura 7 mostra outra importante propriedade dos sensores, a chamada linearidade. Esta propriedade é proporcional à razão entre a taxa de variação apresentada pelo sinal de saída em relação ao sinal de entrada (LADIM, 2015).

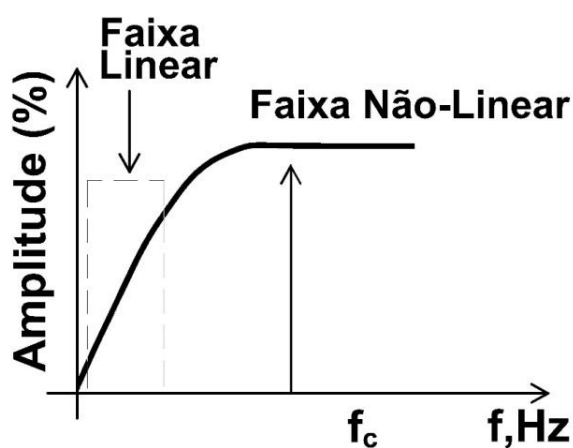


Figura 7 - Representação da linearidade ideal para um transdutor.
Fonte: Ladim, 2015.

2.4.2 Transdutores de Pressão Diferencial

Os sensores de baixas pressões diferenciais apresentam, acoplados aos seus encapsulamentos, pontos para as tomadas de pressões e contatos elétricos. Estes dispositivos são compostos internamente por elementos semicondutores piezoresistivos e por um amplificador de sinal (IBARRA, 2014).

O sistema de amplificação possibilita que os sinais de saída sejam uma amostra do estímulo mecânico impresso na entrada, em função de um ganho preestabelecido (IBARRA, 2014). Segundo o autor, apresenta-se na Equação 9 a função de transferência genérica de um transdutor.

$$V_o = G V_i \quad (9)$$

Em que:

V_o é o sinal elétrico de saída (V);

G é o ganho da amplificação (adimensional);

V_i é o sinal elétrico de entrada proporcional ao estímulo mecânico.

O silício é o principal elemento semiconductor utilizado na eletrônica. Sua estrutura tetravalente, quando associada de formas intrínseca, constitui redes cristalinas estáveis e baixa condutividade elétrica, segundo demonstrado na Figura 8 (ALCHEMIST ENGENHARIA, 2006).

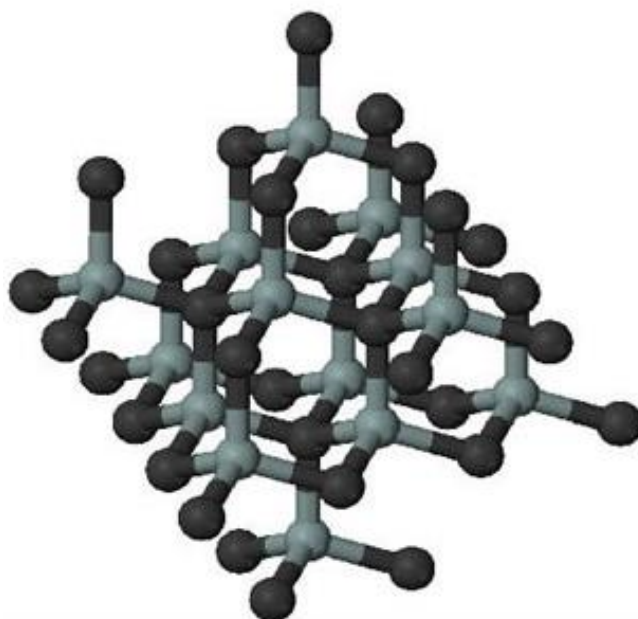


Figura 8 - Representação esquemática da estrutura cristalina do silício.
Fonte: Alchemist Engenharia, 2006.

O processo de dopagem consiste em inserir átomos trivalentes ou pentavalentes nas redes cristalinas dessas moléculas, de modo a fazer com que os portadores de cargas majoritários se tornem aptos a transportar energia ao longo de toda a estrutura. Com tal processo as substâncias passam a

possuir propriedades intermediárias entre os materiais condutores e os materiais não condutores (SILVA, 2007).

Os sensores piezoresistivos são elementos fabricados a partir de materiais semicondutores. Tais dispositivos apresentam a capacidade de alterar a sua resistividade elétrica em função de estímulos mecânicos, permitindo a conversão proporcional de gradientes mecânicos em gradientes elétricos (RASIA, 2009).

A representação esquemática de um corte transversal feito na estrutura de um transdutor de pressão é apresentada na Figura 9.

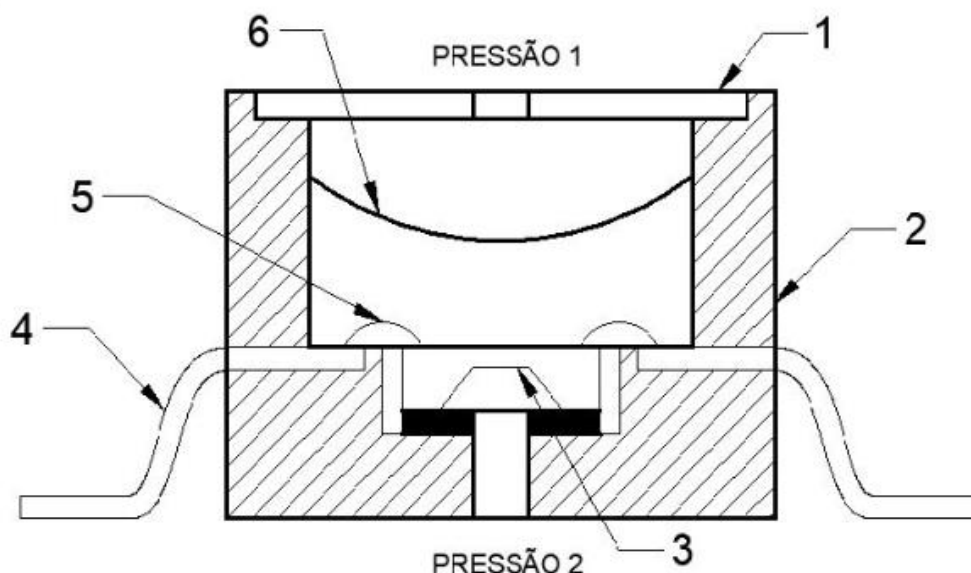


Figura 9 - Estrutura interna do transdutor de pressão piezoresistivo: (1) Cobertura metálica; (2) Invólucro de epóxi; (3) Membrana de silício; (4) Condutor elétrico; (5) Contato elétrico; (6) Gel de fluorossilicone.
Fonte: NXP, 2017.

Quando uma determinada pressão é aplicada sobre a membrana de silício, esta sofre deflexão para cima ou para baixo, provocando tração ou compressão em seus elementos piezoresistores. A variação da resistência elétrica, resultante de tal deformação, pode ser quantificada através de um circuito ponte de Wheatstone, afixando os elementos piezoresistores aos braços ativos da ponte (NXP, 2017).

A ponte de Wheatstone, conforme demonstrada na Figura 10, pode ser descrita como dois divisores de tensões e entre os seus terminais de saída, nós “A” e “B”, consta uma diferença de potencial (V_{AB} (volts)), proporcional a uma prévia excitação (estímulo mecânico) (ISMAEL, 2017).

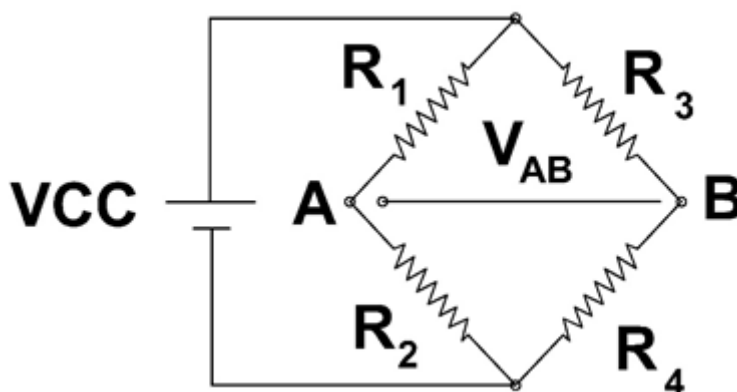


Figura 10 - Circuito Elétrico Ponte de Wheatstone.
Fonte: Ismael, 2017.

A Figura 11 exibe a representação do circuito ponte de Wheatstone por meio de divisores de tensão, os quais podem ser interpretados tomando - se como referências os nós “A” e “B”, como apresentado nas Equações de 10 a 14 (ISMAEL, 2017).

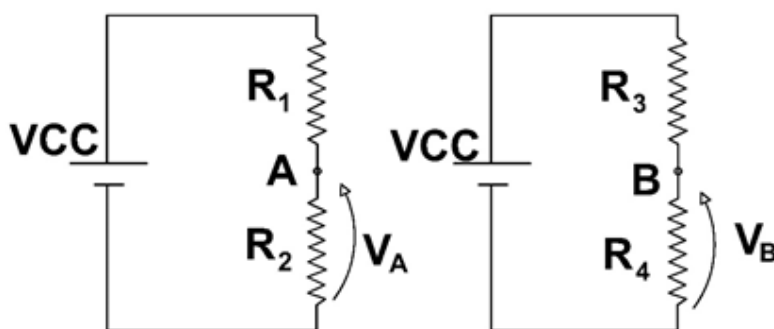


Figura 11 - Representação do Circuito Ponte de Wheatstone por meio de Divisores de Tensão.
Fonte: Ismael, 2017.

$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

Sendo:

V_A a queda de tensão sobre a resistência R_2 ;

R_2 a resistência onde se deseja determinar a tensão V_A ;

R_1 a resistência conectada em série com R_2 .

A tensão no ponto “B”, como mostra a Figura 11, pode ser interpretada através da Equação 11.

$$V_B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (11)$$

Em que:

V_B é a queda de tensão sobre a resistência R_4 ;

R_4 é a resistência onde se requer determinar o valor da queda de tensão (V_A) e;

R_3 é a resistência conectada em série com R_4 .

Desta forma, igualando os potenciais nos pontos “A” e “B”, é obtida a Equação 12.

$$V_A = V_B \quad (12)$$

E, substituindo as Equações 10 e 11 na Equação 12, têm-se a Equação 13.

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (13)$$

Explorando-se matematicamente a Equação 13, pode-se concluir que os elementos piezoresistivos estarão em equilíbrio ao obedecerem à Equação 14.

$$R_2.R_3 = R_1.R_4 \quad (14)$$

Considerando a analogia de que os elementos piezoresistores que constituem o transdutor de pressão estejam representados por elementos puramente resistivos, como mostrado na Equação 14, e que em um primeiro momento o dispositivo não esteja submetido a esforços mecânicos, então a ponte de Wheatstone permanecem em equilíbrio, e o sinal de tensão entre os terminais de saída, “A” e “B”, será igual à zero. Já com a existência de um módulo de pressão sobre um dos braços ativos da ponte (onde os elementos piezoresistores foram afixados), a igualdade de equilíbrio imposta pela mesma equação não será válida e haverá um sinal de tensão entre os terminais de saída proporcional ao estímulo mecânico imposto ao sistema (ISMAEL, 2017).

2.4.3 Transdutor de Vazão Volumétrica

De acordo com Nardiel (2015), a medida da vazão sempre foi uma necessidade do homem, desde aplicações mais simples, como nas bombas de combustível até nos hidrômetros industriais. No setor fabril estes equipamentos podem ser utilizados no controle de processos, na produtividade, na análise de eficiência, no estudo de perda de carga e outros.

Os transdutores de baixas vazões externamente apresentam encaixes orientados para a entrada e para a saída de fluido e *jumpers* para as conexões elétricas. A câmara interna do dispositivo é equipada por pás afixadas a um rotor, proporcionando o movimento giratório do dispositivo (NXP, 2017).

De forma objetiva, os sensores de vazões possuem características adaptadas em relação aos sensores de efeito *Hall*, tornando possível a contagem dos números de voltas completas que o rotor executa em função do tempo. Este dispositivo fornece um sinal elétrico de saída do tipo trem de pulso e com níveis de tensão apropriados ao emprego de um microcontrolador, que irá permitir o acompanhamento em tempo real da medida (NXP, 2017).

Em projetos que envolvem a Mecânica dos Fluidos, tem - se que considerar o empuxo aplicado sobre as pás, para manter a mesma dinâmica do rotor e evitar a perda de carga do sistema (NARDIEL, 2015).

Mostra-se na Figura 12 a estrutura interna de um transdutor de baixa vazão volumétrica.



Figura 12 - Vista interna do transdutor de vazão.
Fonte: NXP, 2017.

2.5 Eletrônica Embarcada

Em sistemas de controle moderno, a eletrônica embarcada é definida como um dispositivo microcontrolado que desempenha tarefas segundo informações definidas. Um dispositivo microprocessado necessita de componentes periféricos para o seu funcionamento, tais como a memória e os componentes de entrada e de saída de dados, já um dispositivo microcontrolado possui todas as funcionalidades necessárias impressas em uma única pastilha (SOUZA & LAVINIA, 2003).

Apresentam - se na Tabela 4 as principais características funcionais de um microcontrolador.

Tabela 4 - Principais unidades de um microcontrolador.

Unidade	Função	Referências
Unidade de memória	A memória é a parte do microcontrolador cuja função é guardar dados; Possibilita a leitura e a escrita de uma determinada informação.	SOUZA, 2003.
Unidade Central de Processamento (CPU)	Nesta unidade são realizadas as instruções de um código de computador, para a execução da aritmética, da lógica, e habilita a entrada e saída de dados.	
Bus	É responsável por interligar fisicamente a unidade de memória a CPU; Existem dois tipos de Bus, a Bus de dados e a Bus de endereçamento e, fisicamente este barramento corresponde a um agrupamento de 8, 16 ou mais fios.	PEREIRA, 2002.
Unidade de entrada e saída de dados	Esta unidade é responsável pela comunicação da máquina com o mundo exterior.	PEREIRA, 2002.
Unidade série	Possibilita o envio e recebimento simultâneo de dados.	SOARES, 2004.
Conversor analógico /digital	Esta unidade é responsável por converter sinais analógicos em sinais digitais (linguagem de máquina)	SOUZA & LAVINIA, 2003

Fonte: Pereira, 2002; Souza, 2003; Souza e Lavinia, 2003; Soares, 2004.

2.5.1 Arduino Uno

Com o objetivo de melhorar a gestão, a eficiência e a competitividade de novos produtos, os setores industriais estão apostando em novas tecnologias microcontroladas (SOUZA & LAVINIA, 2003).

O circuito Arduino Uno é composto pelo microcontrolador ATmega 328; Esse microcontrolador está disponível em uma pastilha integrada e independente, dotada de memórias, além de barramentos (ARDUINO & CIA, 2013).

A forma mais prática de se alimentar o circuito Arduino Uno é através da conexão plataforma - computador por meio do cabo *USB (Universal Serial Bus)*. Esse cabo possui uma linha de alimentação de 5 V que é adequada para

o microcontrolador disponível (BOD GARAGE, 2017).

