



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Sistema Supervisório para Bancada de Ensaio de Picoturbina Hidráulica Indalma

Autor: Rodrigo de Oliveira Calixto
Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri van els

Brasília, DF
2015



Rodrigo de Oliveira Calixto

Sistema Supervisório para Bancada de Ensaio de Picoturbina Hidráulica Indalma

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri van els

Brasília, DF

2015

Rodrigo de Oliveira Calixto

Sistema Supervisório para Bancada de Ensaio de Picoturbina Hidráulica Indalma / Rodrigo de Oliveira Calixto. – Brasília, DF, 2015-

120 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri van els

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2015.

1. Supervisório. 2. Picoturbina. I. Prof. Dr. Rudi Henri van els. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Sistema Supervisório para Bancada de Ensaio de Picoturbina Hidráulica Indalma

CDU 02:141:005.6

Rodrigo de Oliveira Calixto

Sistema Supervisório para Bancada de Ensaio de Picoturbina Hidráulica Indalma

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, Junho de 2015:

Prof. Dr. Rudi Henri van els
Orientador

Prof. Dr. Leonardo Aguayo
Convidado 1

**Prof. Dr. Luís Filomeno de Jesus
Fernandes**
Convidado 2

Brasília, DF
2015

Esse trabalho é dedicado à minha família, como forma de retribuição à toda atenção, compreensão, paciência e incentivo dados a mim durante todos esses anos de estudos.

Agradecimentos

Ao Senhor Deus e Nossa Senhora, que permanecem sempre ao meu lado durante toda a minha vida, me proporcionando saúde, paz, confiança, esperança, aumentando a cada dia minha fé, trazendo à minha casa o conforto e a segurança enquanto eu cuido das obras que puseram em minhas mãos.

À Universidade de Brasília e a todo ambiente acadêmico por ter me acolhido de maneira social, financeira, estrutural e acadêmica com excelência me mostrou o contexto da palavra engenharia tendo como exemplos professores de altíssimo grau de formação. Como o maior representante de tal suporte, gostaria deixar minha enorme gratidão ao professor Rudi, meu orientador, que se deu como exemplo de um verdadeiro engenheiro e solucionador de problemas. Agradeço sem palavras para tamanha ajuda que o senhor, professor Rudi, me forneceu durante todo o curso, tendo paciência e acreditando no meu trabalho desde sempre e sendo o responsável direto desse êxito.

À banca avaliadora deste trabalho composta pelo professor Dr. Leonardo Aguayo e pelo professor Dr. Filomeno, que além de grandes acadêmicos, se mostraram grandes amigos, avaliando este trabalho com olhos que vão além do ambiente acadêmico, atingindo uma previsão inclusive do meu futuro na sociedade como profissional colaborador de um país melhor. Agradeço-os pelo exemplo de excelentes profissionais e cidadãos comprometidos com o nosso meio.

Aos meus amigos e futuros colegas de profissão, por fazer parte da minha história. Não posso citar todos, mas quero registrar minha gratidão ao Danilo, Olga Lúcia, Ramsay, Niegel, Maria Eugênia, Juliany, Pedro, Tiago e Manu que contribuíram diretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo Thiago Nunes, um agradecimento especial, por me incentivar, ensinar e ajudar na confecção deste trabalho. Senão fosse esta ajuda, provavelmente não o teria concluído com tal empolgação e dedicação. Meu muito obrigado.

Ao senhor Washington Póvoa, como representante da empresa WP Inovações tecnológicas, por conceder a confiança em me integrar à equipe de trabalho como um aprendiz de engenheiro, fornecendo-me toda a estrutura para o meu crescimento profissional.

À minha família, por tamanho amor e carinho dedicados a mim desde sempre, mas especialmente agora, por enfrentar comigo os momentos mais difíceis que já passei e por disfrutar e alegrar-se nos momentos mais felizes.

Aos meus padrinhos, que foram os principais protagonistas da minha história, e proporcionando uma oportunidade grandiosa de construir o futuro e podendo até mesmo me basear em seus maravilhosos exemplos. São também os incentivadores da minha caminhada rumo à mudança da realidade da minha família para algo extremamente melhor.

À minha mãe Maria Anita, que compartilhou cada segundo do meu sonho, sonhando também comigo e por isso sempre compreendendo a dificuldade de enfrentar os estudos, algo que eu nunca consegui expressar em palavras os outros. Fez e sempre faz o possível e o impossível para que eu sempre tivesse as melhores condições para realizar tal missão.

Ao meu falecido pai Lázaro Calixto, que hoje não se faz presente fisicamente, mas com certeza, dos céus, deve se alegrar com a conclusão dessa etapa tão importante na vida de seu filho. Obrigado pelo tempo em que convivemos e pude compartilhar as dificuldades e alegrias que nesse ambiente acadêmico passei.

À minha amada companheira Ana Cristina, que compartilha comigo uma experiência inexplicável de construirmos uma nova família, uma nova esperança, um futuro ainda mais cheio de amor, uma nova vida e uma vida nova, chamado Heitor.

*O orgulho do homem o humilha, mas o de espírito humilde obtém honra.
(Provérbios 29:23)*

Resumo

A partir da problemática de eletrificação rural em comunidades interioranas de estados como o Pará, surgiu a oportunidade de pequenos empreendimentos de distribuir energia elétrica a partir da produção descentralizada baseada na configuração modificada de turbina hidráulicas. Um exemplar foi trazido para a Universidade de Brasília com o objetivo de se avaliar o potencial hidroelétrico da turbina do fabricante Indalma, transferir o conhecimento adquirido para os empresários locais e então o consequente aproveitamento dessa solução para geração de energia eletrica e inserção dessa tecnologia no setor elétrico brasileiro, uma vez evoluída suas características técnicas. Trabalhos anteriores a este desenvolveram o suporte físico e mecânico para que ensaios pudessem ser feitos. Uma instrumentação inicial foi posta em prática atendendo aos primeiros ensaios da turbina. O presente trabalho propõe uma automatização da estrutura da bancada no que diz respeito à comunicação entre dispositivos e controle, usando para tal uma rede de comunicação serial e um protocolo para gerir tal comunicação. O sistema supervisório proposto mostra a integração entre o *software* SCADABR e todo o *hardware* além de melhorar a agilidade, segurança e inteligência nos procedimentos laboratoriais contribuindo com a eficácia nos métodos de medição.

Palavras-chaves: Turbina hidráulica. sistema supervisório. SCADABR. rede serial. protocolo de comunicação.

Abstract

From the rural electrification problem in rural communities in states like Pará, the opportunity arose to small companies to distribute electricity from decentralized production based on the modified configuration of the hydraulic turbine. A copy was brought to the University of Brasilia, in order to assess the hydroelectric potential of the manufacturer Indalma turbines, transfer the acquired knowledge to local entrepreneurs and then the subsequent use of this solution for the generation of electricity and insertion of this technology in the Brazilian electric sector since evolved its technical characteristics. Previous work in this developed physical and mechanical support so that judgments could be made. An initial instrumentation was implemented taking into account the first turbine testing. This paper proposes an automation framework with bench regard to the communication between devices and control, using such a network for serial communication and a protocol for the management of such communication. The proposed monitoring system shows the integration between textit software ScadaBR and all the textit hardware and improve the agility, security and intelligence in laboratory procedures that contribute to the efficiency of measurement methods.

Key-words: Water turbine. supervisory system. SCADABR. serial network. communication protocol

Listas de ilustrações

Figura 1 – Esquema da bancada didática de ensaio de pico turbina hidráulica [Oliveira (2014)].	28
Figura 2 – Bancada presente no laboratório.	29
Figura 3 – Modelo de comunicação entre computador e máquinas do laboratório atualmente.	30
Figura 4 – Molde de um Sistema Supervisório.	33
Figura 5 – Diagrama de instrumentação de um processo genérico.	38
Figura 6 – Medição de torque por Freio de Prony.	39
Figura 7 – Célula de carga. Direções ativa (vertical) e passiva (horizontal).	40
Figura 8 – Sensor de rotação e método de medição.	41
Figura 9 – Resposta do sensor de rotação.	42
Figura 10 – Exemplo de aplicação de pressão.	43
Figura 11 – Disposição do sensor de pressão instalado na tubulação.	43
Figura 12 – Linhas de campo magnético e geração de uma força eletromotriz - transdutor de fluxo.	45
Figura 13 – Forma correta de instalação do transdutor de fluxo.	45
Figura 14 – Transmissão paralela.	47
Figura 15 – Transmissão Serial.	47
Figura 16 – Comparação entre níveis de tensão TTL e serial RS232.	48
Figura 17 – Conector DB9 - interface RS232.	49
Figura 18 – Exemplo de comunicação RS485.	49
Figura 19 – Disposição física da bancada e integração do sistema supervisório.	62
Figura 20 – Diagrama de funcionamento da bancada de ensaio de pico turbina hidráulica Indalma.	63
Figura 21 – Sistema Supervisório do ponto de vista da comunicação serial.	64
Figura 22 – Diagrama de funcionamento da placa de aquisição de dados.	69
Figura 23 – Esquemático da fonte de 5 V.	70
Figura 24 – Simulação da fonte de 5 V.	71
Figura 25 – Esquemático da fonte de ± 12 V.	71
Figura 26 – Simulação da fonte de ± 12 V.	72
Figura 27 – Circuito integrado RCV420 conversor corrente em tensão.	73
Figura 28 – Esquemático do circuito de condicionamento de sinais para sensor de pulso.	73
Figura 29 – <i>Testbench</i> do circuito de condicionamento de sinais para sensor a coletor aberto.	74