Ainda é possível alimentar o circuito por meio do arranjo de pilhas ou com o auxílio de um transformador de baixa potência, além do pino de alimentação de 3,3V (BOD GARAGE, 2017).

A plataforma Arduino Uno apresenta faixas limites de tensão de entrada entre 6 e 20 V. Para esta faixa de tensão preestabelecida não há perturbações internas que possam influenciar quanto ao bom funcionamento do circuito, pois a plataforma possui um dispositivo regulador de tensão que dissipa os potenciais em excesso na forma de calor (ARDUINO & CIA, 2013).

Na Tabela 5, apresentam-se as especificações técnicas do microcontrolador ATmega 328 (memórias).

Tabela 5 – Quantidade de memória - ATmega 328	
Microcontrolador	ATmega 328
Flash	32 kB
Sram	2 kB
Eeprom	1 kB

Adaptado: Arduino e Cia, 2013.

2.5.2 Display

O *display* de sete segmentos (visor de sete segmentos) pode ser considerado como uma extensão da plataforma Arduino Uno e, é utilizado como forma de exibir uma informação numérica ou as operações processadas internamente por esse dispositivo. Esse circuito apresenta ao operador um conjunto de informações de fácil interpretação (ARDUINO & CIA, 2013).

Dentre o conjunto de circuitos *displays* pode haver aqueles que operam na forma digital, através do sequenciamento de *leds* (*displays* numéricos), ou ainda *displays* que apresentam símbolos e gráficos (*displays* alfanuméricos). O tipo de *display* mais utilizado em projetos de eletrônica é o de sete segmentos, que possibilita a faixa de algarismos entre 0 e 9, além de alguns símbolos gráficos, a partir da combinação de quatro sinais de entrada, 4 *bits* (ARDUINO E CIA, 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

A unidade experimental de Leito Fluidizado utilizada nesse trabalho foi projetada e construída no Laboratório de Operações Unitária da Universidade Santa Cecília (UNISANTA).

Na Figura 13 apresenta - se a vista geral do equipamento e na Figura 14 suas especificações técnicas.

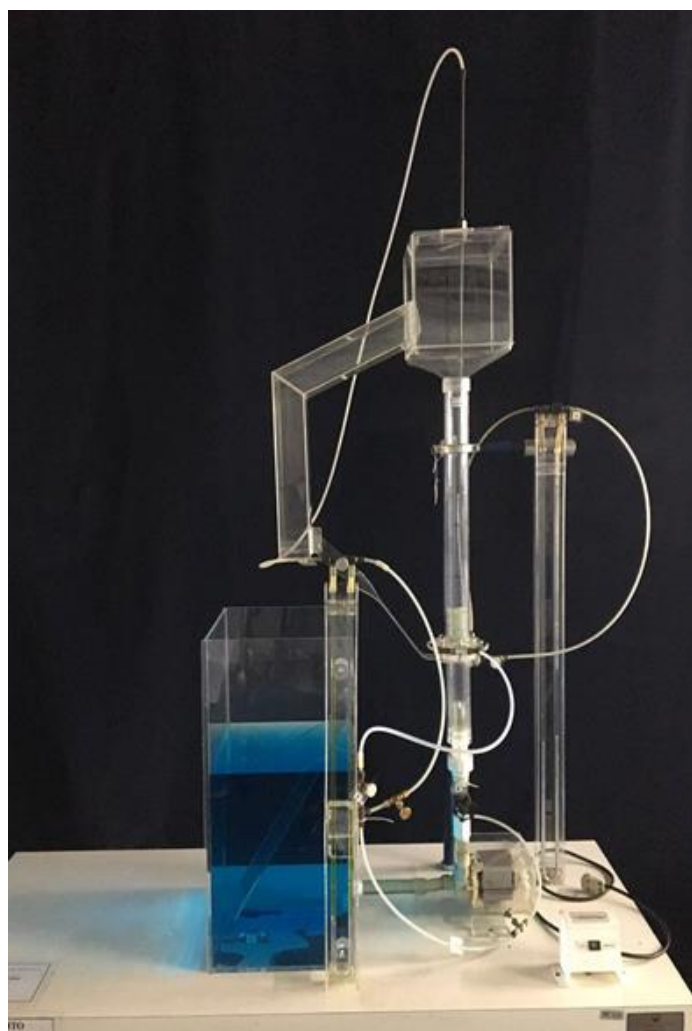


Figura 13 - Vista geral da unidade experimental “Leito Fluidizado”.

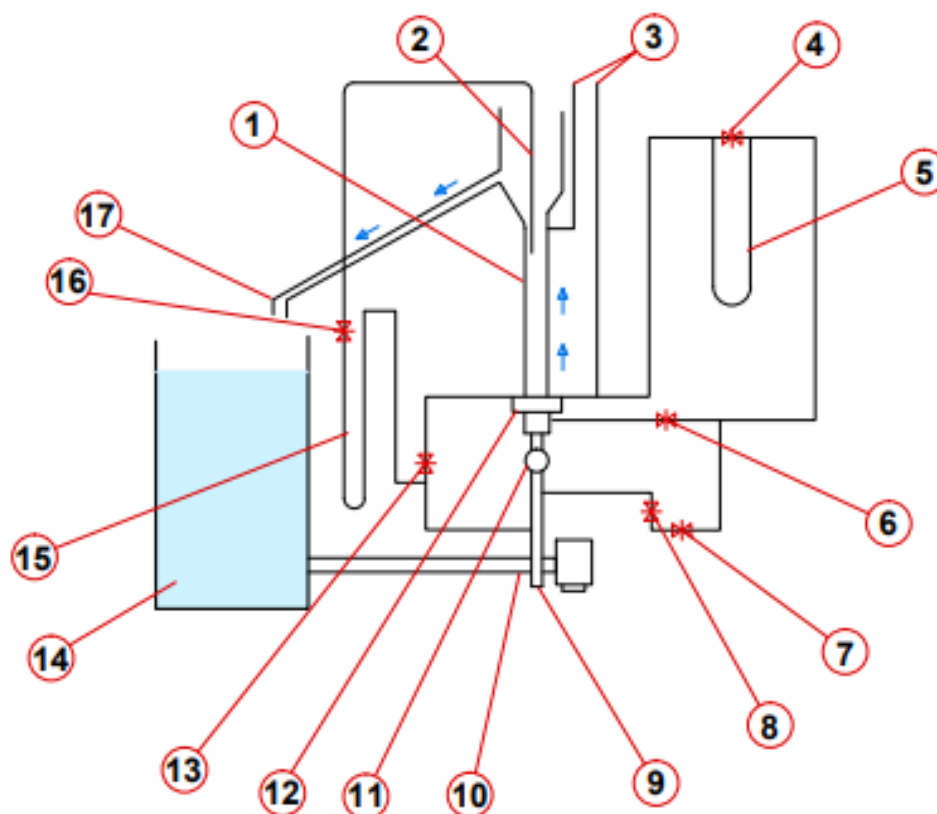


Figura 14 - Unidade experimental: (1) Coluna de fluidização; (2) Tomada de pressão; (3) Anel piezométrico; (4), (6), (7), (8), (13), (16) Válvulas de agulha; (5), (15) Manômetro em "U"; (9) Conjunto moto - bomba; (10) Duto de sucção da bomba; (11) Válvula de gaveta; (12) Flange da tela suporte do leito; (14) Tanque de contenção de água e; (17) Duto para retorno de água.

Fonte: Moraes e Moraes, 2014.

As principais características da unidade experimental estão listadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características da unidade experimental.

Descrição	Medida
Comprimento do leito de partículas	500 mm
Diâmetro interno da coluna de fluidização	41 mm ²
Duto de sucção da bomba	3/4"
Tanque de contenção do fluído	49,3 L
Diâmetro médio das esferas de vidro	3,2 mm

3.1.1 Sensores Eletrônicos

O projeto utilizou dois sensores de pressões diferenciais e um de vazão como transdutores eletromecânicos. São apresentados na Figura 15 os encapsulamentos e as conexões disponíveis para estes dispositivos.

Para os sensores de pressões diferenciais:

- a) Conexão 1: sinal de saída;
- b) Conexão 2: sinal de GND;
- c) Conexão 3: sinal de V_{CC} .

Já o sensor de vazão:

- a) Conexão 1: sinal de saída (cabo amarelo);
- b) Conexão 2: sinal de GND (cabo preto);
- c) Conexão 3: sinal de V_{CC} (cabo vermelho).

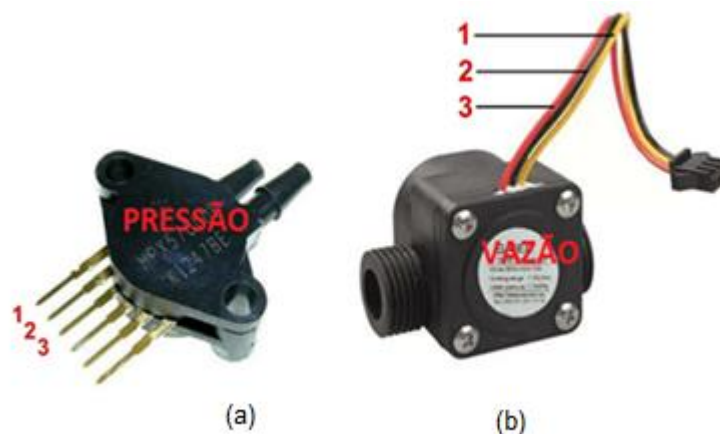


Figura 15 – Sensores: (a) Pressão diferencial e; (b) Vazão volumétrica.

Fonte: Arduino e Cia, 2013.

As especificações técnicas dos sensores de instrumentação seguem descritas nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Sensor de vazão – Efeito *Hall* YFS201.

Descrição	Medida
Tensão de entrada	entre 05 e 18 V _{CC}
Corrente consumida	15 mA para 05 V
Faixa de fluxo Admissível	01 a 30 L/min
Pressão máxima de operação	2 MPa
sinal de saída	onda retangular - entre 0.5 a 4.5 V
Conexão em rosca	rosca de 3/4"

Fonte: MSS Eletrônica, 2017.

Tabela 8 - Sensor de pressão - MPX 5010 DP

Range de pressão	Pressão mínima	Pressão típica	Pressão máxima	Unidade
Diferencial	0	-	10 1019.78	kPa mmH ₂ O
Alimentação	Alimentação mínima	Alimentação típica	Alimentação máxima	Unidade
Tensão Contínua	4,75	5,0	5,25	V _{CC}
Alimentação	Alimentação Mínima	Alimentação Típica	Alimentação Máxima	Unidade
Corrente Contínua	-	5,0	10	mA
Sensibilidade	Sensibilidade mínima	Sensibilidade típica	Sensibilidade máxima	Unidade
Volts/Pressão	-	450 4,413	-	mv/mm mv/mmH ₂ O

Fonte: Arduino e Cia, 2013.

3.1.2 Unidade de Processamento de Sinais.

A unidade de processamento de sinais adotada no trabalho foi o Microcontrolador ATmega 328. Na Figura 16 e na Tabela 9 são apresentadas as principais conexões disponíveis e os respectivos dados de placa referente à plataforma Arduino Uno.

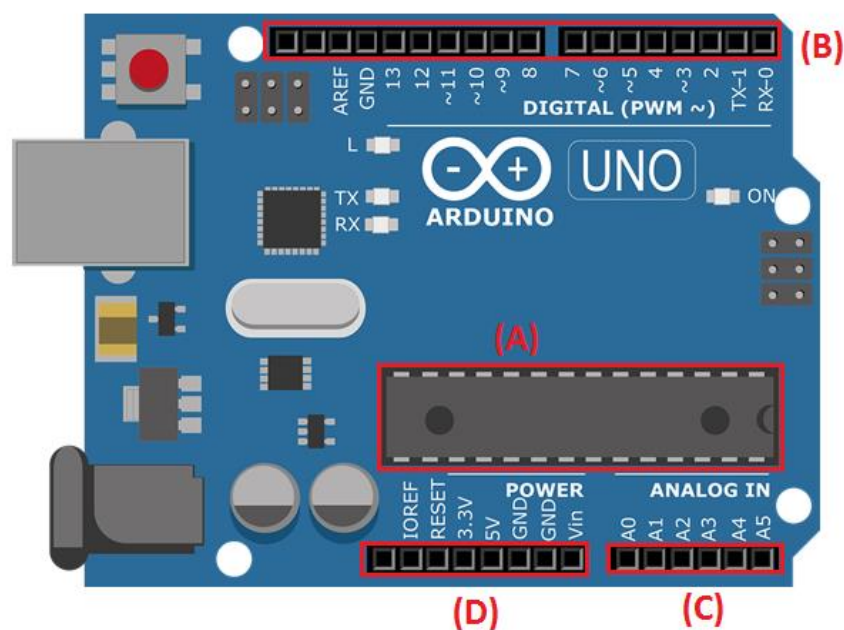


Figura 16 - Principais conexões do Arduino Uno: (A) Microcontrolador ATmega 328; (B) Entradas e saídas digitais; (C) Entradas analógicas e; (D) Pinos de V_{cc} e de GND.
Fonte: Arduino e Cia, 2013.

Tabela 9 - Especificações técnicas do Arduino Uno.

Descrição	Medida
Tensão de operação	5 V
Limite da tensão de entrada	6 - 20 V
Corrente contínua nos pino de entrada e de saída	40 mA
Corrente para o pino de 3,3 V	50 mA
Velocidade de clock	16 MHz

Fonte: Arduino e Cia, 2013.

É fornecido na Figura 17 o detalhamento dos componentes e conexões que constituem a plataforma eletrônica (Arduino Uno).

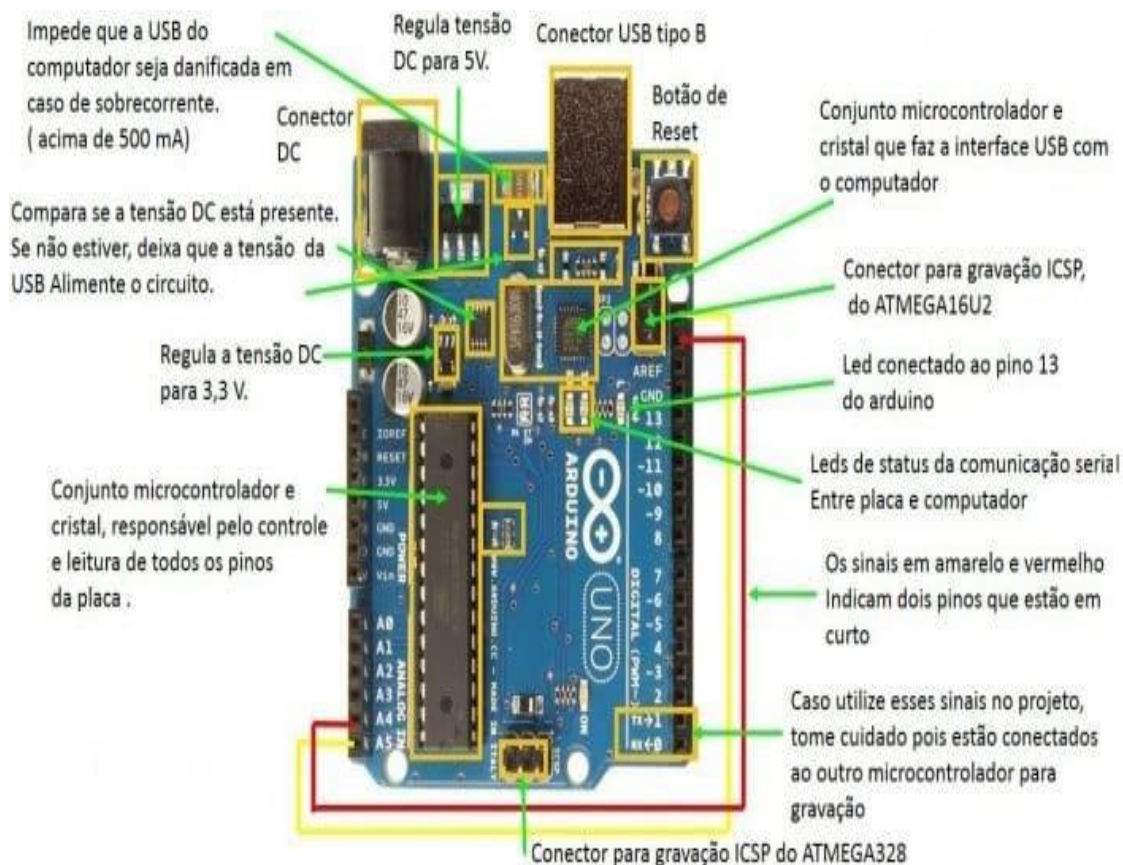


Figura 17 - Componentes e conexões do Arduino Uno.

Fonte: Arduino e Cia, 2013.

3.1.3 Componentes Eletrônicos Periféricos.

São fornecidas nas Figuras 18 e 19 os dispositivos periféricos utilizados em conexão com o Arduino Uno para a leitura de dados e os seus respectivos diagramas de ligações:

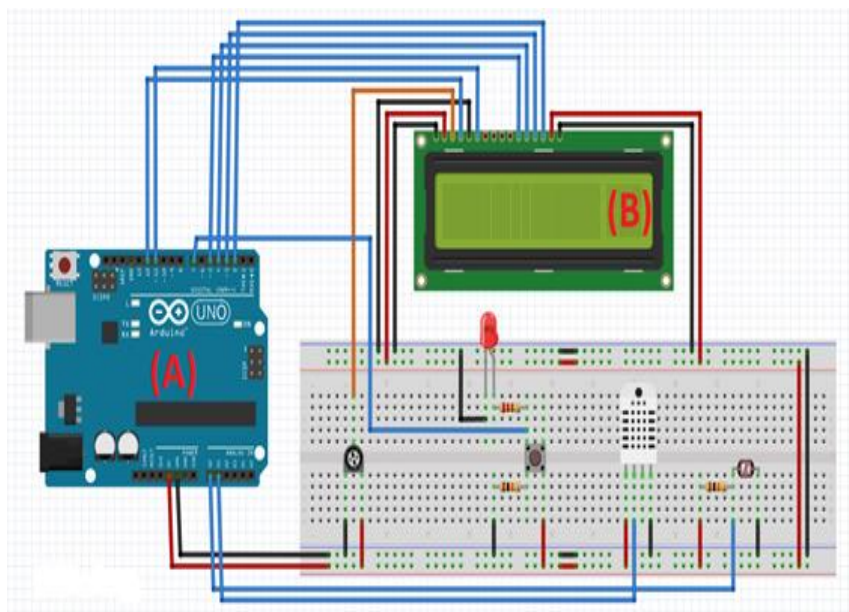


Figura 18 – Diagrama de ligações 1: (A) Arduino Uno e (B) LCD - *Liquid Crystal Display* (Visor de Cristal Liquido), modelo Shield LCD 16x2.

Fonte: Fonte: MSS Eletrônica, 2017.

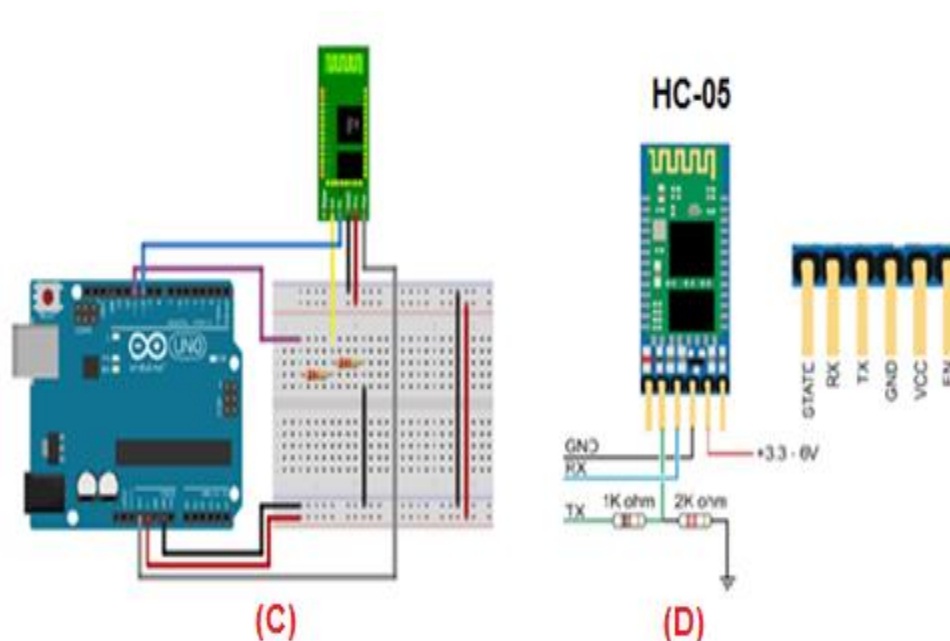


Figura 19 – Diagramas de ligações 2: (C) Arduino Uno - Módulo *Bluetooth* (modelo HC - 05) e (D) detalhamento de instalação.

Fonte: Bod Garage, 2017.

3.1.4 Instrumentos de Medidas.

Um fator a ser considerado durante as coletas de dados diz respeito à faixa de erro de cada equipamento, todavia esses instrumentos necessitam serem calibrados, como por exemplo, utilizar corpos de prova como referência de peso, um segundo cronometro como parâmetro de tempo, comparar os valores obtidos por meio de tudo Pitot com valores obtidos por meio de sonda de pressão estática, entre outros.

Representa-se na Figura 20 os instrumentos auxiliares de medidas:



Figura 20 - Instrumentos auxiliares de medida: (a) Balança *Gehaka* Modelo Bg 8000 (carga máxima de 8.080 g); (b) Cronometro Digital *Instrutherm* Modelo CD 2800; (c) Escala Graduada (comprimento igual a 30 cm) e; (d) Tubo Pitot aeromodelo.

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaio Mecânico

Os ensaios mecânicos foram realizados em triplicata e tratados por meio de análises estatísticas.

Durante os experimentos, as práticas foram realizadas variando-se a massa total das esferas de vidro (partículas fluidizantes), de 130 g para 140 g e por fim, 150 g, em função de um fluxo ascendente de fluido.

Após a calibragem dos instrumentos de medidas, o método admitiu como a primeira linha de estudo a parte da preparação do equipamento para o início dos ensaios, através da seguinte sequência:

- 1) Retirar o ar dos tubos e alinhar da sonda de pressão (1ª etapa);
- 2) Regular a sonda de pressão (2ª etapa);
- 3) Coletar o fluido (3ª etapa) e;
- 4) Preparar o equipamento para os ensaios subsequentes (4ª etapa).

A retirada de ar dos tubos, conexões e o alinhamento da sonda de pressão (1ª etapa), foram alcançados através dos ajustes das válvulas de agulha instaladas ao longo do sistema e da utilização de uma escala graduada, respectivamente.

Os registros dos resultados conexos às amostras ocorreram em paralelo ao controle gradativo da vazão, por meio do ajuste da válvula do tipo gaveta (2ª etapa).

A preparação da unidade experimental para os ensaios subsequentes consistiram da retirada das esferas de vidro do tubo de fluidização para readequação da nova massa. Em seguida a porção de partículas foi lavada e, após seca em estufas, foram recolocadas no equipamento (3ª etapa).

No desenvolvimento dos ensaios, foram coletados dois pontos de interesse durante o estado de leito fixo, um ponto no início da fluidização, dois pontos durante o estado de fluidização e, por fim, um ponto durante o estado de transporte hidráulico das partículas.

Na equalização dos ensaios foram registrados os tempos relativos a

cada transição de estado, os valores das vazões volumétricas, mássicas e as alturas condizentes a cada tipo de leito.

As Tabelas 10 e 11 mostram os sucessivos métodos utilizados para a coleta dos dados mecânicos.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados durante os ensaios mecânicos.

Condição do Leito de Fluidização	Número de Pontos	Altura do Leito	Vazão volumétrica e mássica	Tempo de Ensaios	Número de Ensaios
Fixo	02				06
Início da Fluidização	01				03
Fluidizado	02				06
Transporte Pneumático	01				03

Tabela 11 - Coleta e tratamento matemático de dados.

Procedimentos	Instrumento e Equações
Controle de Vazão Mássica	Válvula de Gaveta
Registro do Desnível do Tetracloreto de Carbono/Água	Escala Graduada
Registro da Perda de Carga do Sistema	Escala Graduada
Registro do Tempo de Ensaio	Cronômetro Digital
Registro da Temperatura	Termômetro Digital
Registro da Massa do Fluido	Balança Eletrônica
Cálculo da Vazão Mássica	$W_m = \frac{m_{coletada}}{t} \quad (15)$ Em que: W_m é a vazão mássica; $m_{coletada}$ é a massa e t é o tempo.
Cálculo do Volume	$V_L = \frac{m_{coletada}}{\rho} \quad (16)$ Sendo: V_L o volume e ρ a densidade do fluido.
Cálculo da Vazão Volumétrica	$Q = \frac{V_L}{t} \quad (17)$ Em que: Q é a vazão volumétrica.
Cálculo da Velocidade de Escoamento	$V_e = \frac{Q}{A} \quad (18)$ Sendo: V_e a velocidade de escoamento do fluido e A é a área de seção transversal do leito.

3.2.2 Ensaios Eletrônicos

Tanto nos ensaios mecânicos quanto nos ensaios eletrônicos, as etapas da preparação da unidade experimental para o início das análises e para as análises subsequentes foram executadas de maneiras equivalentes.

O protótipo eletrônico foi construído por meio de dois sensores de pressão, um sensor de vazão, um módulo *bluetooth*, um módulo *LCD* e uma plataforma Arduino Uno.

Os módulos *LCD* e *bluetooth* permitiram o monitoramento em tempo real da unidade experimental.

Para determinar a velocidade de escoamento do fluido (água) foi utilizado o tubo de Pitot, com o objetivo de investigar os gradientes das pressões dinâmicas, conectado a um sensor de pressão diferencial (SP1 – Figura 21).

A perda de carga do sistema foi registrada por meio de um segundo sensor de pressão diferencial (SP2 – Figura 21), alinhado entre uma sonda de pressão estática e o anel piezométrico.

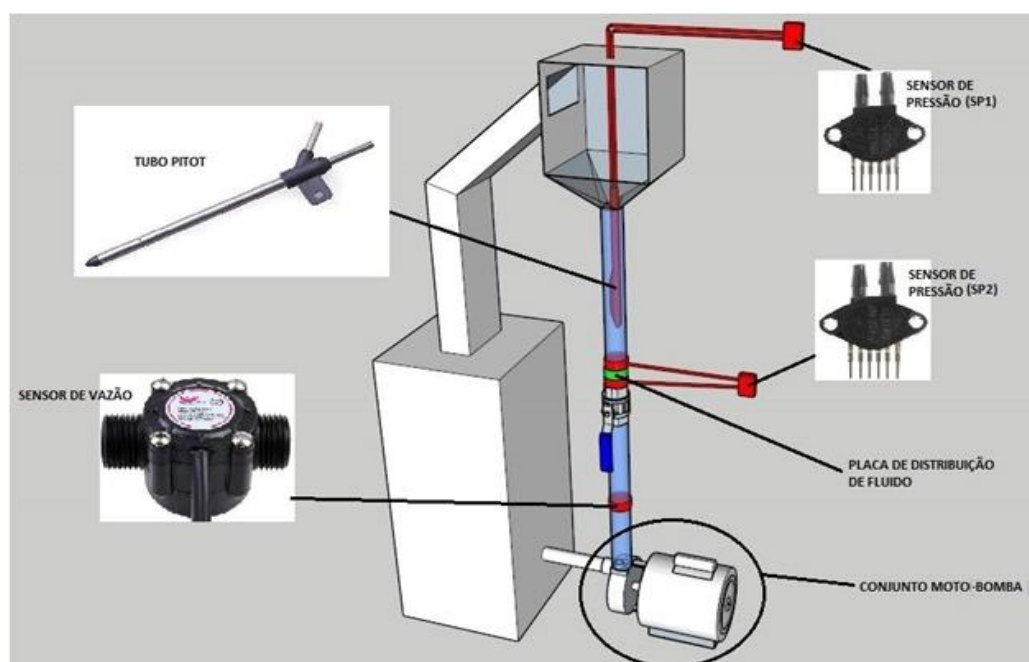


Figura 21 - Detalhamento da instrumentação eletrônica da unidade experimental.

A unidade experimental instrumentada por sensores esta representada na Figura 22.

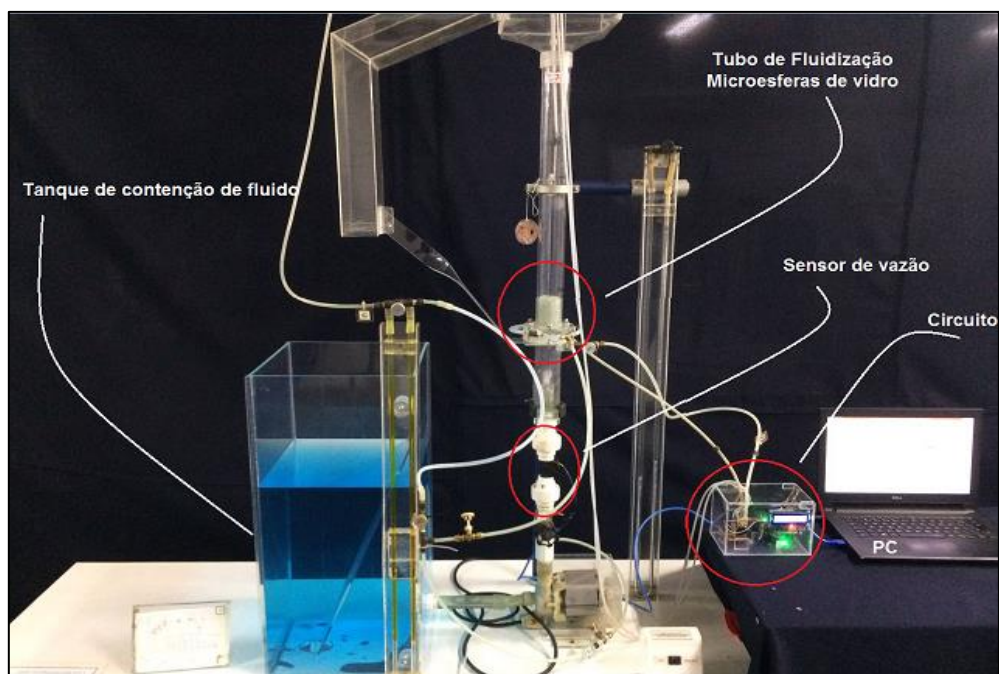


Figura 22 - Vista geral da unidade experimental instrumentada (sensores).