Figura 30 – Simulação do circuito de condicionamento de sinais para sensor a cole-	74
tor aberto.	
Figura 31 – Amplificador operacional para condicionamento da célula de carga. . . .	75
Figura 32 – <i>Testbench</i> do circuito de condicionamento de sinais para células de carga. .	75
Figura 33 – Simulação do circuito de condicionamento de sinais para células de carga. .	75
Figura 34 – Circuito para processamento e exibição de dados.	76
Figura 35 – Circuito para comunicação nos padrões RS232, RS485 ou RS422.	77
Figura 36 – <i>Jumpers</i> para seleção do tipo de rede.	77
Figura 37 – Placa de circuito impresso de aquisição de dados.	78
Figura 38 – Fotografia da placa de circuito impresso de aquisição de dados.	79
Figura 39 – Fotografia da placa de circuito impresso de aquisição de dados com componentes.	79
Figura 40 – Diagrama de funcionamento do <i>firmware</i>	80
Figura 41 – Diagrama do quadro de comando de potência de eixo.	81
Figura 42 – Esquema físico do quadro de comando de potência de eixo.	82
Figura 43 – Simulação do quadro de comando de potência de eixo.	84
Figura 44 – Diagrama do quadro de comando de potência hidráulica.	84
Figura 45 – Esquema físico do quadro de comando de potência hidráulica.	85
Figura 46 – Simulação do quadro de comando de potência hidráulica	86
Figura 47 – Simulação virtual do protótipo	87
Figura 48 – Simulação virtual do protótipo	87
Figura 49 – Reposta real do protótipo	88
Figura 50 – Interface Sistema Supervisório.	92
Figura 51 – Sensor de pressão WIKA.	99
Figura 52 – Célula de carga MK.	100
Figura 53 – Sensor de rotação BHS.	100
Figura 54 – Transdutor de Fluxo Contech.	101
Figura 55 – Face superior e inferior do arduino UNO.	102
Figura 56 – Diagrama de conexões dos blocos funcionais da placa.	105
Figura 57 – Esquemático das fontes de tensão.	106
Figura 58 – Esquemático dos circuitos de condicionamento para aquisição de po- tência de eixo.	107
Figura 59 – Esquemático dos circuitos de condicionamento para aquisição de po- tência hidráulica.	108
Figura 60 – Esquemático do processamento e conexões para o <i>display</i>	109
Figura 61 – Esquemático das redes de comunicação usadas na placa.	110
Figura 62 – Esquemático da placa WP05.	111
Figura 63 – Bancada usada para testes.	113

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação das variáveis a serem aferidas pela instrumentação.	37
Tabela 2 – Pinagem do conector DB9 - rede RS232.	48
Tabela 3 – Formato do pacote de dados enviados pelo escravo no protocolo <i>Modbus</i> .	50
Tabela 4 – Funções do protocolo e sua tradução.	51
Tabela 5 – Formato do pacote de dados enviados pelo escravo [Electric (2007)].	51
Tabela 6 – Desdobramento da função qualidade do sistema supervisório.	55
Tabela 7 – Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA).	65
Tabela 8 – Ícones de aplicação.	90

Lista de abreviaturas e siglas

CLP	Controladores Lógico Programáveis
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> (Desdobramento da Função Qualidade)
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise de Modo e Efeito de Falha)
GND	<i>Ground</i> (Terra)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Visor de Cristal Líquido)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
NA	Normalmente Aberto
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
RPM	Rotações Por Minuto
RX	<i>Receive</i> (Receptor)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i> (Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de Dados)
TTL	<i>Transistor Transistor Logic</i> (Lógica Transistor Transistor)
TX	<i>Transmit</i> (Transmissor)
UTR	Unidade Terminal Remota
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)

Listas de símbolos

A	Área
η	Rendimento
d	Diâmetro interno da tubulação
E	Força eletromotriz
F	Força geradas pela rotação da turbina
F_e	Força efetiva
H	Variação altura
K	Constante eletromagnética
l	Comprimento
P	Pressão
P_e	Potência de eixo
P_h	Potência hidráulica
Q	Vazão volumétrica
R	Resistência elétrica
R_e	Raio efetivo
R_r	Raio do rolamento
R_x	Raio do eixo
T	Densidade de fluxo magnético
T	Torque
t	Tempo
τ	Torque da turbina
V	Volume do fluido
v	Velocidade

γ	Peso específico
θ	Ângulo
$d\theta$	Variação do ângulo
ω	Rotação ou velocidade angular da turbina
ρ	Resistividade do material
z	Nível topográfico

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Justificativa	27
1.2	Objetivos	30
1.2.1	Objetivo Geral	30
1.2.2	Objetivos Específicos	30
1.3	Metodologia	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Sistemas Supervisórios	33
2.1.1	Sensores, Transdutores e Atuadores	34
2.1.2	Atuadores	34
2.1.3	CLP's, UTR's e Microcontroladores	35
2.1.4	Rede de Comunicação e Protocolo	35
2.1.5	Sistemas Gerentes	35
2.2	Aspectos Físicos da Bancada e Variáveis da Instrumentação	36
2.3	Instrumentação	37
2.3.1	Medição de Torque – Freio de <i>Prony</i>	38
2.3.1.1	Método do Freio de <i>Prony</i>	39
2.3.2	Medição de Rotação – Sensor Indutivo	40
2.3.3	Medição de Pressão – Sensores de Pressão	42
2.3.4	Medição de Fluxo – Transdutor Eletromagnético	44
2.4	Redes de Comunicação Industrial	46
2.4.1	Interfaces RS232 e RS485	47
2.4.1.1	Interface RS232	47
2.4.1.2	Interface RS485	49
2.4.2	Protocolo de comunicação <i>ModBus</i>	50
2.5	Planejamento do Produto e sua Qualidade	51
2.6	Visão Geral Sistema Operacional Linux – Ubuntu	52
2.6.1	Vantagens do Linux	52
2.6.2	Desvantagens do Linux	53
2.6.3	Distribuições do Linux	53
3	PROJETO ELETRO-ELETRÔNICO DA BANCADA	55
3.1	Desenvolvimento de Requisitos do Produto	55
3.1.1	Desdobramento da Função Qualidade da Instrumentação da Bancada	55
3.1.2	Tradução dos requisitos técnicos do produto	58

3.2	Proposta Geral do Sistema Supervisório	60
3.2.1	Diagrama de Funcionamento Proposto para o Sistema Supervisório	60
3.2.2	Modelo de Comunicação Aplicado à Bancada Indalma	63
3.3	Confiabilidade e Análise de Falhas	64
4	CONCEPÇÃO DO PRODUTO	69
4.1	Placa de Aquisição de Dados	69
4.1.1	Fontes	70
4.1.1.1	Fonte de 5 V	70
4.1.1.2	Fontes de $\pm 12V$	71
4.1.2	Condicionamento dos Sinais	72
4.1.2.1	Sensor de Pressão e Fluxo	72
4.1.2.2	Sensor de Rotação	73
4.1.2.3	Células de Carga	74
4.1.3	Processamento	76
4.1.4	Comunicação e Rede	76
4.1.5	Placa de Circuito Impresso	77
4.1.6	<i>Firmware</i>	80
4.2	Quadros de Comando	81
4.2.1	Quadro de Comando de Potência de Eixo	81
4.2.2	Quadro de Comando de Potência Hidráulica	84
4.3	Teste do Protótipo	86
4.4	Software	88
4.4.1	SCADABR	88
4.4.2	Interface do Sistema Supervisório	90
5	CONCLUSÕES	93
5.1	Trabalhos Futuros	94
	Referências	95
	APÊNDICES	97
	APÊNDICE A – SENsores DA INSTRUMENTAÇÃO	99
	APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DE CIRCUITOS	105
	APÊNDICE C – FOTOGRAFIAS DE TESTES	113
	APÊNDICE D – CÓDIGOS	115

D.1	Código Principal	115
D.1.1	<i>Display LCD</i>	116
D.1.2	Fluxo	118
D.1.3	Força	118
D.1.4	Pressão	119
D.1.5	Rotação	119
D.1.6	Serial	120

1 Introdução

Este documento apresenta de forma resumida, os esforços realizados na instrumentação eletrônica da bancada do laboratório de termofluido da Faculdade Gama da Universidade de Brasília e a utilização de um *software* supervisor (SCADABR) para a interface com o usuário. Logo a seguir serão apresentados o embasamento teórico e o desenvolvimento da metodologia para o desenvolvimento do produto proposto.

1.1 Justificativa

Mesmo sob o ritmo de universalização dos serviços de energia elétrica em todo o País, muitas das comunidades rurais, sobretudo aquelas localizadas em lugares de difícil acesso, não possuem previsão para a utilização de energia elétrica através do padrão convencional de fornecimento. A alternativa que o governo sugere são formas de produção de energia descentralizadas que aproveite os potenciais das áreas avaliadas [Els (2010)].

A empresa Indalma foi um exemplo das várias iniciativas que surgiram por conta da demanda na região da Amazônia. Foram instaladas por ela algumas estruturas em Santarém, município do estado do Pará, onde revelou um alto potencial de geração de energia com o uso de microcentrais hidrelétricas compostas de turbinas modificadas artesanalmente a partir do modelo de turbinas Francis [Els (2010)].

Outros empreendimentos também surgiram com o mesmo molde e apesar de fornecerem energia para números significativos de famílias (em torno de 580) da região não estão enquadrados no setor elétrico do país [Els (2010)].

Para o enquadramento desses vários empreendimentos, a Universidade de Brasília, através do curso de Engenharia de Energia visualizou uma necessidade de uma evolução tecnológica e caracterização do potencial energético gerado, para tanto propôs e pôs em prática uma bancada de ensaios dos efeitos hidrodinâmicos como forma da caracterização mencionada e aprimoramento das turbinas hidráulicas. Em comunhão com o edital do Ministério da Ciência e Tecnologia de assunto: Capacitação Laboratorial e Formação de RH em Fontes Renováveis foi desenvolvido o projeto INOVATRANS - Inovação de micro centrais hidrelétricas: capacitação laboratorial e transferência de tecnologia.