As instalações elétricas foram realizadas de acordo com o exposto na Tabela 12 e na Figura 23.

Tabela 12 - Conexões sensores - plataforma.

Arduino Uno	Sensor de pressão 1	Sensor de pressão 2	Sensor de vazão
Portas digitais	A_0	A_1	
Portas analógicas			4
Alimentação (Vcc)	5 V	5 V	5 V
Terra	GND	GND	GND

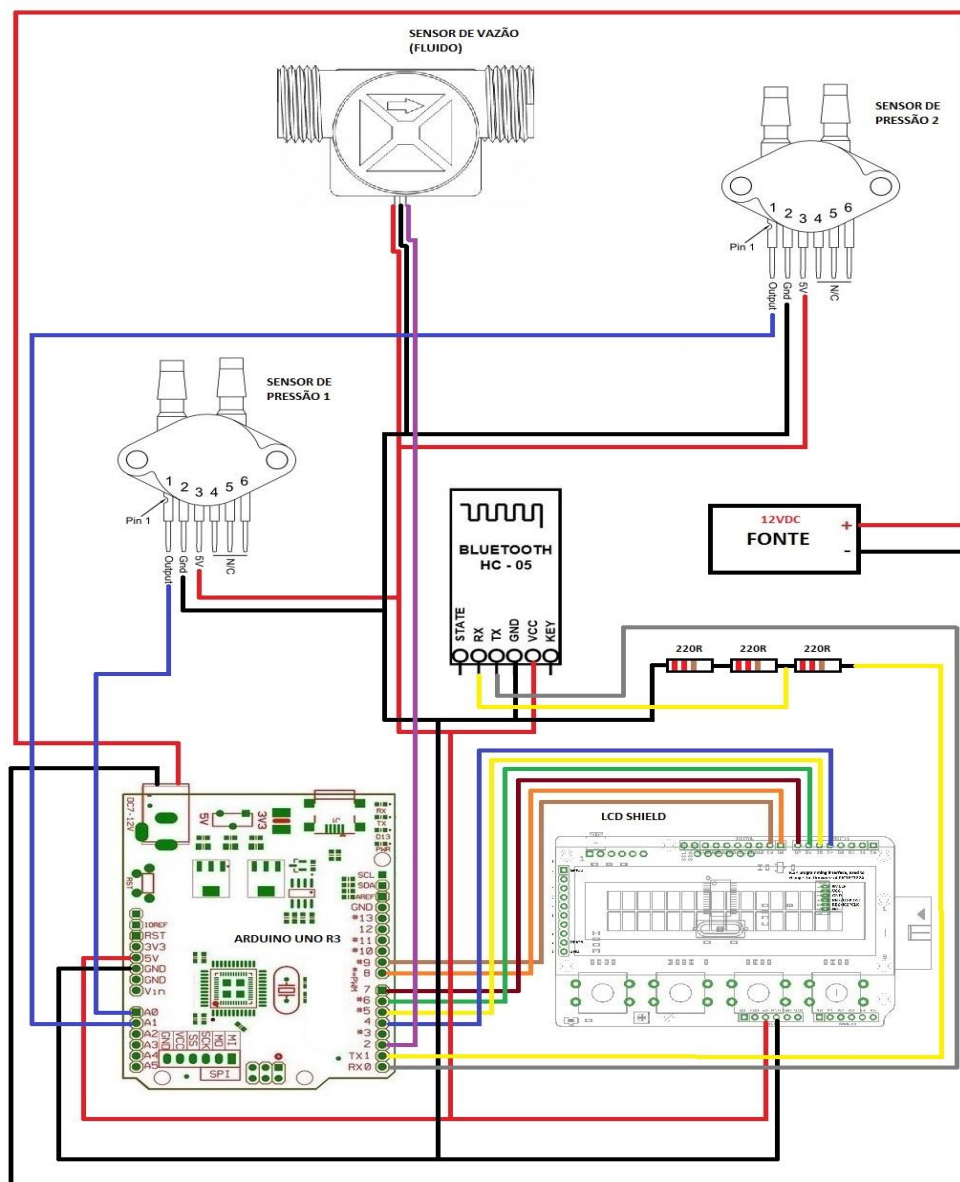


Figura 23 - Projeto eletrônico.

Demonstram-se na Figura 24 o circuito eletrônico com as conexões para os sensores de pressão e, através do apêndice A é possível se acompanhar a as fases de evolução de protótipo (hardware).

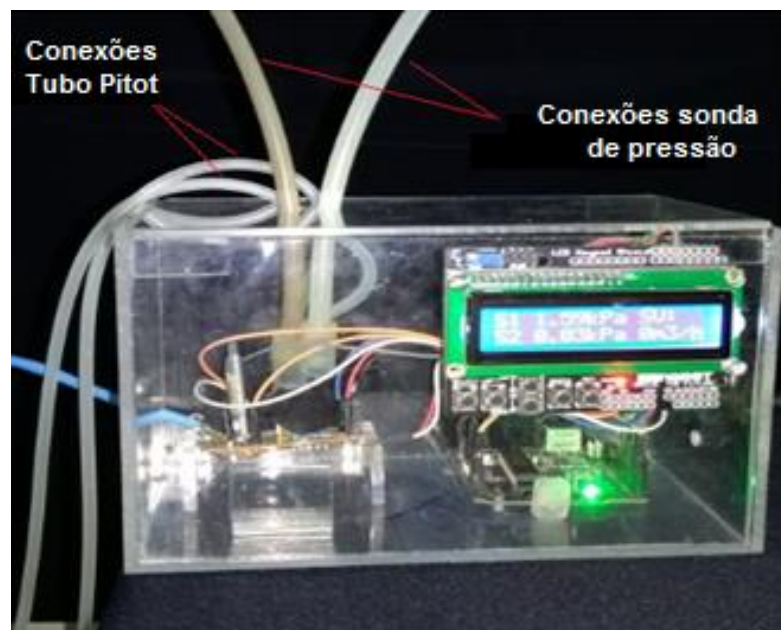


Figura 24 - Protótipo eletrônico.

Para a coleta de dados, durante os ensaios eletrônicos, em comunicação com a plataforma Arduino Uno foi utilizado o *software* de aquisição de *PLX - DAQ (Parallax Data Acquisition)*.

As Figuras 25 e 26 mostram as áreas de trabalho do Arduino Uno e do PLX – DAQ, respectivamente.

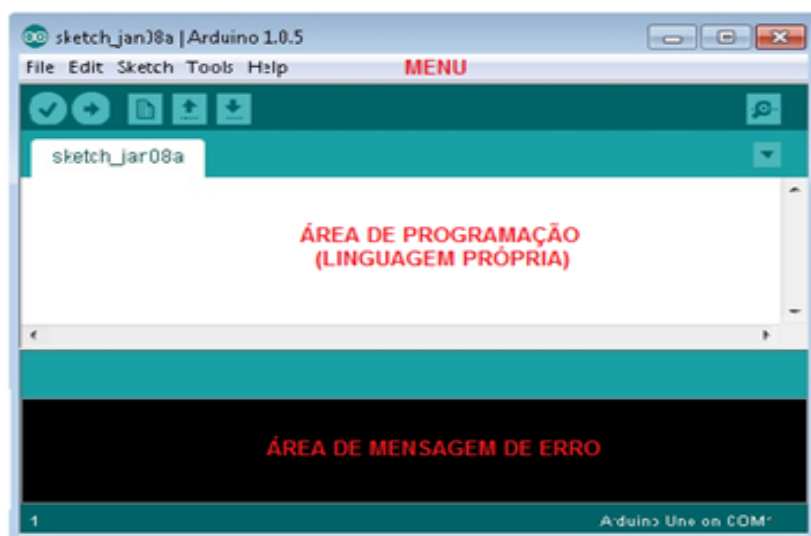


Figura 25 - Interface de programação do Arduino Uno.

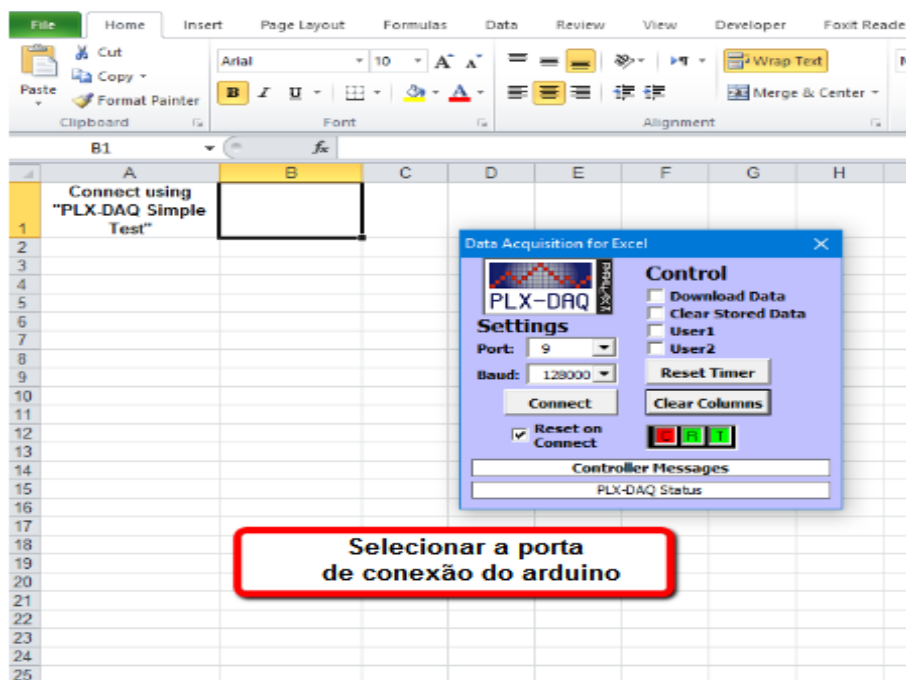


Figura 26 - Planilha de aquisição de dados PLX - DAQ.

O código fonte foi embarcado ao microcontrolador ATmega 328 com subordinação às especificações e dados de placa fornecidos pelos fabricantes.

A Tabela 13 estrutura os *softwares* utilizados nesse projeto.

Tabela 13 - *Software* de aquisição e de processamento de dados.

Etapas	Processos	Tecnologias
1°	Instalação do Arduino Uno. O manual de instalação do Arduino Uno encontra-se disponível em: (Anexo I)	Arduino
2°	Código fonte. O código fonte encontra – se disponível em: (Anexo II)	Linguagem Arduino Bases C/C++
3°	Instalação do PLX - DAQ. O manual de instalação do PLX – DAQ encontra-se disponível em: (Anexo III)	Parallax

3.3 Análise Estatística dos Resultados

A interpolação polinomial de Lagrange é o modelo que melhor descreve o escoamento de um fluido em um experimento (TRAVERSINE & BAUMGARTNER, 2008).

Esta ferramenta foi utilizada para se determinar o ponto de maior estabilidade da perda de carga, ou seja, o ponto em que a perda de carga tende a se tornar constante, por meio da interpolação de 100 pontos distintos de interesse entre os estados de fluidização incipiente e o estado de transporte das esferas de vidro.

O conjunto de pontos " $x_0, \dots, x_n$ ", são fornecidos na Figura 27, associados aos valores de uma função " $f_0, \dots, f_n$ ", respectivamente, bem como um polinômio $P(x)$, tal que $P(x_i) = f_i$ para $i = 0, \dots, n$.

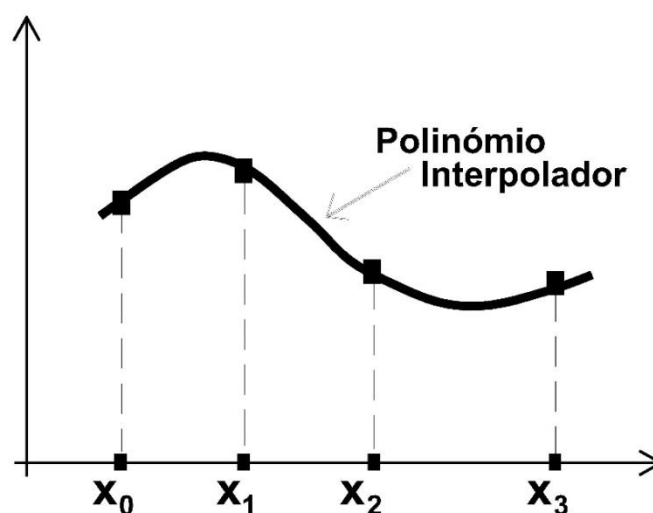


Figura 27 - Polinômio de terceiro grau.

A Equação 19 considera o somatório de monômios representativo do polinômio interpolador $P(x)$.

$$P(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (19)$$

Em que:

- a são os coeficientes complexos;
- x são as variáveis complexas;
- m é o grau ou ordem do polinômio.

A Equação 19 pode ser descrita como um sistema linear, como apresentado nas Equações 20 e 21.

$$a_0 + a_1x_0 + \cdots a_mx_0^m = f_0 \quad (20)$$

$$a_0 + a_1x_n + \cdots a_mx_n^m = f_n \quad (21)$$

Sendo:

f_0 É a função correspondente ao ponto x_0 ;

f_n É a função correspondente ao enésimo ponto.

Conforme Travessine e Baumgarther (2008), para que o sistema descrito seja possível e determinado é necessário que $m = n$. Desta maneira, as Equações 20 e 21 podem ser descritas como uma função matricial, conhecida como matriz de Vandermonde, conforme representado na Figura 28.

A unicidade do polinômio interpolador é equivalente a assegurar que o sistema seja possível e determinado para qualquer “ $x_0, \dots, x_n$ ” diferentes.

$$\begin{vmatrix} 1 & x_0 & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^n \\ 1 & x_n & x_n^n \end{vmatrix} \mathbf{x} \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_n \end{vmatrix}$$

Figura 28 - Matriz de Vandermonde.

Para “ $n + 1$ ” nós de interpolação, “ $x_0, \dots, x_n$ ” e os respectivos valores de “ $f_0, \dots, f_n$,” existe um único polinômio interpolador de grau $\leq n$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados dos Ensaio Mecânicos

Apresentam-se nas Figuras de 29 até 37 os resultados (triplicata), logaritmo da perda de carga (Pa) em função da velocidade (m/h), obtidos nos experimentos mecânicos. A distância entre os pontos de tomada de pressão, ponto de entrada e de saída de fluido (pressão diferencial), foi de 0,30 m.

Outros parâmetros relevantes dos experimentos foram: temperatura média de ensaios igual a 21, 5 ° C, peso específico da água (fluido de transporte) de 997,992 Kg/m³ e do tetracloreto de carbono (fluido manométrico) de 1549,000 kgf/m³.

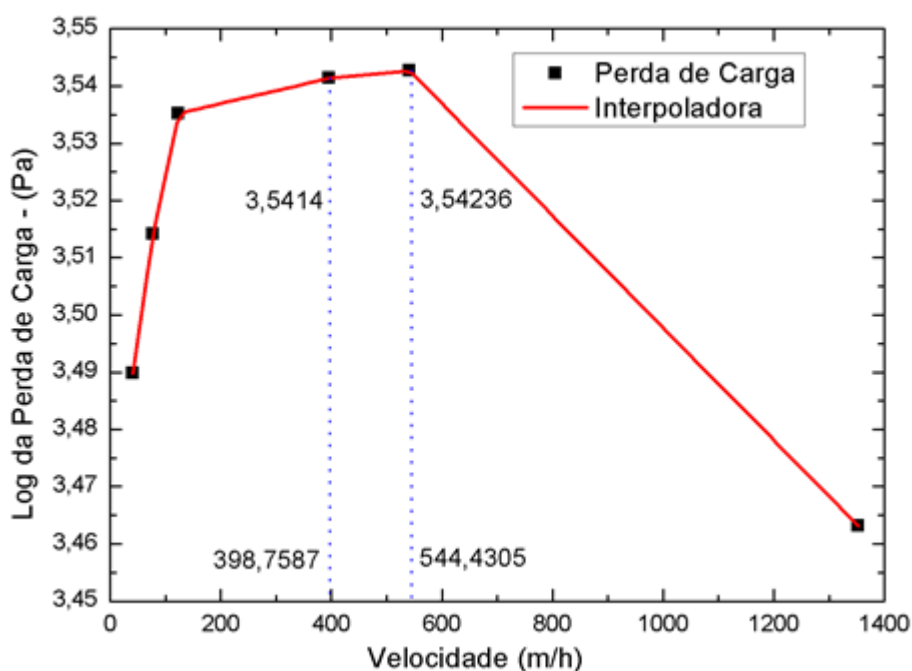


Figura 29 - Ensaio Mecânico 1 – Massa total das esferas de vidro de 130 g.

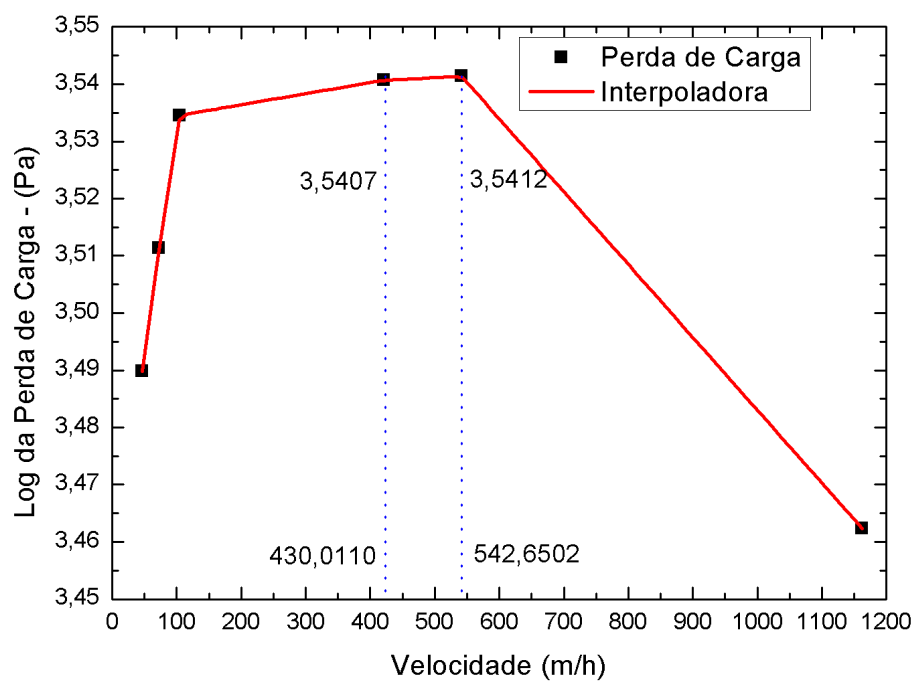


Figura 30 - Ensaio Mecânico 2 – Massa total das esferas de vidro de 130 g (duplicata).

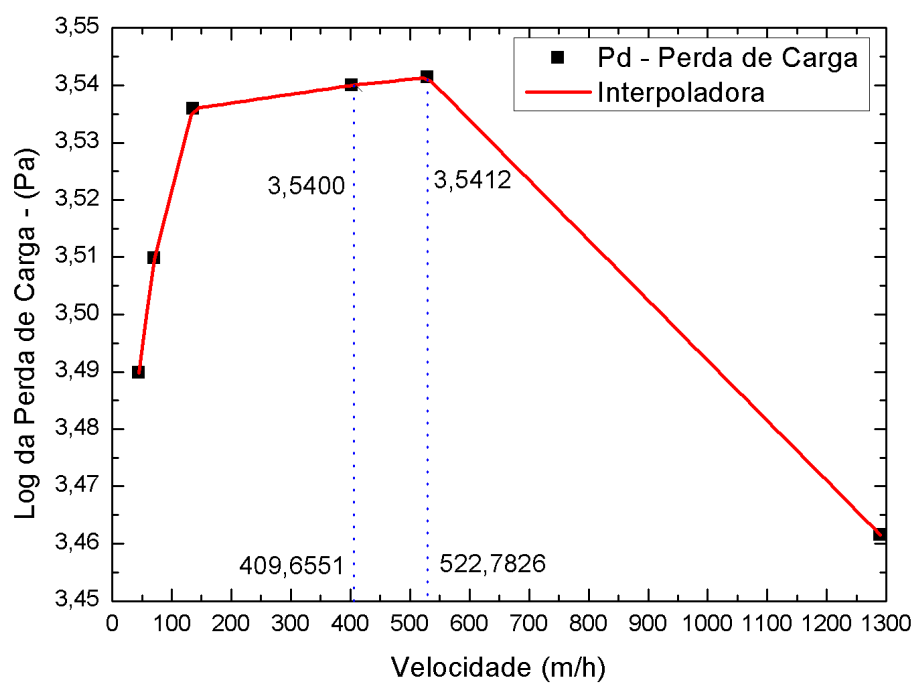


Figura 31 - Ensaio Mecânico 3 – Massa total das esferas de vidro igual a 130 g (triplicata).

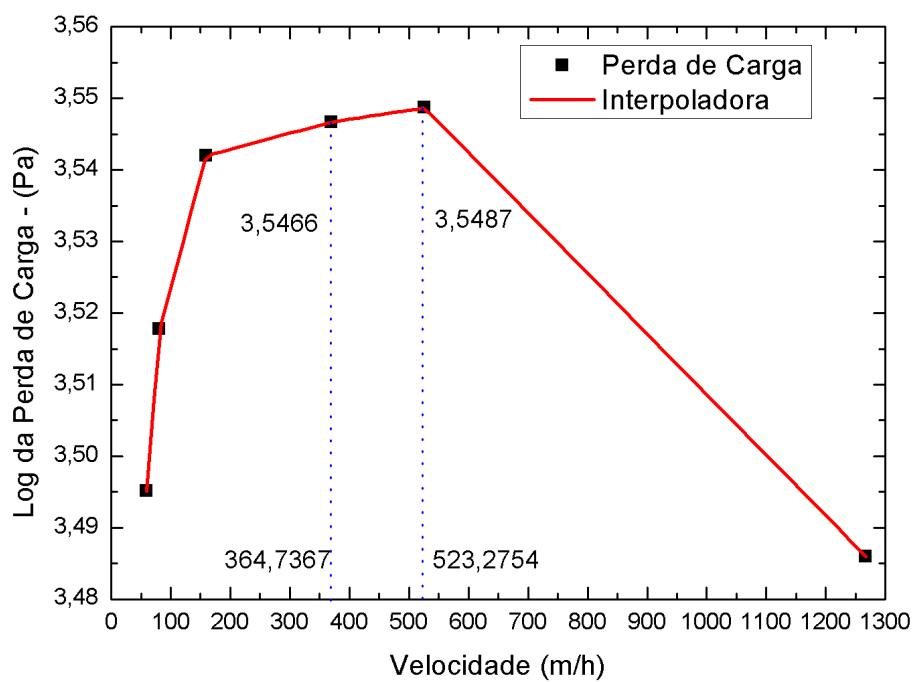


Figura 32 - Ensaio Mecânico 4 – Massa total das esferas de vidro de 140 g.

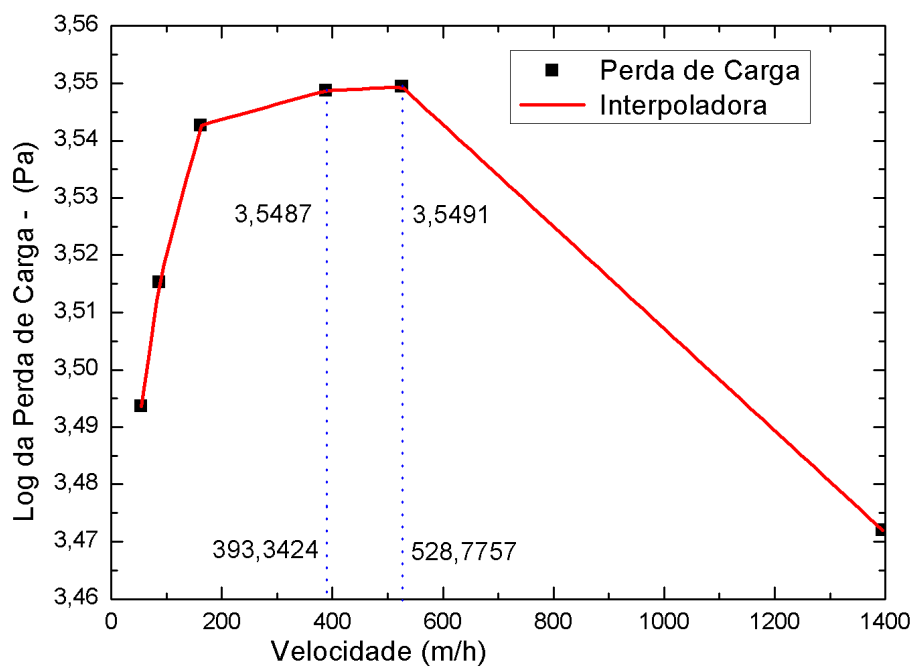


Figura 33 - Ensaio Mecânico 5 – Massa total das esferas de vidro de 140 g (duplicata).

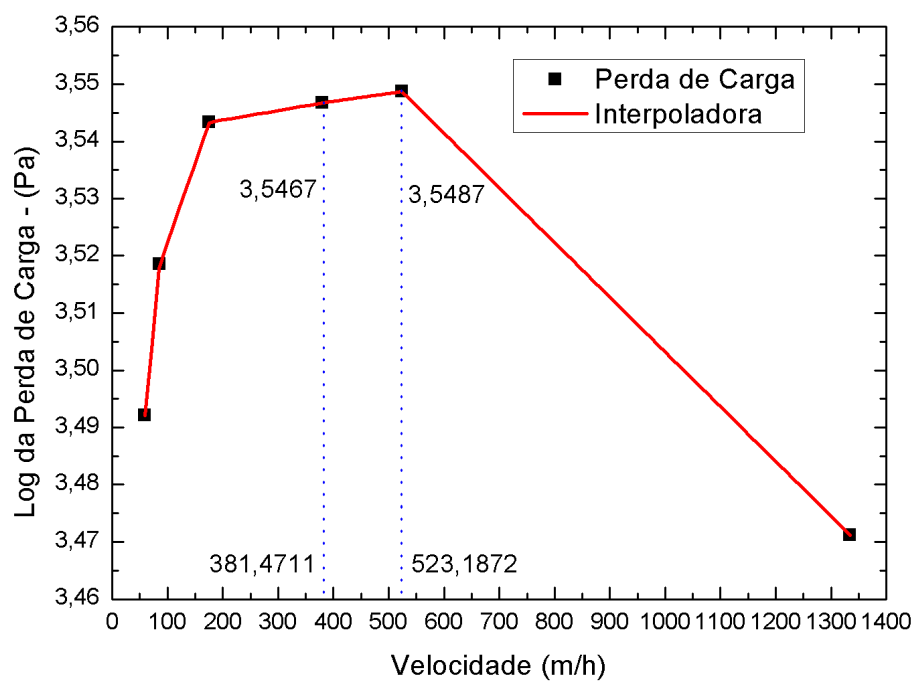


Figura 34 - Ensaio Mecânico 6 – Massa total das esferas de vidro de 140 g (triplicata).

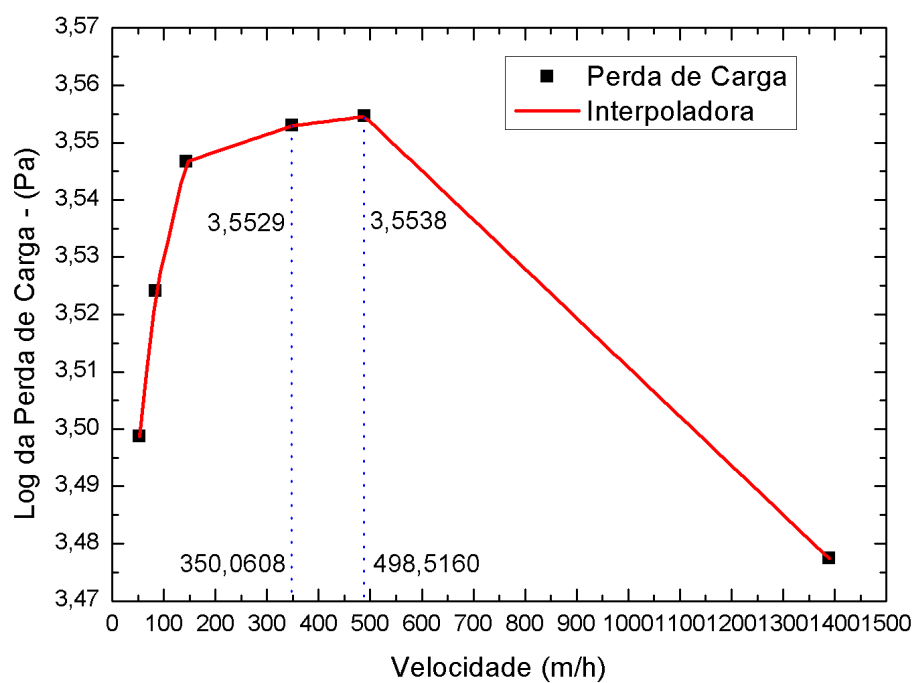


Figura 35 - Ensaio Mecânico 7 – Massa total das esferas de vidro de 150 g.