Em parceria com a Empresa Indalma, projetos de pesquisa trouxeram ao laboratório de termofluidos da faculdade Gama, da Universidade de Brasília, um exemplar de uma picoturbina hidrelétrica do modelo Indalma, como forma de avaliação das turbinas e transferência do conhecimento para os empreendimentos locais [Els et al. (2010)].

O trabalho desenvolvido em Santander (2015) demonstra a implementação da ban-

cada no laboratório e os itens de instrumentação presentes nela para o recolhimento dos dados. A Fig.(1) demonstra a disposição física da bancada atualmente.

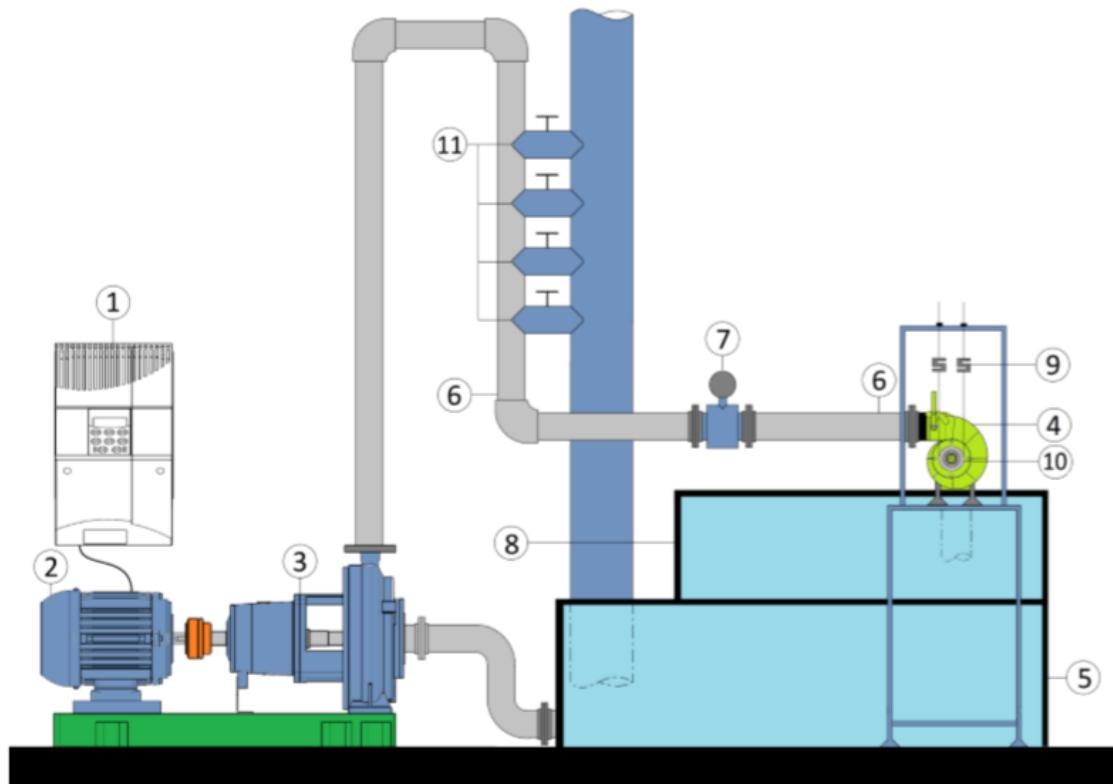


Figura 1 – Esquema da bancada didática de ensaio de pico turbina hidráulica [Oliveira (2014)].

1. Inversor de frequência WEG CFW09;
2. Motor WEG, trifásico, 1750 *RPM*, 25 *CV*, 60 *Hz*;
3. Bomba KSB ETAN100 - 250, $Q = 184,4 \frac{m^3}{h}$, $H = 21,3 \text{ mca}$;
4. Turbina Indalma com diâmetro de entrada de 4”;
5. Reservatório de água com capacidade de 1000 l;
6. Medidores de pressão;
7. Medidor de vazão volumétrica CONTECH modelo CTHHD 4”;
8. Vertedor triangular;
9. Células de carga da marca MK modelo CSA/ZL - 20;
10. Sensor indutivo JNG modelo LM8 - 3002NA;
11. Válvulas manuais para o sistema de controle de pressão auxiliar.



Figura 2 – Bancada presente no laboratório.

Em conformidade com os planos iniciais do projeto, a bancada idealizada foi constituída como mostra a Fig.(2).

A instrumentação implementada é capaz de recolher os dados, armazenando-os em um arquivo de texto através do *software* livre KST. A forma de comunicação entre os dispositivos para a recolha dos dados e comando dos dispositivos é individual, ou seja ora instrui-se o inversor de frequência a acionar o conjunto motor-bomba, ora recolhem-se os dados de pressão e fluxo e ora recolhem-se os dados de rotação e torque. Para cada ação faz-se o manuseio da interface serial.

O método utilizado hoje funciona, porém não é eficiente e gera a fadiga das interfaces e cabos, uma vez que os conectores devem ser trocados constantemente. A recolha dos dados se faz em momentos diferentes, ou seja, a medida da potência hidráulica é feita em um momento e a potência de eixo em um outro momento, causando uma pequena discrepância nos valores de rendimento. A forma de comunicação do modelo existente pode ser visualizada através da Fig.(3).

O presente trabalho visa contribuir para a implementação de uma rede industrial de comunicação que segue um protocolo e é gerida por um sistema supervisório a partir do *software* SCADABR, produzindo um avanço da estrutura da bancada e uma confiabilidade aumentada dos dados para a caracterização profissional da pico turbina.

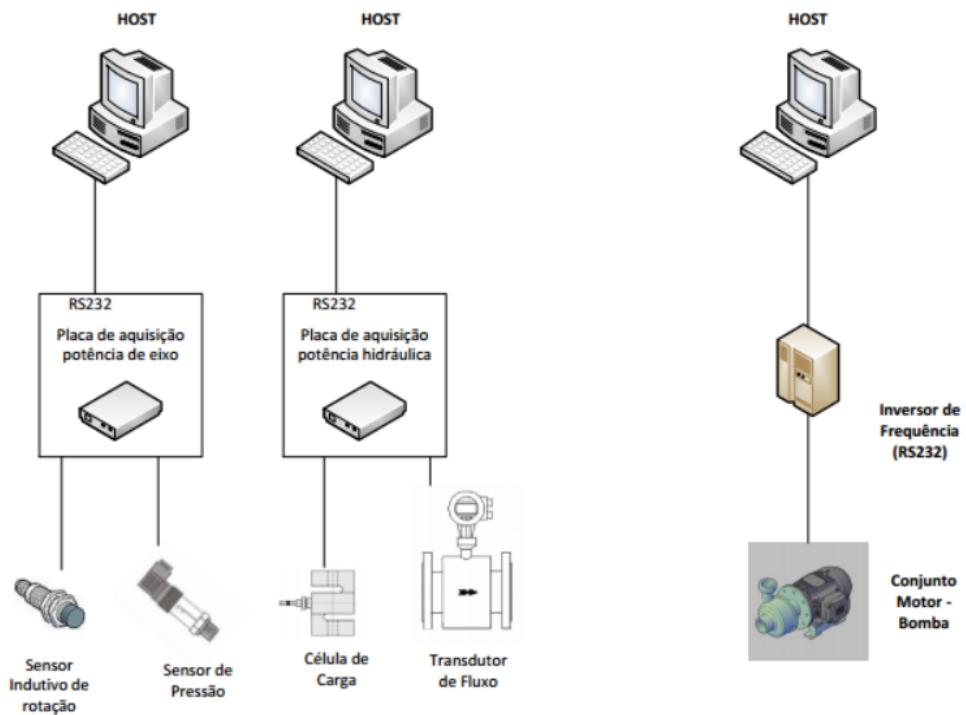


Figura 3 – Modelo de comunicação entre computador e máquinas do laboratório atualmente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Projeto de um modelo de sistema supervisório para ser aplicado à bancada de ensaio de picoturbina hidráulica Indalma presente no laboratório de termofluidos da faculdade Gama da Universidade de Brasília.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Especificar os sensores e a instrumentação da bancada;
- Desenhar um diagrama do sistema supervisório incluindo o barramento a ser utilizado;
- Especificar com detalhes os dispositivos do sistema como quadros de comando e circuitos eletrônicos;
- Desenhar placa de aquisição de dados;
- Desenhar quadros de comandos;
- Simulação do sistema.

1.3 Metodologia

Para o alcance do objetivo proposto, os seguintes passos serão adotados:

1. Revisar contexto histórico da bancada e entender a importância da evolução da estrutura da mesma;
2. Revisar os procedimentos adotados anteriormente, nos trabalhos realizados nas de- mais áreas do conhecimento envolvidas;
3. Identificar através dos trabalhos anteriores, aspectos mecânicos e físicos da bancada Indalma, procurando variáveis para justificar a instrumentação;
4. Adotar metodologia de projeto de produto para definir requisitos da instrumentação assim como aumentar a qualidade através do estudo de falhas;
5. Desenhar diagramas de funcionamento para elucidar o conceito do modelo proposto, servindo também de guia para o desenvolvimento do projeto;
6. Avaliar a proposta atual e propor a implementação de um modelo de comunicação industrial;
7. Desenhar o esquemático e o PCB da placa de aquisição de dados genérica para implementação dos quadros de comando;
8. Programar as placas de desenvolvimento Arduino;
9. Simular sistema completo a fim de prever erros ou falhas do mesmo;
10. Efetuar testes de funcionamento.

2 Revisão Bibliográfica

Neste item serão abordados aspectos teóricos de todo o procedimento de medição para instrumentação e conceitos necessários para o entendimento.

2.1 Sistemas Supervisórios

SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*) traduzido para o português como Controle Supervisório e Aquisição de Dados é definido como uma interface interativa e de alto nível de abstração para controle de processos ou variáveis deste processo.