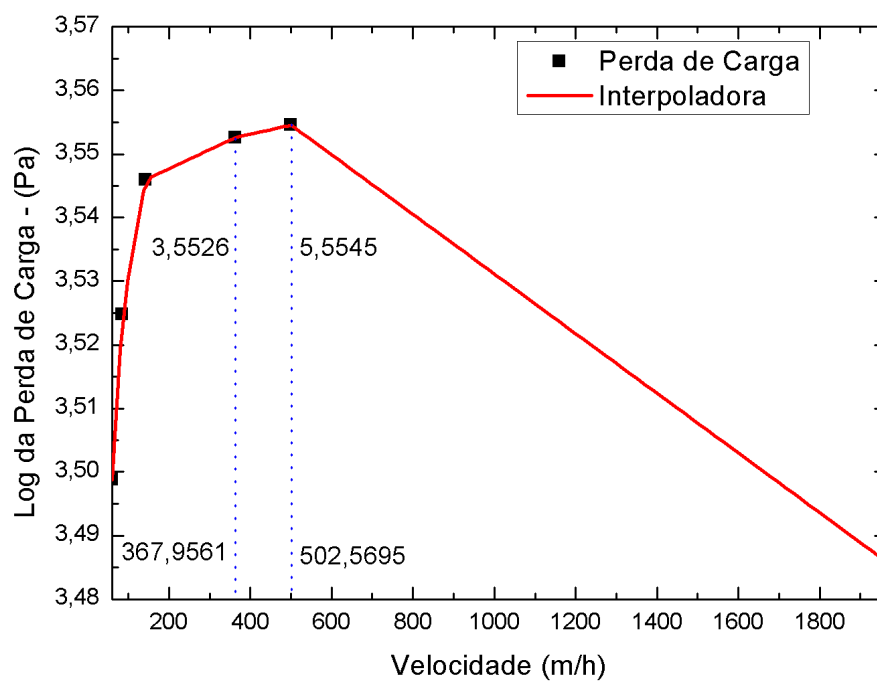


Figura 36 - Ensaio Mecânico 8 – Massa total das esferas de vidro de 150 g (duplicata).

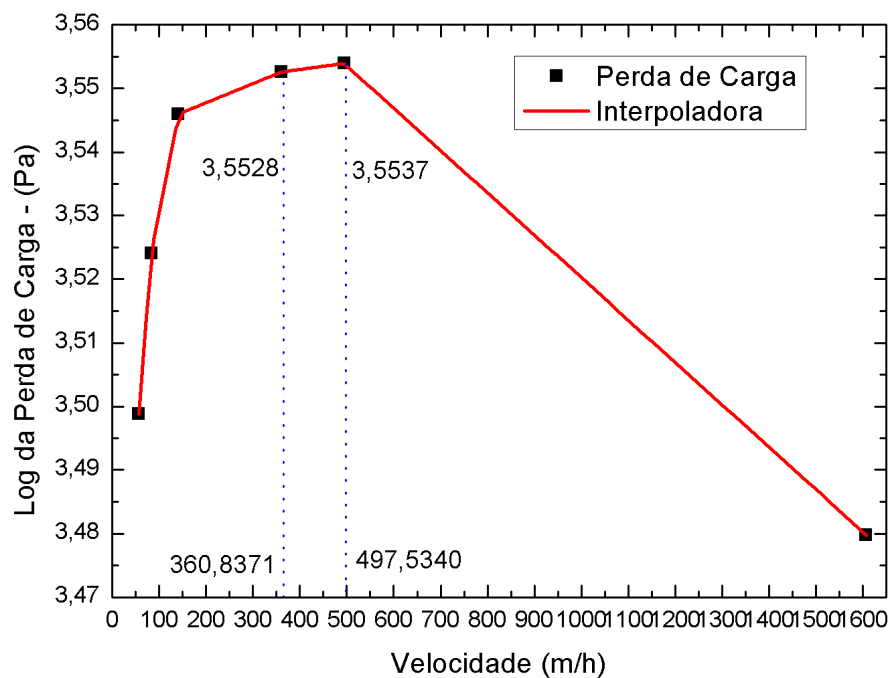


Figura 37 - Ensaio Mecânico 9 – Massa total das esferas de vidro de 150 g (triplicata).

4.2 Resultados dos Ensaio Eletrônicos

Durante os ensaios eletrônicos (triplicata), pôde-se observar em todos os casos a repetitividade dos dados coletados. Por tal razão, optou-se por apresentar apenas uma curva para cada amostra de pesquisa, conforme as Figuras de 38 até 40.

Para os experimentos eletrônicos, todos os parâmetros importantes de ensaios se mantiveram inalterados em relação aos ensaios mecânicos.

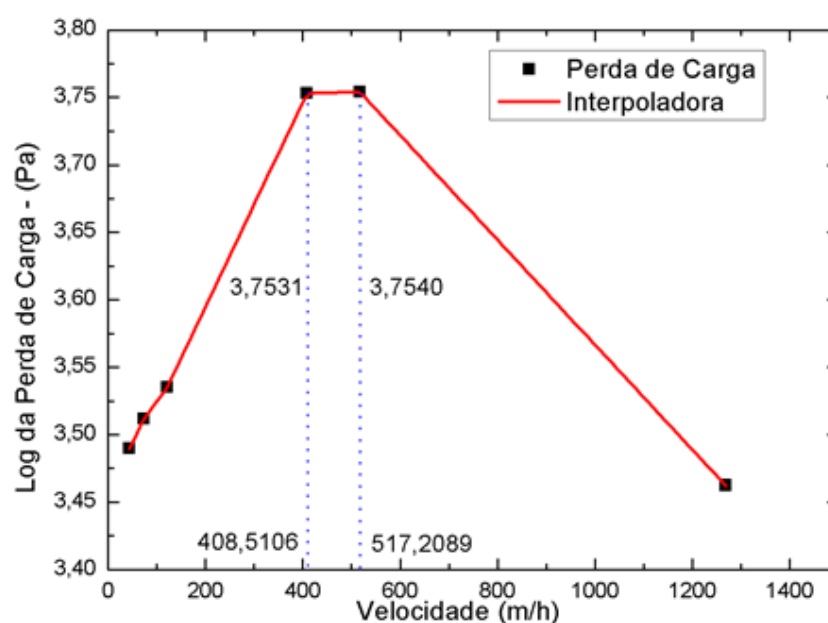


Figura 38 - Ensaio Eletrônico 10 – Massa total das esferas de vidro de 130 g.

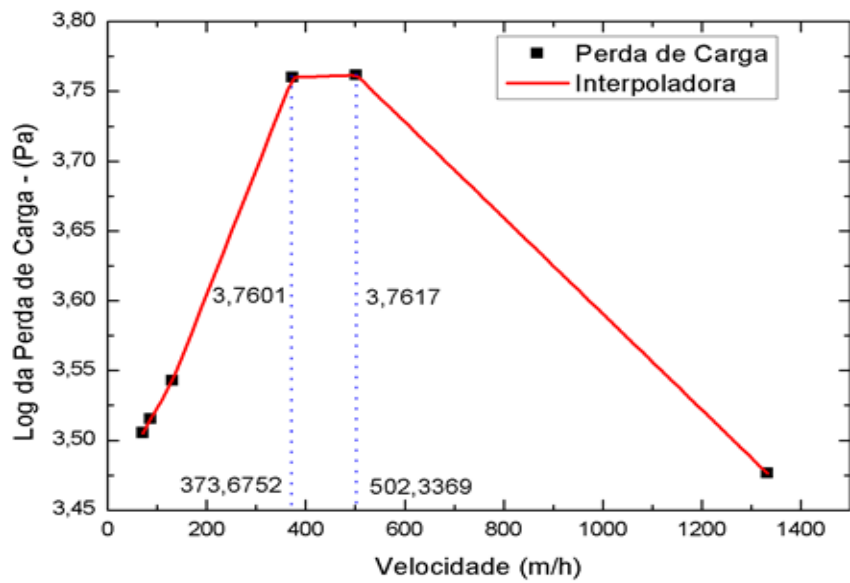


Figura 39 - Ensaio Eletrônico 11 – Massa total das esferas de vidro de 140 g.

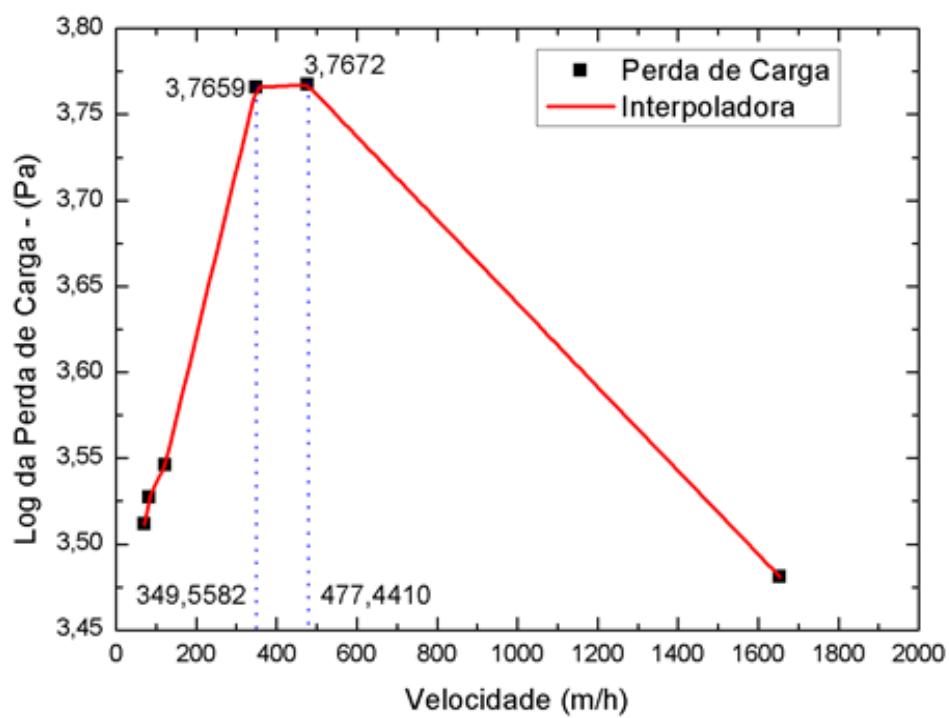


Figura 40 - Ensaio Eletrônico 12 – Massa total das esferas de vidro de 150 g.

4.3 Discussão

Durante os ensaios mecânicos e eletrônicos, por maior cautela e observação da metodologia, os valores que foram obtidos apresentaram graus de incertezas. Dessa forma, os dados de perda de carga e de velocidade mínima de fluidização, mesmo após tratamento matemático e estatístico, apresentaram discrepâncias por decorrência de possíveis erros, tais como: os sistemáticos, os aleatórios e outros.

A determinação do erro percentual foi realizada admitindo que os valores obtidos durante os ensaios mecânicos são os que mais se aproximam de um valor correto e seguindo duas etapas: para a análise dos dados durante o estado de Leito Fluidizado (triplicata) tomou-se a média aritmética entre 300 pontos interpolados segundo Lagrange, e foi realizado o cálculo do erro percentual entre os valores de centro obtidos durante os ensaios. Já para a análise referente à velocidade mínima de fluidização os dados foram computados em face da média aritmética dos valores obtidos nos métodos.

A partir da Figura 41 pode-se concluir que em todos os casos, as análises de perda de carga obedeceram a uma função direta em relação à massa total das partículas fluidizantes, ou seja, quanto maior a massa de ensaio, maior a perda de carga do sistema.

Ainda, os dados de perda de carga correlatos aos ensaios eletrônicos superaram em todos os estudos os dados de perda de carga quando ensaiados de forma mecânica em aproximadamente 6%.

Tal fator de instabilidade entre os processos está atrelado à adição de uma sonda de pressão estática e de um tubo *Pitot* no interior do tubo de fluidização, diminuindo a área livre para a circulação das esferas de vidro, além dos erros comuns de aferição. Outro ponto mensurável desse contexto, diz respeito à faixa de sensibilidade do transdutor de pressão diferencial, que foi utilizado para a transdução eletromecânica de sinal.

Com respeito à Figura 42 é possível se constatar que, durante a velocidade mínima de fluidização, os gradientes de velocidades obedeceram à razão inversa de proporcionalidade em relação à massa total das partículas, isto é, quanto menor a massa, maior a velocidade mínima para a fluidização.

Ao compararmos os resultados de velocidades, pode-se concluir que os

valores de velocidades, coletados de forma mecânica, superam os valores de velocidades coletados de forma eletrônica em aproximadamente 5%.

Observando a equação da continuidade, Equação 18, pode-se perceber que a área é uma grandeza estatística, determinável, já a velocidade é uma grandeza física dinâmica, medida de forma indireta (tubo de Pitot), apresentando desta forma, resultados dotados de incertezas. O fator de correção da velocidade (c), em medições indiretas, apresenta como objetivo a minimização dessas incertezas.

A Equação 22 apresenta a equação da velocidade de escoamento em tubo de Pitot corrigida por um fator C.

$$V_p = C \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \quad (22)$$

Sendo:

C É a constante de descarga do tubo de Pitot (variável que depende das características construtivas do instrumento).

O fator “C” de correção, e o fator de equalização “W”, utilizados para a correção de perturbações decorrentes da adição da sonda de pressão estática no sistema, são os indicativos úteis para se corrigir os dados eletrônicos de velocidade, segundo Equação (23).

$$V_p = C \cdot W \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \quad (23)$$

Em que:

W é a constante de equalização de perturbações.

É importante salientar que uma grande vantagem dos ensaios eletrônicos, além da melhor estabilidade, foi a maior velocidade de coleta de dados, de pelo menos vinte vezes em relação aos ensaios mecânicos.

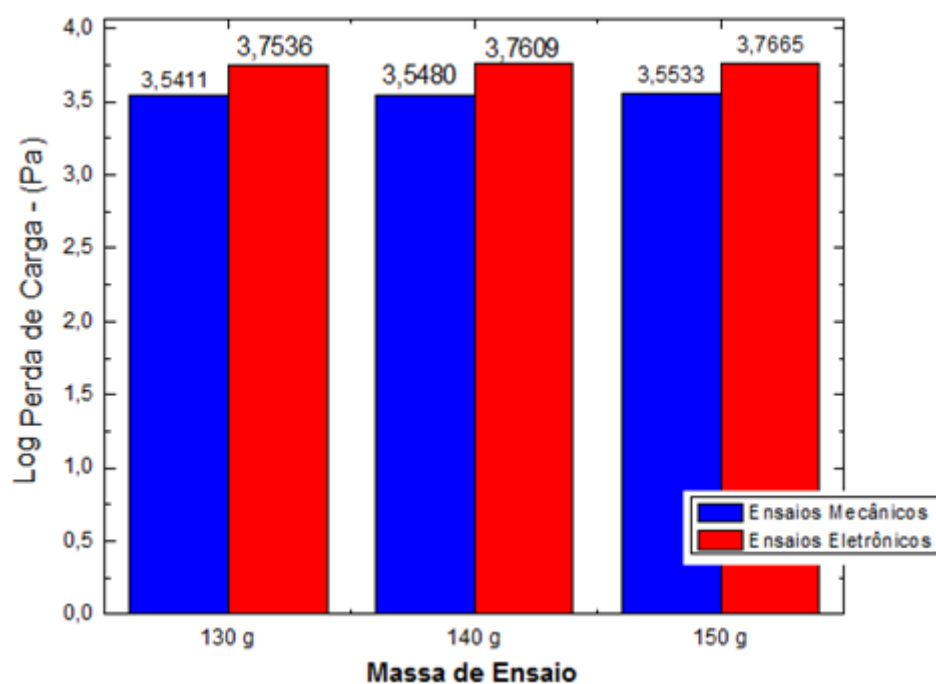


Figura 41 - Comparativos dos ensaios mecânicos e eletrônicos (perda de carga em Leito Fluidizado).