Em uma planta industrial são encontradas máquinas de diversos modelos e formas de operação, seus respectivos operadores, a logística envolvida na produção, produtos a serem manipulados e outros fatores que exigem um controle por parte do administrador/operador. Uma vez o controle efetuado de maneira individual, demandará muito tempo, atenção e, de um modo geral, muita energia a ser otimizada.

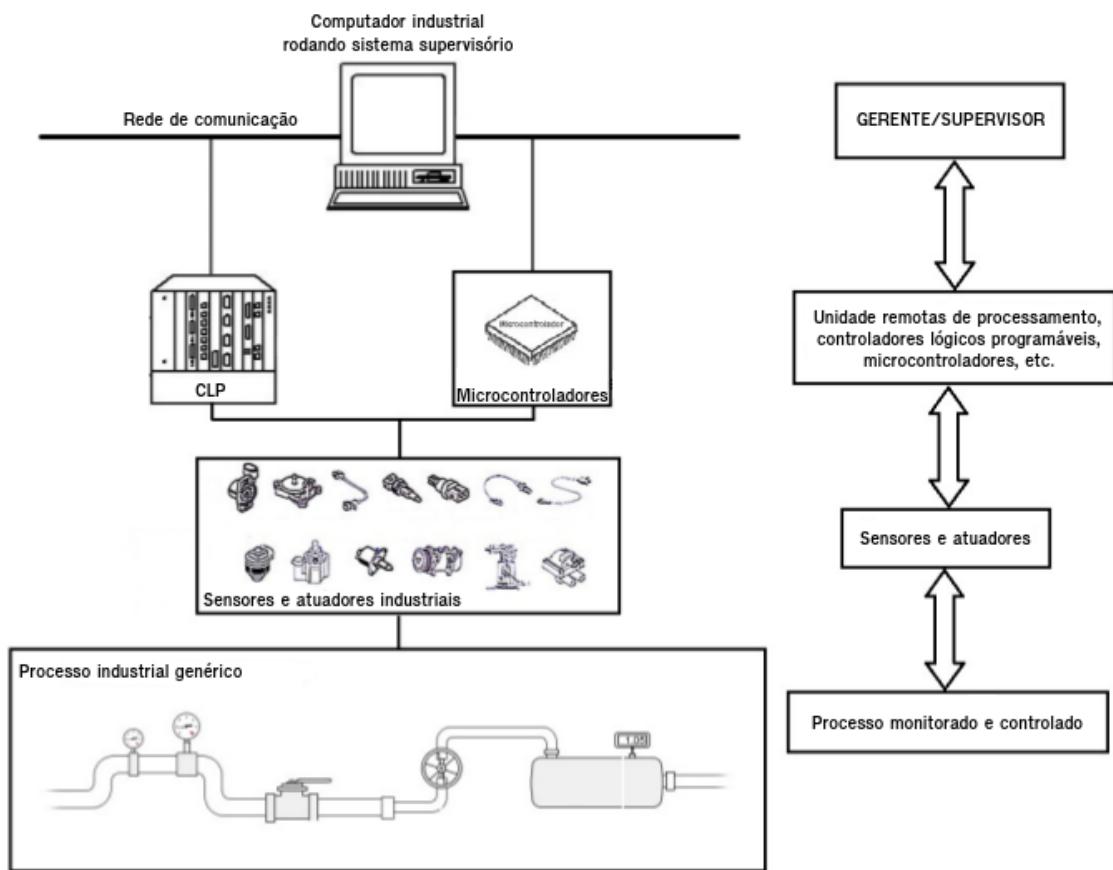


Figura 4 – Molde de um Sistema Supervisório.

Um sistema SCADA é introduzido com o objetivo de controle remoto podendo possuir fios ou não, monitora e envia ações a diversos subsistemas de maneira paralela e em tempo real. Gera relatórios, telas animadas, histórico de atividades em formato eletrônico e também se utilizando da execução em tempo real. Podendo executar ações automáticas e inteligentes seguindo a lógica implantada pelo seu projetista [Gohn (2006)].

As vantagens são inúmeras, uma vez que se pode unificar todo a planta e não necessitando de mão-de-obra especializada para sua manipulação, lembrando que ficará disponível uma interface homem-máquina de alto nível e intuitiva.

De maneira genérica os sensores fazem a leitura de uma dada variável transformando aquela forma de energia da entrada em uma outra forma na saída, onde será condicionado o sinal analógico ou digital por meio de um módulo de condicionamento. Este envia o sinal com valores coerentes para o microcontrolador, CLP, UTR, etc, que têm a função de processar a dada informação e transmiti-la através da rede de comunicação seguindo o padrão de comunicação proposto pelo protocolo adota. Então a informação chega ao sistema supervisório que dispõe de gráficos, tabelas, ícones animados e outros recursos que permitem ao operador navegar de forma intuitiva em todo o sistema. No caminho inverso, uma dada ação é acionada através do *software* gestor pelo operador, então esse comando é navegado através da rede e chega a unidade de processamento.

Esses dispositivos processam o comando recebido e o transmite em níveis de energia aos atuadores, que influenciam no processo diretamente e em tempo real. Desta forma, os elementos físicos e lógicos componentes de um sistema supervisório estão a seguir.

2.1.1 Sensores, Transdutores e Atuadores

Os sensores são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente podendo ser luminosa, térmica, cinética, então convertendo duas formas de energia, em geral em energia elétrica. Estes componentes são conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas SCADA para aferir velocidade, nível de água, temperatura, etc. e transformam esses valores lidos em sinais analógicos e/ou digitais, que em grande parte das vezes precisam ser condicionados com a finalidade de identificação pela estação remota ou operador. O sistema envolvendo o sensor mais o condicionamento do sinal é definido como transdutor [Thomazini e Albuquerque (2005)].

2.1.2 Atuadores

São dispositivos que modificam uma variável controlada. Recebem um comando (sinal) proveniente de uma estação controladora de nível hierárquico diferente e agem sobre o objeto, ou subsistema controlado. São exemplos as válvulas, relés, cilindros, motores, solenóides, etc [Thomazini e Albuquerque (2005)].

2.1.3 CLP's, UTR's e Microcontroladores

A interface mais próxima dos sensores são os microcontroladores, CLP's (Controleadores Lógico Programáveis) e UTR (Unidade Terminal Remota), onde o processo de controle e aquisição de dados se inicia. Os dados são adquiridos, processados e transmitidos a unidades superiores ou ações são executadas [Lopes e Moreira (2009)].

2.1.4 Rede de Comunicação e Protocolo

O envio e recebimento de dados e comandos entre equipamentos se dá através de um meio físico ou lógico denominado rede de comunicação.

Tendo em vista a quantidade de equipamentos presentes em uma planta industrial complexa, havendo então a necessidade de interconexão, torna-se inviável a possibilidade da adoção de conexões paralelas, por demandar uma grande quantidade de condutores elétricos. Assim, a ligação em série dos componentes é cada vez mais utilizada, devido ao menor custo de material e mão de obra, redução significativa da quantidade de cabos, maiores velocidades nos tempos de comando e respostas dos sistemas, entre outros benefícios [Electric (2007)].

O mecanismo que normaliza o envio e recebimento de dados em uma rede de comunicação é denominado protocolo de comunicação, que estabelece regras e diretrizes para o envio do sinal da melhor maneira possível, considerando aspectos criptográficos, identificação de recebimento de informações ou dados, minimização de ruídos, gerenciamento de tráfego na rede, minimização do gasto de energia, velocidades de comunicação mais elevadas entre outros fatores.

2.1.5 Sistemas Gerentes

Os sistemas gerentes são compostos de computadores e o respectivo *software* que ilustra e fornece um ambiente acessível ao controle de atuadores e informativos de processos assim como é possível visualizar, em tempo real, valores das variáveis do processo. No nível hierárquico maior do sistema supervisor podem existir um computador que controla todo o processo ou a informação e controle pode ser difundida em uma outra rede de computadores, identificando permissões gerentes para cada máquina inserida.

O *software* do sistema SCADA é dividido em módulos para permitir maior rapidez, robustez e flexibilidade da seguinte forma:

- Núcleo de processamento;
- Comunicação com PLCs/RTUs;
- Gerenciamento de alarmes;
- Históricos e banco de dados;
- Lógicas de programação interna (Scripts) ou controle;
- Interface gráfica;
- Relatórios;
- Comunicação com outras estações SCADA;
- Comunicação com sistemas externos/corporativos [Gohn (2006)].

2.2 Aspectos Físicos da Bancada e Variáveis da Instrumentação

O item principal de qualificação e caracterização da turbina é o rendimento [Oliveira (2014)], que é calculado a partir da relação da potência de eixo, com a potência hidráulica.

$$\eta = \frac{P_e}{P_h}, \quad (2.1)$$

onde P_e é igual a potência de eixo e P_h potência hidráulica.

Em outras palavras, potência hidráulica está relacionada à energia “doadas” à turbina por meio de uma fonte externa de fluidos e a potência de eixo está relacionada a quantidade de energia aproveitada pela turbina para a geração de energia elétrica.

Como visto em Oliveira (2014), a potência de eixo é dada pela equação:

$$P_e = \omega \cdot \tau, \quad (2.2)$$

onde ω é a rotação em $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$ e τ é o torque da turbina em $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$.

E a potência hidráulica é dada pela equação:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H, \quad (2.3)$$

onde γ é o peso específico do fluido $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3}\right]$ (o fluido usado é água com $\gamma = 9790.4 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3}\right]$), Q é a vazão volumétrica $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ e H é a variação da altura líquida de carga $[m^3]$.

A altura de queda líquida de carga pode ser medida através da equação de Bernoulli:

$$H = \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right) + \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \right), \quad (2.4)$$

onde (P_1 e P_2), (v_1 e v_2) e (z_1 e z_2) representam a pressão, a velocidade e o nível topográfico, respectivamente.” O índice 1 se refere à entrada da turbina e o índice 2 à saída da turbina.

Tabela 1 – Relação das variáveis a serem aferidas pela instrumentação.

Variáveis	Significado	Posição	Forma de medição
ω	Rotação ou velocidade angular da turbina	Eixo da turbina	Direta: Necessárias para a medida da potência de eixo
F_1 e F_2	Forças geradas pela rotação da turbina	Eixo da turbina	Direta: Necessárias para a medida de torque
Q	Vazão volumétrica	Entrada da turbina	Direta: Necessárias para a medida da potência hidráulica
P_1	Pressão	Entrada da turbina	Direta: Necessária para a medida da altura de queda líquida (H)
P_2	Pressão	Saída da turbina	Direta: Necessária para a medida da altura de queda líquida (H)

A função da instrumentação eletrônica adotada na bancada é justificada então, como a medição das variáveis mencionadas, de forma mais precisa, segura e incluindo um erro menor comparado aos equipamentos analógicos.

Os demais itens da instrumentação estarão ligados à segurança do processo de medição, automação da aquisição de dados, *design* e interatividade do produto.

2.3 Instrumentação

Instrumentalizar é a aplicação de instrumentos de medição adequados, considerando seus aspectos científicos de funcionamento, a um dado fenômeno, dinâmica ou processo com o objetivo de monitorar, controlar, observar, estudar ou mesmo atuar sobre o comportamento de tais variáveis [Casteletti (2014)].

Instrumento é um dispositivo capaz de controlar, aferir quantidades, indicar estados ou mesmo interferir em alguma dinâmica física. O instrumento usado para aferir quantidades tem como responsabilidade não influenciar significativamente no meio instalado, mas alertar, mostrar, sinalizar de modo quantitativo ou qualitativo estados, mudanças e padrões aos manuseadores de tal equipamento [Casteletti (2014)].

Alguns pontos devem ser observados para garantir uma boa medição como por exemplo a adequação do melhor sensor à grandeza física analisada, lembrando da mínima influência do equipamento à dinâmica do processo; uma vez que a saída de um sensor tenha níveis de tensão ou corrente (ou outra grandeza como resultado da transformação da forma de energia de entrada) inferior ou superior à entrada de um módulo de processamento, uma adequação do sinal é requerida através do condicionamento do mesmo; a inserção de valores não desejados nos sinais de medição (uma definição bem básica e geral para ruídos) precisa ser eliminada considerando que aparelhos ao redor podem influenciar, a forma de medição, a distância do processo ao módulo de processamento, a comunicação correta das máquinas, entre outros fatores.

Um modelo genérico de instrumentação pode ser visto na figura a seguir:

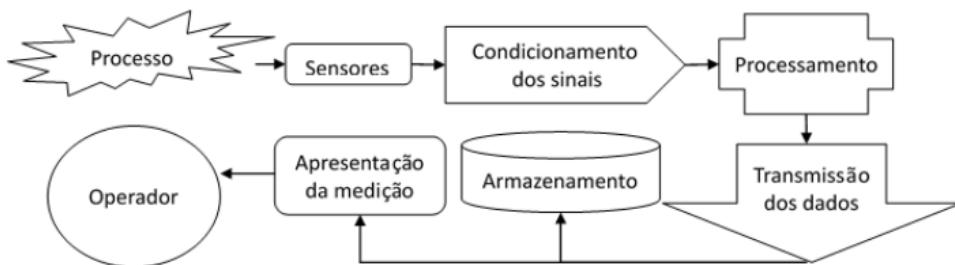


Figura 5 – Diagrama de instrumentação de um processo genérico.

2.3.1 Medição de Torque – Freio de Prony

Torque é a dificuldade de uma dada força em mover um objeto em torno de seu eixo de rotação, ou seja, ao aplicar-se uma força na linha de ação perpendicular ao eixo de rotação de um objeto, pode-se identificar qual será a dificuldade ($N \cdot m$) em fazê-lo girar, avaliando a grandeza torque. Em termos matemáticos, torque = força x deslocamento (ou o raio do objeto circular) [Halliday e Resnick (1997)].

A medida da quantidade física torque está relacionada a importantes processos, principalmente para compor o valor da energia transferida para um corpo que se encontra em movimento rotacional. Também pode indicar, por exemplo, o estresse ao qual uma peça está submetida, o que pode prevenir a falha do componente.

2.3.1.1 Método do Freio de *Prony*

O método do freio de *Prony* é comumente usado para aferir torque em rolamentos de eixos rotativos. Consiste em uma cinta de material resistente fixada em cada uma de suas extremidades em uma balança elástica. Considerando as forças aplicadas à balança F_1 e F_2 , então a força efetiva, F_e , é o módulo da diferença entre esses dois valores:

$$F_e = |F_1 - F_2|. \quad (2.5)$$

Considerando o raio do rolamento, R_r , e o raio do eixo, R_x , tem-se que o raio efetivo, R_e , a ser incluído no cálculo é:

$$R_e = R_x + R_r. \quad (2.6)$$

Então, a medida de torque é dada por:

$$T = F_e \cdot R_e. \quad (2.7)$$

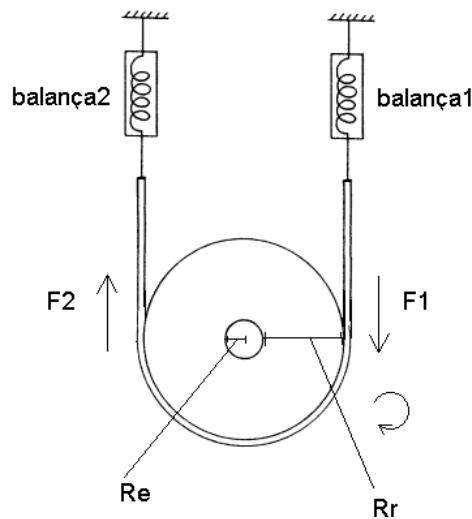


Figura 6 – Medição de torque por Freio de *Prony*.

Para a medida eletrônica do freio de *Prony* se faz necessário a inserção de medidores eletrônicos, como por exemplo duas células de cargas em série com as extremidades de cada balança.

Células de carga são dispositivos baseados na deformação de seu corpo para a geração de um sinal proporcional na saída, lembrando que as deformações estarão sempre nos limites da deformação elástica do material [Thomazini e Albuquerque (2005)].

O sinal de saída na maioria das células de carga é um sinal de resistência elétrica, uma vez que seu princípio de funcionamento se baseia na variação da resistência elétrica

de um extensômetro (*strain gauge*). Os extensômetros são condutores metálicos arranjados onde uma deformação afeta diretamente o seu comprimento, gerando uma variação aproximadamente linear em seus terminais [Thomazini e Albuquerque (2005)].

Pode ser verificado o efeito linear da variação do comprimento através da equação a seguir e da ilustração:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \quad (2.8)$$

onde R é resistência elétrica, ρ resistividade do material, l comprimento e A área da secção reta.

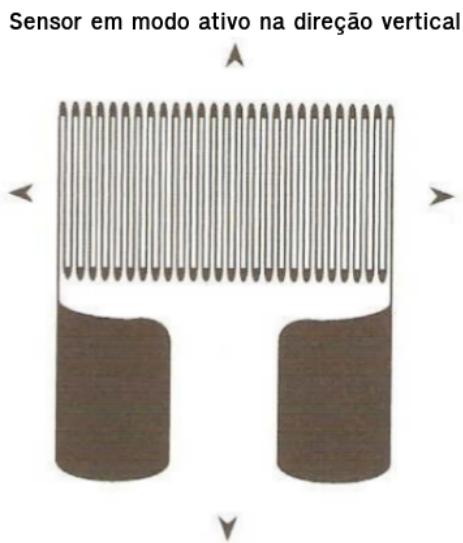


Figura 7 – Célula de carga. Direções ativa (vertical) e passiva (horizontal).

Na direção paralela ao comprimento dos “fios metálicos” arranjados no extensômetro, ao se aplicar uma força, haverá uma variação da resistência elétrica, porém na direção perpendicular, este efeito não poderá ser visto, mas não inviabiliza sua utilização, uma vez que pode ser utilizado para compensação de efeitos de auto aquecimento ou deriva com a temperatura ambiente.

Em geral as células de carga são projetadas para atuar em modo de flexão, compressão ou cisalhamento [Thomazini e Albuquerque (2005)].

2.3.2 Medição de Rotação – Sensor Indutivo

A medida da rotação de uma máquina é uma das constantes mais importantes para o processo de quantização da sua potência.

A definição de rotação se baseia em um corpo que efetua um movimento circular em torno de um ponto fixo, no qual seus pontos projetam um círculo ao longo do movimento, dizendo ser um corpo em rotação.

O deslocamento no sentido do círculo, comparando com uma reta perpendicular ao eixo de rotação, produz um ângulo θ . A medida que o corpo rotacional, todas as suas partículas descrevem uma variação $d\theta$. Considera-se uma revolução completa tal qual:

$$\Delta\theta = 2 \cdot \pi \cdot rad = 360^\circ = 1 \text{ rev.} \quad (2.9)$$

A taxa no qual as rotações acontecem no tempo é denominada velocidade angular $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ ou $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ para a velocidade angular instantânea. A forma mais usual da utilização desta variável é considerando as rotações por minuto (RPM) [Tipler e Mosca (1995)].

Os sensores indutivos de presença são utilizados na detecção de peças metálicas, gerando assim uma gama vasta de aplicações. A contagem de materiais, medição, posicionamento, são exemplos de aplicações. Não há necessidade do contato físico, uma vez que o sensor é constituído de uma bobina em núcleo de ferrite, um oscilador, um detector de nível de sinais de disparo e um circuito de saída.

O oscilador e a bobina produzem um campo magnético fraco, mas quando aproximado um objeto metálico, criam-se correntes de indução sobre a superfície desse material introduzido, então a energia total do sistema é diminuída, assim como a amplitude da oscilação e a tensão [Omron (2014)]. O circuito detector de nível percebe a mudança de tensão e muda o estado do sensor (nível alto ou nível baixo).