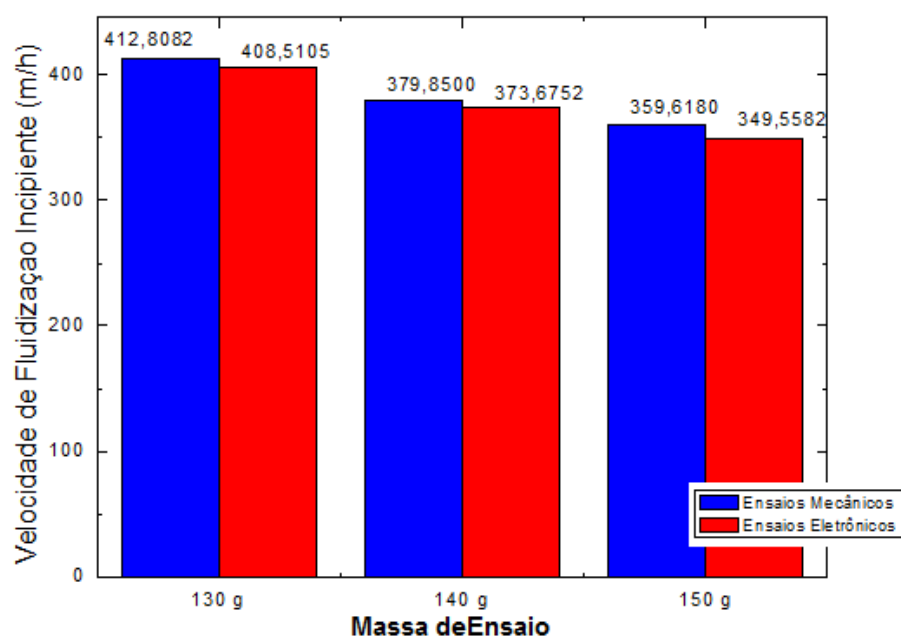


Figura 42 - Comparativos dos ensaios mecânicos e eletrônicos (velocidade mínima de fluidização).

5. CONCLUSÕES

O trabalho permitiu as seguintes conclusões:

- I. Durante os ensaios mecânicos, por mais cuidado com as rotinas adotadas durante os experimentos, os valores que foram obtidos apresentaram graus de incertezas, por decorrência de possíveis erros;
- II. Já durante os ensaios eletrônicos, pode-se observar uma melhor estabilidade na coleta dos dados;
- III. É importante salientar que uma grande vantagem dos ensaios eletrônicos, além da melhor estabilidade, foi a maior velocidade de coleta de dados, de pelo menos vinte vezes em relação aos ensaios mecânicos.
- IV. Em todos os casos, as análises de perda de carga obedeceram a uma função direta em relação à massa total das partículas fluidizantes, ou seja, quanto maior a massa de ensaio, maior a perda de carga do sistema;
- V. Os dados de perdas de cargas correlatos aos ensaios eletrônicos superaram em todos os estudos os dados de perda de carga quando ensaiados de forma mecânica em aproximadamente 6%; Esse fator de instabilidade entre os processos está atrelado à adição de uma sonda de pressão estática e de um tubo Pitot no interior da torre de fluidização, dessa forma diminuindo a área livre para a circulação das esferas de vidro.
- VI. Ao compararmos os resultados de velocidades, pode – se concluir que os valores de velocidades coletados de forma mecânica, superam os valores de velocidades coletados de forma eletrônica em aproximadamente 5%; Através da equação da continuidade, pode – se concluir que a área é uma grandeza estatística, determinável, já a velocidade é uma grandeza física dinâmica, medida de forma indireta (tubo de Pitot), apresentando, desta forma, resultados dotados de incertezas.

- VII. A utilização do *Software* de aquisição de dados (PLX – DAQ) possibilitou o acompanhamento em tempo real da planta;
- VIII. O módulo *bluetooth* permitiu análises remotas dos ensaios eletrônicos (30 metros), havendo simplicidade quanto à substituição desse *hardware* por uma placa *ethernet*;
- IX. A utilização de microcontroladores dedicados em sistemas de instrumentação eletrônica, tanto em uma unidade experimental, como em uma unidade real, podem oferecer os seguintes subprodutos: economia de energia (térmica e/ou elétrica), ajustes *on-line* das velocidades mínimas e máximas de fluidização, determinação em tempo real do valor da perda de carga, aumento da competitividade de novos produtos e adequação do meio empresarial aos conceitos da nova indústria.

6. SUGESTÕES

Com objetivo de se dar continuidade ao estudo, sugere – se:

- I. Repetir os experimentos utilizando diferenças maiores entre as massas das esferas de vidro;
- II. Substituir o sensor de vazão por uma válvula eletrônica;
- III. Projetar sistema de controle automático, utilizando os sinais elétricos oriundos dos sensores de pressão como malha de realimentação para a válvula eletrônica.

7. REFERÊNCIAS

ALCHEMIST ENGENHARIA. **Semicondutores**. 2006. Disponível em: <http://www.geocities.ws/afonsobejr/semicondutores.html>. 10/03/2017.

ARDUINO E CIA. **Display 7 segmentos**. 2013. Disponível em: <http://www.arduinoecia.com.br/2013/07/display-7-segmentos.html>. Acesso em: 09/05/2017.

BI, H. T.; ELLIS, N.; ABBAS, I. A; GRACE, J. R. **Uma revisão de última geração da fluidização turbulenta a gás**. Revista Acadêmica Ciência da Engenharia Química, v.55 n° 21. 2000.

CASTRO, S.R. **Precipitação química de estruvita: Recuperação de nutrientes em reator cônico de leito fluidizado utilizando magnésio industrial de baixo custo**. Engenharia Sanitária e Ambiental, 01/06/2015, Vol.20(2), pp.259-268.

BOD GARAGE. **Arduino – Pinagem do Arduino UNO R3**. Disponível em: <http://bodgarage.repofy.com/?p=959>. Acesso em: 10/05/2017.

BORGIO, R.F.; PIEBARKI, A.T.; KASAI, M.S. **Determinação Experimental da Distribuição de Velocidades**. Tese (Graduação) - Graduação em Mecânica dos Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATSUMOTO, T. **Eficiência na remoção de NAT, DBO e DQO utilizando reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos associado ao decantador de coluna em uma produção intensiva de tilápia**. Eng. Sanitária e Ambiental, vol.21 no. 3 Rio de Janeiro 09/2016.

CASSIOLATO, C. **Medição de Pressão: tudo o que você precisa saber**. Edição nº 135. São Paulo: Smar Equipamentos Industriais, 2008.

FREIRE, F.B. **Influência da imobilização de biomassa e do tamanho da partícula na fluidodinâmica de um reator anaeróbio de leito fluidizado**. Acta Scientiarum: Technology, 01/05/2008, Vol.30(1), pp.73-81.

DIAS, I. N. **MBBR Acoplado a Filtro Lento de Areia**. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

GELDART, D. **Tipos de fluidização de gás**. Revista Científica *Powder Technology*, v.07 n°05. 1973.

GERABA, D. **Desempenho de um Reator Aeróbico de Leito Fluidizado no Tratamento de Esgoto Sanitário**. Tese (Doutorado) - Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.

ARAÚJO, L. S. **Transferência de oxigênio em reatores de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos em meios bifásico e trifásico com variação da relação entre diâmetros.** Engenharia Sanitária e Ambiental, 01/09/2010, Vol.15(3), pp.267-274.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Tecnologia de cama fluida no processamento de materiais.** New York: CRC Press, 1999, 498p.

HODAPP, M.J. **Modelagem e Simulação de um Leito Fluidizado: Um Estudo Comparativo.** Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2009.

PARK, J. P. **Aerodinâmica de leitos vibrofluidizados: uma revisão.** Engenharia Agrícola, 01/12/2006, Vol.26(3), pp.856-869

IBARRA, A.R.G. **Desenvolvimento de Transmissores de Pressão Diferencial Baseados em Sensores Piezoresistivos e Saída Analógica de 4-20 mA.** Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2014.

ISMAEL, P. **Sensores de temperatura de uso industrial - parte 1.** 2017. Disponível em: <http://portalinstrumentacao.blogspot.com.br/2017/03/sensores-de-temperatura-de-uso.html> Acesso em: 10/05/2017

KERKHOF, P. J. A. M. **Fluid Bed Drying: Basics and Challenges.** *Proceedings of the 11th International Drying Symposium.* Poland: Keynote Lecture, 1996.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Engenharia de fluidez.** Oregon: Butterworth-Heinemann, 1991, 491p.

LA VEGA, A.S. **Introdução ao Kit de Desenvolvimento Arduino.** Material Didático para a Disciplina: Eletrônica II. Escola de Engenharia – TCE. Departamento de Engenharia em Telecomunicações – TET, Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, 2014.

LADIM, F. **Automatização do Leito do Rio Ribeira de Iguape.** Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo: São Paulo, 2015.

LLOYD, L. **Handbook of Industrial Catalysts.** Nova Iorque: Springer, 2011.

MORAES JR. D.; MORAES, M. S. **Laboratório de Operações Unitárias III.** Santos: Edição dos autores, 2014.

MSS ELETRÔNICAS. **Módulo sensor medidor de fluxo vazão de água eletrônico para 1/2 - YF-S201 + Código exemplo Arduino.** Disponível em: <http://www.msseletronica.com/detalhes/modulo-sensor-medidor-de-fluxo-de->

agua-eletronico-para-1-2-yf-s201-codigo-exemplo-arduino/988.html. Acesso em: 25/04/2017.

NADIEL COMÉRCIO. **Sensor de Fluxo de Água**. 2015. Disponível em: <http://www.nadielcomercio.com.br/blog/2015/10/14/sensor-de-fluxo-de-agua/> Acesso em: 23/10/2017.

NITZ, M.; GUARDANI, R. **Fluidização Gás – Sólido: Fundamentos e Avançados**. Revista Brasileira de Engenharia Química, 12/2008.

NXP. **NXP Semiconductors**. Disponível em: <<http://www.nxp.com/>>. Acesso em: 10/03/2017.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Técnicas Avançadas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2002.

RASIA, L.A. **Estudo e Aplicação de Materiais Piezoresistivos para Obtenção das Propriedades Elétricas, Térmicas e Mecânicas em Transdutores**. Dissertação da Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2009.

SOARES, M.J. Microcontroladores e suas Ferramentas de Desenvolvimento. **Eletrônica Total**, v. 1 n. 103, p. 60-64, nov. dez. 2004.

SCHNEIDER, P. **Medição de Pressão em Fluidos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2000.

SILVA, L. M.C. **Eletrônica Básica – Introdução**. Cornélio Procópio – Universidade de Tecnologia Federal do Paraná: Curitiba, 2007. Disponível em: < <http://www.cp.utfpr.edu.br/chiesse/Eletronica/Introducao.pdf>>. Acesso em: 10/03/2017.

SOUZA, D.J; LAVINIA, N.C. **Conectando o PIC 16F877A: Recursos Avançados**. São Paulo: Érica, 2003.

SOUZA, D.J. **Desbravando o PIC**: Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A. 6 ed. São Paulo: Érica, 2003.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design. In: Topics in Chemical Engineering**, v. 3. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

TEIXEIRA, C.H. **Avaliação Experimental da Perda de Carga e Velocidade Mínima de Fluidização em Função da Variação da Massa de Esferas em Leito Fluidizado**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Química. Universidade Santa Cecília, Unisanta, Santos, 2017.

TRAVESSINI, R.; BAUMGARTNER, D. **Modelagem Matemática do Escoamento de um Fluido (água) Utilizando Interpolação Polinomial**. 1º Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste:

Belém, 2008.

WHITE, F.M. **Mecânica dos Fluidos**. 4^a ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.

APÊNDICE A

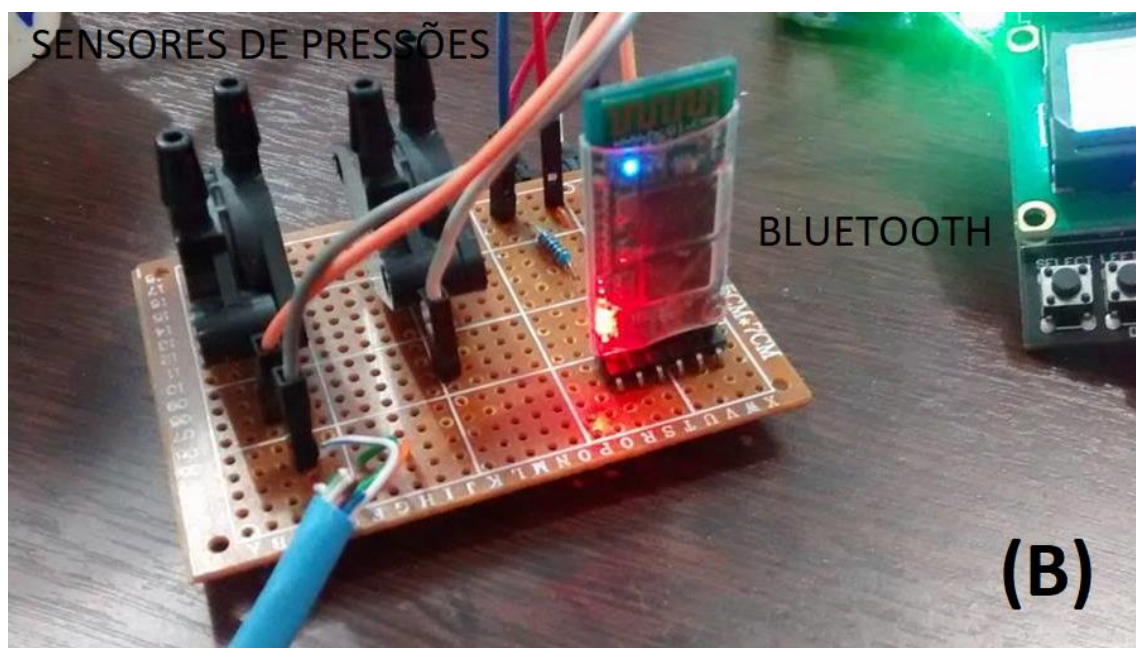


Figura A 1 - Desenvolvimento do circuito eletrônico: (A) Conexões utilizando protoboard; (B) Conexões utilizando trilhas.