Por meio da Fig.(8) é possível perceber a aplicação direta na medição de rotação ao contar os pulsos a cada saliência da engrenagem e o tempo entre uma e outra. Dividindo-se pelo número de saliências e pelo tempo (minutos) tem-se as rotações por minuto (RPM).

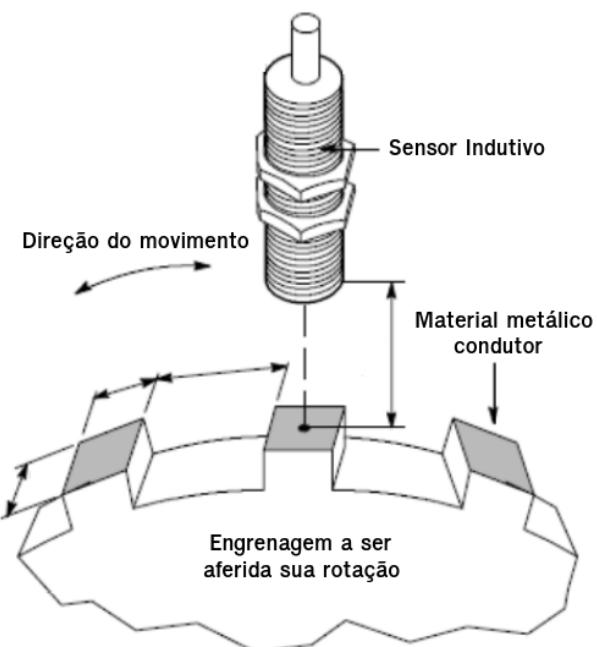


Figura 8 – Sensor de rotação e método de medição.

A próxima ilustração, Fig.(9), enfatiza o efeito da influência de um material próximo ao sensor e a resposta da onda do oscilador.

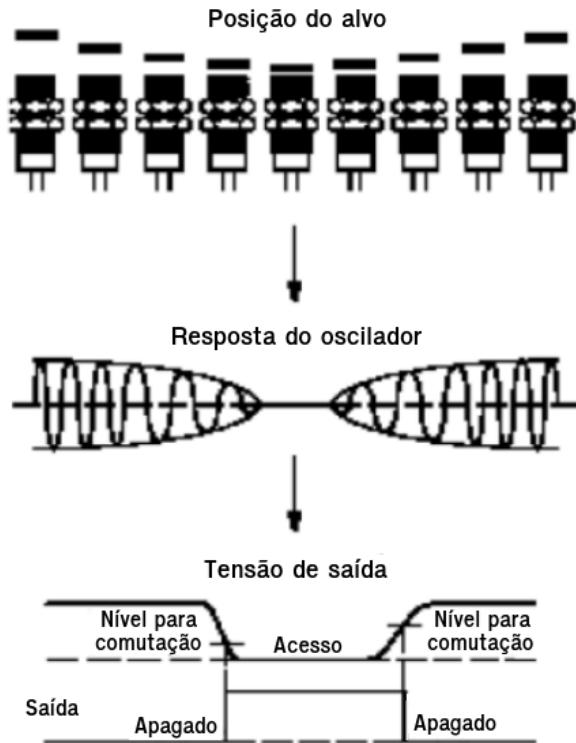


Figura 9 – Resposta do sensor de rotação.

2.3.3 Medição de Pressão – Sensores de Pressão

Em um fluido qualquer ou outro tipo de estado ou material, a pressão exercida sobre ele de forma lida como a razão da força normal aplicada a uma área específica [White (2008)].

“Em outras palavras, a tensão normal sobre qualquer plano através de um elemento de fluido em repouso é igual a um valor único, denominado pressão do fluido, P, tomado como negativo na compressão, segundo convenção usual [White (2008)].”

As unidades mais comuns adotadas para referenciar um valor de pressão são o psi $\frac{lb}{pol^2}$ e Pa $\frac{N}{m^2}$. Em uma sequência natural, os sensores de pressão possuem duas partes que os compõem, são elas a conversão de pressão numa força ou deslocamento e em seguida a conversão de força ou deslocamento em um sinal elétrico.

Os tipos de medida de pressão mais comuns são:

- Pressão Gauge: a diferença entre as pressões que se quer aferir e a pressão ambiente;
- Pressão diferencial: diferença de pressão entre dois pontos distintos, não sendo necessários possuir em quaisquer um a pressão atmosférica;

- Pressão absoluta: medida por um sensor de pressão diferencial com um dos lados em 0 psi (próximo ao vácuo total) [White (2008)].

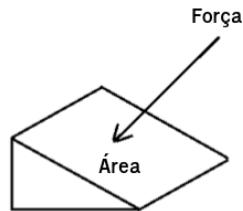


Figura 10 – Exemplo de aplicação de pressão.

O funcionamento dos medidores de pressão seguem o diagrama com três partes, sendo que a primeira parte (elemento de recepção), a pressão é transformada em deslocamento. A segunda parte (elemento de transferência) é responsável pela amplificação do deslocamento transferindo então, para a terceira parte (elemento de indicação) responsável por receber o sinal e indica-lo ou registrá-lo [White (2008)].

Ao se fazer um orifício na tubulação por onde passa o fluido, pode-se perceber que a força do fluido ao ser dividido pela área da seção transversal do orifício, que é a mesma pressão do fluido ao passar pela área da seção transversal da tubulação. O sensor de pressão ao ser inserido no orifício mencionado anteriormente é capaz de aferir a pressão naquele ponto através da força exercida sobre ele, uma vez que a área analisada será constante.

$$p = \frac{F}{A}, \quad (2.10)$$

onde p é pressão em $\left[\frac{N}{m^2}\right]$, F é força em $[N]$ e A é área, $\pi \cdot r^2$, em $[m^2]$.

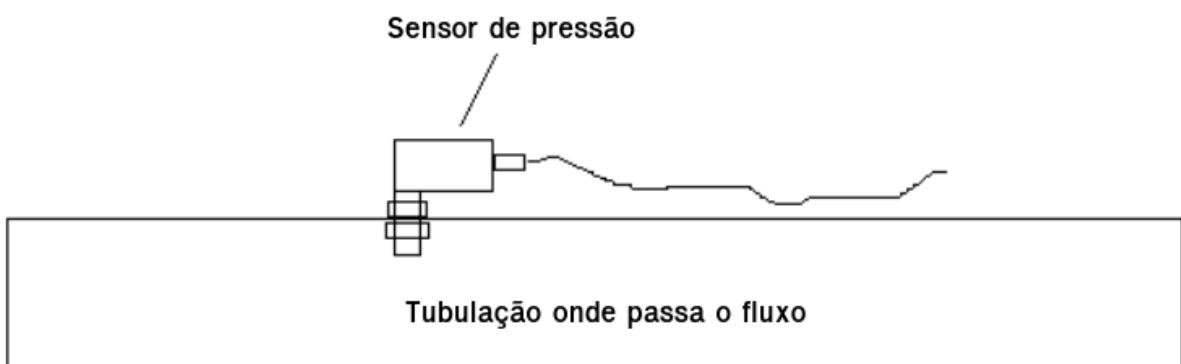


Figura 11 – Disposição do sensor de pressão instalado na tubulação.

2.3.4 Medição de Fluxo – Transdutor Eletromagnético

Dentre as grandezas aferidas e controladas em processos industriais está a vazão. As aplicações são muitas como por exemplo o cálculo da quantidade de água consumida por uma residência (aparelho usado é o hidrômetro), medição de níveis de gases injetados em processos químicos ou até mesmo expelidos por indústrias, medição de fluidos em redes de tratamento de esgotos, entre outras.

Vazão é a quantidade de volume ou massa de um fluido que escoa por um canal (tubulação) em um determinado tempo. Aqui consideraremos a vazão volumétrica, que é definida como a quantidade de volume [m^3] que escoa em um intervalo de tempo t [s], ou seja:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.11)$$

onde Q é a vazão volumétrica, V é o volume do fluido e t é tempo [Cassiolato (2004)].

O autor em Oliveira (2014) descreve com mais detalhes as variáveis a serem consideradas para uma melhor caracterização do tipo de escoamento e para maior precisão na aferição vazão volumétrica.

Para a medição da vazão volumétrica alguns tipos de medidores podem ser utilizados:

1. Medidores indiretos:

Tubo de Pitot, tubo de Venturi, tubo de Dall, Annuba, Rotâmetro.

2. Medidores diretos:

Disco Nutante, pistão flutuante, rodas ovais, *Roots*, tipo Helice, tipo Turbina.

3. Medidores especiais:

Eletromagnetismo, Vortex, Ultrassônico, Calhas Parshall, Cariolis [Cassiolato (2004)].

O transdutor eletromagnético, sendo considerado um tipo de medidor especial, funciona com base na lei de Faraday de indução eletromagnética.

Através de um tubo de pequenas dimensões (ligado em série com a tubulação onde passa o fluido, com mesmas dimensões de área da seção transversal), existem dois eletrodos dispostos em paralelo com a tubulação em cada extremidade. Bobinas de excitação impulsionam uma onda quadrada em ambos os lados.

Um campo magnético é gerado como resposta à variação da corrente pela onda quadrada, com uma densidade de fluxo magnético B na direção vertical da tubulação.

Com a passagem do fluido de condutividade específica, as linhas de força magnética, modificadas por este, irão induzir uma força eletromotriz E , diretamente proporcional a B , que é o produto do diâmetro interno d do tubo com a velocidade média v do fluido.

Essa força eletromotriz é amplificada e retransmitida aos canais de processamento. A equação para a força eletromotriz é:

$$E = K \cdot B \cdot d \cdot v, \quad (2.12)$$

onde E é a força eletromotriz gerada [V], K constante eletromagnética [adimensional], B densidade de fluxo magnético, $[d]$ diâmetro interno da tubulação [m] e velocidade do fluido v em $\left[\frac{m}{s}\right]$.

A partir da força eletromotriz gerada, pode-se aferir a vazão volumétrica, por serem diretamente proporcionais, ou seja, as duas grandezas para essa aplicação possuem relação linear [CONTECH (2014)].

A Fig.(12) ilustra o sensor eletromagnético de vazão e a forma de obtenção de valores de fluxo baseado na alteração do campo magnético e da consequente variação da força eletromotriz:

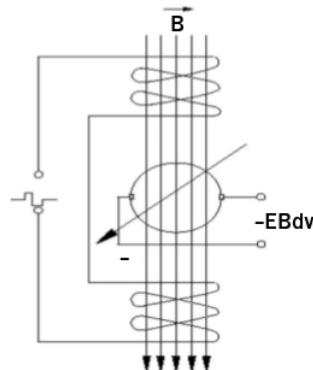


Figura 12 – Linhas de campo magnético e geração de uma força eletromotriz - transdutor de fluxo.

A forma de utilização do sensor, como mencionado anteriormente pode ser visualizado por meio da Fig.(13):

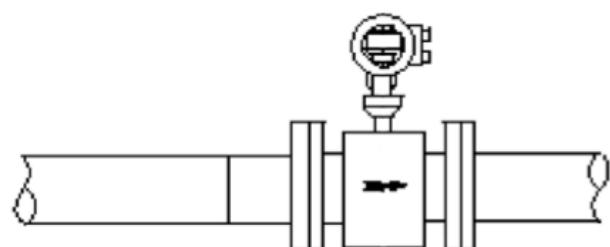


Figura 13 – Forma correta de instalação do transdutor de fluxo.

2.4 Redes de Comunicação Industrial

Com o aumento das tecnologias de informação associado ao aumento das demandas de produção de serviços e produtos, uma empresa tem que lidar a cada dia com vários tipos de dispositivos e formas de interação. Esses dispositivos tecnologicamente avançados permitem a aceleração da produtividade, porém aumentam a complexidade da operação, exigindo do ambiente fabril um controle mais eficiente, principalmente no modo como as informações entre eles serão trocadas [Tanenbaum (2003)].

O objetivo principal das redes de comunicação industrial é sugerir uma arquitetura de controle e comunicação capaz de interligar equipamentos e processos, podendo direcionar os esforços para regiões específicas da hierarquia empresarial. Um exemplo de arquitetura é da classe barramento de campo (*fieldbus*), dedicando-se à comunicação no chão de fábrica [Tanenbaum (2003)].

De forma resumida, a premissa exigida no processo de comunicação entre dispositivos é de uma forma de transmissão, tendo como exemplos mais comuns e utilizados a transmissão paralela e a transmissão serial.

Na transmissão paralela os bits são transportados simultaneamente usando para tal várias linhas de transmissão dispostas de forma paralela, assim como mostra a Fig.14:

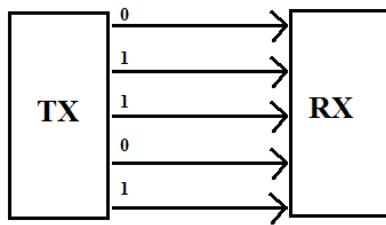


Figura 14 – Transmissão paralela.

Na transmissão serial, os bits da comunicação são enviados sequencialmente, usando somente uma linha de comunicação. Apesar de ser mais lenta comparada à forma de comunicação paralela, é aplicável em comunicações de distâncias maiores. A Fig.(15) exemplifica a transmissão serial.

Outra vantagem da comunicação serial é a ligação de instrumentos e dispositivos em rede com maior facilidade, possibilitando a expansão das empresas, como mencionado anteriormente [Mendes (1989)].

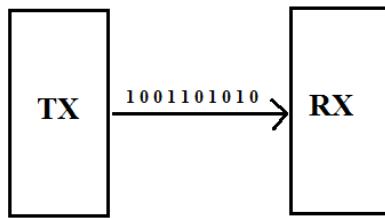


Figura 15 – Transmissão Serial.

Escolhida uma forma de transmissão e um modelo de comunicação, tem-se a necessidade da avaliação de um meio físico para que a transmissão aconteça e a interface compatível com a aplicação. Logo a seguir serão introduzidos duas interfaces: RS232 e RS485, as quais serão especificadas por estarem presentes em pontos específicos do processo de comunicação. Em curtas distâncias como a comunicação entre o computador e um módulo de integração de sinais, a interface RS232 é mais comum, até mesmo por conta do padrão encontrado nos microcomputadores, por outro lado, a comunicação entre dispositivos mais distantes e aqueles considerados escravos utilizam a interface RS485. A seguir os termos utilizados nesse parágrafo serão esclarecidos com mais detalhes.

2.4.1 Interfaces RS232 e RS485

A seguir serão expostas algumas das características das interfaces RS232 e RS485.

2.4.1.1 Interface RS232

A comunicação serial é bem utilizada ainda com a grande expansão da porta USB. Dispositivos que se utilizam do padrão RS232 ainda estão presentes principalmente em meios industriais [Stanek, Rehak e Hlavac (2007)].

O conector mais utilizado para o padrão RS232 é o conector DB9, que possui 9 pinos distribuídos com as funcionalidades descritas na tabela (2):

Tabela 2 – Pinagem do conector DB9 - rede RS232.

Pino	Descrição
1	DCD
2	RX
3	TX
4	DTR
5	GND
6	DSR
7	RTS
8	CTS
9	NC

A comunicação se dá somente entre os pinos 2 (RX - pino de recepção de dados serial), 3 (TX - pino de envio de dados serial) e o pino 5 (GND - menor potencial). Ficando o restante dos pinos para o controle dos dados.

No padrão RS232, o nível alto (*bit 1*) está associado a uma tensão entre -3 V a -18 V sendo muito comum a tensão de -12 V. Já no nível baixo (*bit 0*), a tensão fica entre +3 V a +18 V, sendo muito comum a tensão de +12 V [Stanek, Rehak e Hlavac (2007)].

Quando não há comunicação entre os dispositivos que utilizam a interface RS232, o nível de “repouso” é o nível lógico 1 (de -3 V a -18 V). A Fig.(16) faz uma breve comparação entre os níveis lógicos TTL e serial RS232.

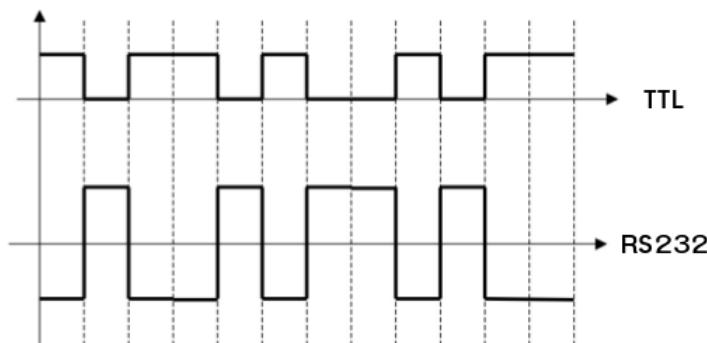


Figura 16 – Comparaçao entre níveis de tensão TTL e serial RS232.

O padrão do conector DB9 e sua referida pinagem já descrita podem ser vistos logo a seguir na Fig.(17):

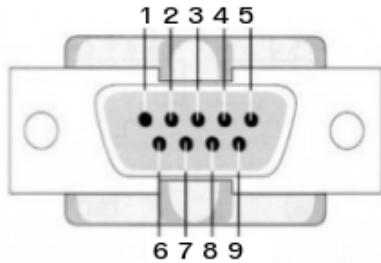


Figura 17 – Conector DB9 - interface RS232.

2.4.1.2 Interface RS485

O padrão RS485 fornece uma solução robusta para a transmissão de dados em longas distâncias e em ambientes ruidosos. Tem compatibilidade com os protocolos *Modbus*, *Profibus*, *DIN-Measurement-Bus* e muitos outros. O barramento pode comportar até 32 unidades de carga, ou seja, 32 dispositivos seriais.

Como o protocolo de comunicação *Modbus* exige, somente quando um dispositivo aciona seu transmissor (mestre chama o escravo ou o escravo retorna resposta ao mestre) o *bus* é utilizado, ficando desligado o restante do tempo. Pelo fato da comunicação ocorrer de forma unidirecional por determinado instante de tempo, como visto anteriormente, a rede é definida como *half duplex*. A rede RS485 pode também utilizar-se de 2 pares trançados, operando em modo *full duplex*.

Para a caracterização dos níveis lógicos, o padrão RS485 utiliza-se da seguinte lógica: quando a diferença entre os níveis de tensão em cada par trançado for negativa, maior no condutor designado (+) do que o condutor (-), então a rede estará em nível lógico 1, mas quando ocorrer o inverso, o nível lógico 0 será definido [Stanek, Rehak e Hlavac (2007)].

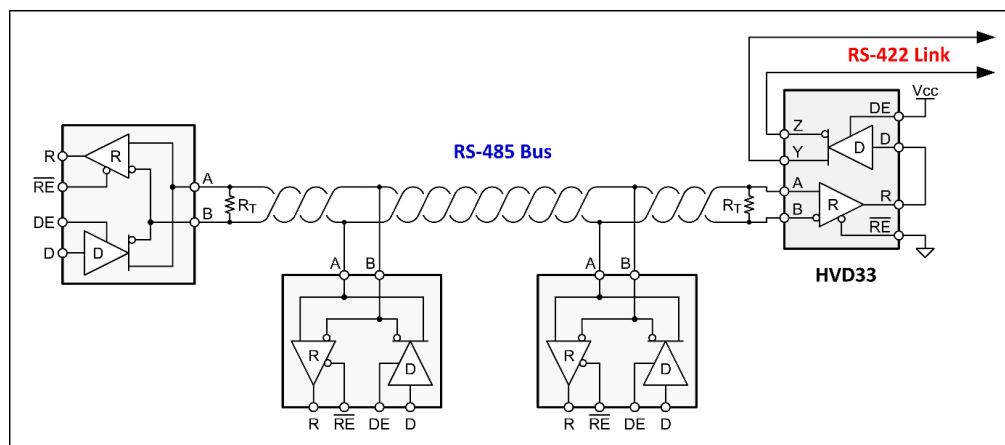


Figura 18 – Exemplo de comunicação RS485.