APÊNDICE B

Tabela B 1 - Resultados dos cálculos analíticos para a massa de 130 g de esfera de vidro.

RIMEIRO ENSAIO (m=130 g)										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{tetra} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	7,50	2,80	3089,1031	3,4898	914,50	60,63	0,0168	54,2999	0,0544	41,2008
Fixo	7,50	6,10	3267,4006	3,5142	1806,80	63,58	0,0177	102,3039	0,1025	77,6246
Início da fluidização	7,80	9,10	3429,4893	3,5352	2728,80	60,12	0,0167	163,4012	0,1637	123,9832
Fluidização	15,60	10,00	3478,1159	3,5413	4079,90	28,15	0,0078	521,7634	0,5227	395,8959
Fluidização	22,80	10,20	3488,9218	3,5427	3026,70	15,28	0,0042	713,0969	0,7144	541,0731
Transporte de Material	31,80	-0,60	2905,4026	3,4632	3198,00	6,46	0,0018	1782,1672	1,7853	1352,2465
SEGUNDO ENSAIO										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{tetra} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	7,50	2,80	3089,1031	3,4898	1073,50	62,34	0,0173	61,9923	0,0621	47,0376
Fixo	7,50	5,70	3245,7888	3,5113	1607,00	60,28	0,0167	95,9721	0,0961	72,8203
Início da fluidização	7,80	9,00	3424,0863	3,5345	2360,20	61,65	0,0171	137,8219	0,1381	104,5745
Fluidização	15,60	9,90	3472,7129	3,5407	2841,50	18,40	0,0051	555,9457	0,5569	421,8322
Fluidização	22,80	10,00	3478,1159	3,5413	2656,10	13,40	0,0037	713,5791	0,7148	541,4390
Transporte de Material	31,80	0,70	2899,9996	3,4624	2314,50	5,44	0,0015	1531,6544	1,5344	1162,1662
TERCEIRO ENSAIO										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{tetra} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	7,50	2,80	3089,1031	3,4898	1007,90	61,00	0,0169	59,4826	0,0596	45,1333
Fixo	7,50	5,50	3234,9829	3,5099	1552,00	60,00	0,0167	93,1200	0,0933	70,6562
Início da fluidização	7,80	9,20	3434,8922	3,5359	2996,10	60,25	0,0167	179,0201	0,1793	135,8342
Fluidização	15,60	9,80	3467,3100	3,5400	2831,30	19,19	0,0053	531,1454	0,5321	403,0147
Fluidização	22,80	10,00	3478,1159	3,5413	2452,30	12,65	0,0035	697,8877	0,6991	529,5330
Transporte de Material	31,80	-0,80	2894,5967	3,4616	3096,90	6,56	0,0018	1699,5183	1,7025	1289,5354

Tabela B 2 - Resultados dos cálculos analíticos para a massa de 140 g de esfera de vidro.

PRIMEIRO ENSAIO (m=140 g)										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{tetra} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	8,33	3,50	3126,7808	3,4951	1315,10	60,02	0,0167	78,8797	0,0790	59,8545
Fixo	8,33	6,60	3294,2891	3,5178	1828,50	61,39	0,0171	107,2259	0,1074	81,3638
Início da fluidização	9,40	10,10	3483,4115	3,5420	3125,50	53,54	0,0149	210,1765	0,2106	159,4834
Fluidização	13,75	10,80	3521,2359	3,5467	3006,90	22,22	0,0062	487,1665	0,4881	369,6654
Fluidização	21,00	11,10	3537,4464	3,5487	2120,00	11,00	0,0031	693,8182	0,6951	526,4741
Transporte de Material	31,80	2,30	3061,9388	3,4860	3370,10	7,27	0,0020	1669,9738	1,6730	1267,1880
SEGUNDO ENSAIO										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{tetra} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	8,33	3,30	3115,9738	3,4936	1225,50	61,14	0,0170	72,1649	0,0723	54,7592
Fixo	8,33	6,25	3275,3769	3,5153	1924,60	60,78	0,0169	113,9941	0,1142	86,4995
Início da fluidização	9,40	10,20	3488,8150	3,5427	2927,10	49,18	0,0137	214,2869	0,2147	162,6024
Fluidização	13,75	11,10	3537,4464	3,5487	2969,60	20,90	0,0058	511,6324	0,5126	388,2303
Fluidização	21,00	11,20	3542,8499	3,5494	2603,10	13,52	0,0038	693,3896	0,6947	526,1489
Transporte de Material	31,80	0,50	2964,6759	3,4720	3519,90	6,89	0,0019	1839,1350	1,8425	1395,5486
TERCEIRO ENSAIO										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{tetra} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	8,33	3,10	3105,1668	3,4921	1336,40	61,47	0,0171	78,2665	0,0784	59,3892
Fixo	8,33	6,70	3299,6926	3,5185	1884,20	59,93	0,0166	113,1840	0,1134	85,8849
Início da fluidização	9,40	10,30	3494,2185	3,5434	2947,60	45,80	0,0127	231,6891	0,2321	175,8073
Fluidização	13,75	10,80	3521,2359	3,5467	2514,40	18,05	0,0050	501,6259	0,5025	380,6373
Fluidização	21,00	11,10	3537,4464	3,5487	2660,60	13,88	0,0039	690,3178	0,6916	523,8181
Transporte de Material	31,80	0,40	2959,2724	3,4712	2848,80	5,83	0,0016	1759,1218	1,7623	1334,8340

Tabela B 3 - Resultados dos cálculos analíticos para a massa de 150 g de esfera de vidro.

PRIMEIRO ENSAIO (m=150 g)										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{leito} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	8,50	4,00	3153,3060	3,4988	1180,80	60,70	0,0169	70,0310	0,0702	53,1503
Fixo	8,50	7,50	3342,4946	3,5241	1894,00	61,00	0,0169	111,7770	0,1120	84,8336
Início da fluidização	9,50	10,80	3520,8724	3,5467	3174,70	60,50	0,0168	188,9078	0,1893	143,3723
Fluidização	15,60	11,75	3572,2236	3,5529	3901,80	30,50	0,0085	460,5403	0,4615	349,5288
Fluidização	22,80	12,00	3585,7371	3,5546	2776,20	15,50	0,0043	644,7948	0,6461	489,3695
Transporte de Material	31,80	1,20	3001,9551	3,4774	4474,50	8,80	0,0024	1830,4773	1,8342	1389,2477
SEGUNDO ENSAIO										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{leito} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	8,50	4,00	3153,3060	3,4988	1323,50	60,00	0,0167	79,4100	0,0796	60,2685
Fixo	8,50	7,60	3347,9000	3,5248	1852,50	59,70	0,0166	111,7085	0,1119	84,7816
Início da fluidização	9,60	10,70	3515,4670	3,5460	2471,50	47,60	0,0132	186,9202	0,1873	141,8638
Fluidização	15,60	11,70	3569,5209	3,5526	3316,50	25,00	0,0069	477,5760	0,4785	362,4581
Fluidização	22,80	12,00	3585,7371	3,5546	2929,50	16,00	0,0044	659,1375	0,6605	500,2549
Transporte de Material	31,80	2,30	3061,4144	3,4859	3019,20	4,20	0,0012	2587,8857	2,5931	1964,0857
TERCEIRO ENSAIO										
Condição do leito	L _{leito} (cm)	H _{leito} (cm)	dP (Pa)	Log dP (Pa)	m _{coletada} (g)	t (s)	t(h)	w (kg/h)	Q(m³/h)	v (m/h)
Fixo	8,50	4,00	3153,3060	3,4988	1275,50	60,51	0,0168	75,8850	0,0760	57,5932
Fixo	8,50	7,50	3342,4946	3,5241	1845,30	60,42	0,0168	109,9484	0,1102	83,4457
Início da fluidização	9,60	10,70	3515,4670	3,5460	3383,00	20,37	0,0057	598,0260	0,5992	453,8741
Fluidização	15,60	11,70	3569,5209	3,5526	2675,70	20,29	0,0056	474,7422	0,4757	360,3074
Fluidização	22,80	11,90	3580,3317	3,5539	2809,50	15,52	0,0043	651,8982	0,6532	494,7606
Transporte de Material	31,80	1,50	3018,1713	3,4797	2412,10	4,10	0,0011	2117,9415	2,1222	1607,4197

Tabela B 4 - Resultados Obtidos durante os ensaios eletrônicos.

Leito	Log (ΔP)	Velocidade (m/s)
Massa de 130 g		
Leito Fixo	3,4898	44,4572
Leito Fixo	3,5156	81,5387
Início da Fluidização	3,5338	118,6103
Fluidização Inicial	3,7531	408,5106
Fluidização Final	3,7540	517,2089
Transporte das Esferas	3,4624	1267,9827
Massa de 140 g		
Leito Fixo	3,5051	68,4620
Leito Fixo	3,5053	71,2918
Início da Fluidização	3,5418	134,3283
Fluidização Inicial	3,7601	373,6752
Fluidização Final	3,7617	502,3369
Transporte das Esferas	3,4758	1332,9007
Massa de 150 g		
Leito Fixo	3,5112	70,5169
Leito Fixo	3,5272	86,0912
Início da Fluidização	3,5455	116,8072
Fluidização Inicial	3,7659	359,5582
Fluidização Final	3,7672	477,4410
Transporte das Esferas	3,4806	1658,2305

ANEXO I

Tabela 1, anexo 1 – Procedimentos de Instalação do Arduino Uno.

1° Passo	Fazer o download dos drivers do Arduino em: http://arduino.cc/en/
2° Passo	Descompactar os arquivos
3° Passo	Instalar o Arduino: a) Conectar o Arduino no seu computador; b) Entrar em painel de controle; c) Na aba de hardwares e sons, entrar em exibir impressoras e dispositivos.
4° Passo	Selecionar: a) Não especificado ou desconhecido.
5° Passo	Abrirá uma janela – Propriedade de dispositivo desconhecido; Selecionar: a) Hardware.
6° Passo	Selecionar: a) Dispositivo desconhecido.
7° Passo	Selecionar: a) alterar configurações.
8° Passo	Selecionar: a) Atualizar drives
9° Passo	Selecionar: a) Procurar software de drives no computador.
10° Passo	Selecionar: a) O Download feito no site do Arduino; b) Selecionar a pasta de drivers.
11° Passo	Aparecerá uma mensagem de segurança; Selecionar: a) Instalar assim mesmo.
12° Passo	a) O drive será instalado.
14° Passo	a) Anotar qual porta USB esta sendo utilizada.

Fonte: La Vega, 2014.

ANEXO II - Código Fonte

```

#include <SoftwareSerial.h>
#include <LiquidCrystal.h>
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX
//The circuit:
//* RX is digital pin 10 (connect to TX of other device)
//* TX is digital pin 11 (connect to RX of other device)
const float SensorOffset = 40;
const float SensorOffset1 = 105;
volatile int flow_frequency;
unsigned int L_hour;
unsigned char flowmeter = 2;
unsigned long currentTime;
unsigned long cloopTime;
float sensorValue1;
float sensorValue2;
int linha = 0;
int x=0;
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
char ch;
void flow ()
{
  flow_frequency++;
}
void setup()
{
  mySerial.begin(9600); // inicializa a serial virtual que vai ao modulo bluetooth
  pinMode(flowmeter, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, flow, RISING);
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL, Data, HORA, L/m, S1, S2 ");
  cloopTime = millis();
}
void loop() {
  sei(); //Habilita interrupção
  delay (1000); //Aguarda 1 segundo
  cli(); //Desabilita interrupção
  L_hour = (flow_frequency / 5.5);
  flow_frequency = 0;
  bluetooth(); //chama a funcao que envia os dados pelo bluetooth
  tela(); //chama a funcao que aciona a tela
  Serial.print("DATA, DATE, TIME,");
  Serial.print(L_hour, DEC);
  Serial.print(",");
  Serial.print(sensorValue1, 2);
  Serial.print(",");
  Serial.println(sensorValue2, 2);
  sensorValue1 = (analogRead(A0)-SensorOffset)/1000.0;
  sensorValue2 = (analogRead(A1)-SensorOffset1)/1000.0;
  sensorValue1 = (((analogRead(A0)* 0.0048875855327468)-0.2)/0.45);
  sensorValue2 = (((analogRead(A1)* 0.0048875855327468)-0.2)/0.45);

  delay(500);
  linha++;
  x++;
  if (linha > 360)

```

```

    {
        linha = 0;
        Serial.println("ROW,SET,2");
    }
void tela()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("S1 ");
    lcd.print(sensorValue1, 2);
    lcd.print("Pa");
    lcd.print(" SV: ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("S2 ");
    lcd.print(sensorValue2, 2);
    lcd.print("Pa ");
    lcd.print(l_hour, DEC);
    lcd.print(" L/min");
    delay(800);
}
void bluetooth()
{
    mySerial.print("S1 ");
    mySerial.print(sensorValue1, 2);
    mySerial.println("Pa");
    mySerial.print("S2 ");
    mySerial.print(sensorValue2, 2);
    mySerial.println("Pa");
    mySerial.print(l_hour, DEC);
}

```

ANEXO III

Tabela 2, anexo III – Procedimentos de Instalação do PLX – DAQ.

1º Passo	Fazer o download dos drivers PLX – DAQ. http://www.parallax.com/Portals/0/Downloads/sw/plx_daq
2º Passo	Descompactar os arquivos.
3º Passo	Instalar o PLX – DAQ: a) Selecionar “next” em todas as abas de instalação.
4º Passo	Depois de concluída a instalação, será criada uma pasta na área de trabalho com nome PLX – DAQ.
5º Passo	Selecione a pasta PLX – DAQ, haverá um atalho para o programa do Excel (PLX-DAQ Spreadsheet).
6º Passo	Será preciso habilitar as ferramentas macros no Excel.

Fonte: Borgo, Piebarski e Kasai, 2005.

ANEXO IV

Tabela 3, anexo IV – Cronograma Financeiro.

Componentes	Modelos	Quantidades	Investimentos R\$	Referências
Materiais Reciclados			10,00	
LCD 16X2	<i>Shield Display</i>	1	19,50	ARDUINO & CIA, 2017
Placa Arduino	<i>UNO</i>	1	28,99	ARDUINO & CIA, 2017
Sensor de Pressão	<i>MPX 5010</i>	2	139,80	ARDUINO & CIA, 2017
Módulo Bluetooth	<i>Hc05</i>	1	19,99	BOD GARAGE, 2017
Cabo Jumper	20 cm	40	9,90	MSS ELETRÔNICA, 2017
Placa Circuito Impresso	Pcb Fenolite 5x7	1	2,92	MSS ELETRÔNICA, 2017
Sensor de Vazão	<i>YFS201</i>	1	21,90	MSS ELETRÔNICA, 2017
TOTAL DO INVESTIMENTO (R\$) = 253,00				