2.4.2 Protocolo de comunicação *ModBus*

Protocolos de comunicação são o conjunto de regras que determinam como os dispositivos de uma rede trocam informações [Freund (2008)]. Dentre os vários protocolos de comunicação serial existentes, este documento tratará do protocolo *Modbus*, uma vez que será implementado no produto final.

Modbus é um protocolo aberto, normalmente utilizado em comunicação serial, tratando-se de um mecanismo bastante divulgado e com grande utilização por ser compatível com E/S (entradas e saídas) remotas, comunicação entre autómatos e ser simples de aplicar [Electric (2007)].

O protocolo *Modbus* teve origem em 1971, através da empresa Modicon Inc, tornando-se uma grande referência para a indústria nos anos 1980. Existem dois modelos para o mesmo, que são:

- RTU: Os caracteres manipulados possuem 8 bits + 1 bit de paridade;
- ASCII: Os caracteres possuem 7 bits + 1 bit de paridade.

O protocolo *Modbus* se relaciona com o padrão OSI através das camadas 1 (Física), camada 2 (Enlace) e camada 7 (Aplicação). Na camada física, faz-se utilização de um cabo par trançado com velocidade de comunicação de no máximo 19600 $\left[\frac{bits}{s}\right]$, utilizando-se de até três diferentes tipos de interfaces compatíveis: RS232, RS485 ou Anel de Corrente. Na camada de Enlace, o acesso à rede se faz por meio da estrutura mestre/escravo, onde uma vez que o mestre solicita a informação de um escravo, este está habilitado a se comunicar, caso contrário permanece “adormecido”, de forma que o mestre aciona o escravo de duas formas possíveis, podendo ser individualmente ou difundindo a informação para todos os escravos simultaneamente (*Broadcast*), bastando inserir o endereço 00. Na camada de aplicação, utiliza-se as funções de leitura e escrita de variáveis (*bis*, *words*, *E/S*), diagnóstico e estatísticas de ocorrência da rede.

Tabela 3 – Formato do pacote de dados enviados pelo escravo no protocolo *Modbus*.

Endereço	Função	Dados	Checagem Erro
2 bytes	2 bytes	N bytes	2 bytes
Número do Escravo	Código da Função	Informação	CRC16

Para a resposta do escravo, o formato do pacote de dados é o seguinte:

Tabela 4 – Funções do protocolo e sua tradução.

Número da Função	Descrição
1 ou 2	Leitura de bits
3 ou 4	Leitura de palavras
5	Escrita de bits
6	Escrita de palavras
7	Leitura rápida de 8 bits
8	Diagnóstico de trocas
11	Leitura contador de eventos

Tabela 5 – Formato do pacote de dados enviados pelo escravo [Electric (2007)].

Número	Código	Informação	Informação
1 byte	1 byte	n byte	2 bytes

2.5 Planejamento do Produto e sua Qualidade

Baseado em ferramentas de desenvolvimento de projeto de produto como é proposto em [Baxter \(1998\)](#), neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia com itens de produto voltado para o mercado mas foram omitidos alguns passos uma vez que o produto é destinado a aprendizagem tanto do autor quanto daqueles que farão usufruto do produto final.

Primeiro foi gerado o conceito do objeto a ser implementado, ou seja, foi excitada a ideia da instrumentação a partir da proposta da bancada de ensaios hidrelétricos. Com o auxílio das ferramentas *brainstorm* (geração aleatória de conceitos para estarem presentes no objeto) e funil de decisões [[Baxter \(1998\)](#)], foram amadurecidos e definidos os requisitos iniciais do “cliente” (alunos que usarão a bancada para aprendizado de modelagem manual de turbinas hidrelétricas e a conferência dos dados através dos dados obtidos eletronicamente).

Após gerada lista de especificações gerais, desenvolveu-se uma matriz de correlação entre os requisitos do cliente e a tradução para elementos técnicos de engenharia através da ferramenta Desdobramento da Função Qualidade - DFQ. Para cada requisito do projeto, um ou mais dados técnicos estão ligados por um nível de relacionamento sejam eles: positivo forte ou positivo fraco. As inter-relações negativas foram excluídas a partir do funil de decisões.

Com as especificações técnicas bem definidas, foi sugerido uma primeira solução

para o produto. Solução esta que foi reavaliada após o raciocínio sobre as possíveis falhas, suas causas e efeitos produzidos sobre o usuário. O nome da ferramenta utilizada neste ponto é FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) traduzido para o português como Análise do Modo de Falhas e seus efeitos. Retorna ao usuário em forma quantizada a criticidade da falha, sendo motivo de inclusão de alterações principalmente no que diz respeito a segurança na utilização do produto idealizado.

2.6 Visão Geral Sistema Operacional Linux – Ubuntu

Software livre é um programa de computador sem restrições quanto a cópias, modificações, uma vez que seu código-fonte é disponível. A identificação se dá caso atenda as seguintes necessidades: liberdade para utilização para qualquer finalidade, adaptação para necessidades específicas, redistribuição de cópias sem impedimentos, além da liberdade para aperfeiçoamentos do código [Zon e Brozeguini (2014)].

Dentro do contexto de *softwares* se encontram os sistemas operacionais, que são a interface entre os dispositivos físicos presentes na máquina (microcomputador) e o usuário. De modo geral o sistema operacional gerencia as funcionalidades dos componentes físicos presentes na máquina, traduzindo as necessidades do usuário em linguagem entendível para cada componente, faz também o inverso, além de controlar os demais *softwares* necessários para que o usuário execute tarefas específicas.[20] O sistema operacional Linux é um exemplo bem difundido e conhecido de sistema operacional livre, de *software* livre, ou seja, o seu código fonte está disponível sem restrições e atende os requisitos citados anteriormente. Como todo sistema operacional, possui um núcleo chamado *Kernel*, responsável por gerenciar os recursos do sistema como um todo, como por exemplo o *mouse*, teclado, impressora, disco rígido, etc [Zon e Brozeguini (2014)].

O Kernel do Linux foi inicialmente desenvolvido por Linus Torvalds (estudante finlandês) em 1991, que através da ajuda de *hackers* de todo o mundo, consegue distribuir e otimizar conjuntamente os recursos do sistema. Com as modificações para uso específico, o Linux tornou-se um sistema operacional capaz de funcionar em um número grande de computadores, supercomputadores, até mesmo celulares e dispositivos móveis. Uma de suas maiores aplicações é em servidores para internet e servidores para banco de dados segundo suas características mais marcantes de segurança, como será visto a seguir [Zon e Brozeguini (2014)].

2.6.1 Vantagens do Linux

- Gratuidade: há liberdade de utilização e distribuição sem quaisquer cobranças;
- Estabilidade: raramente acontece travamentos ou perdas de informações por problemas de sistema;

- Interface amigável: interfaces amplamente configuráveis;
- Aplicativos disponíveis: para a maioria das atividades rotineiras existem aplicativos disponíveis para *download*, como por exemplo escrita e leitura de documentos, tocar músicas, enviar *e-mails* e ter acesso à *internet*, etc;
- Vasto apoio na *internet*: existem diversas comunidades, *blogs*, sítios que fornecem apoio à dúvidas de utilização e configuração do Linux;
- Invulnerabilidade à vírus: não há vírus para Linux, ou seja, altamente seguro;
- Usuário avançado: fornece abertura para configuração em diversos níveis de aplicação.

2.6.2 Desvantagens do Linux

- Instalação e configuração: não tão trivial ou intuitivo quanto outros sistemas operacionais;
- Falta de padronização: a liberdade da distribuição causa uma desorganização nos padrões do sistema operacional;
- Instalação e remoção de aplicativos: pode ser feito de diversas maneiras, uma vez que cada distribuição possui uma formatação, seguindo a desvantagem da falta de padronização.

2.6.3 Distribuições do Linux

Existem inúmeras distribuições do Linux, sendo algumas das mais conhecidas: UBUNTU, DEBIAN, MAGIAN, FEDORA, OPENSUSE, MINT, CENTOS, entre outros.

A distribuição do Linux UBUNTU foi concebida em 2004 por Mark Shuttleworth (empresário Sul-africano) e sua companhia Canonical. Idealizou a distro (distribuição) com a premissa que fosse mais próxima do usuário final, portanto requisitos como facilidade de manipulação, design chamativo e inovador, completamente grátis, entre outros. Partindo da distribuição Debian, Shuttleworth começou a construir o UBUNTU. Como foi rapidamente difundido através de comunidades, se tornou o mais popular dentre as distribuições do Linux [[UbuntuOrg \(2014\)](#)].

O UBUNTU é então indicado para usuários iniciantes, por ter aparência amigável, possuir uma manipulação relativamente facilitada e intuitiva e, por ser constituído baseado em comunidades, possuir um arsenal de artigos, guias, manuais e outros tipos de suporte ao usuário. No caso da aplicação que este documento propõe, esta distribuição torna-se adequada, uma vez que é didática e suficiente além de robusta.

3 Projeto Eletro-Eletrônico da Bancada

3.1 Desenvolvimento de Requisitos do Produto

Embasada pela importância econômica da conclusão do trabalho acadêmico, como demonstrado no item (1.1), o item que se inicia tomou rumos de projeto de produto, o que transparecerá adiante. Seguido a metodologia de projeto de produto, inicialmente foi desenvolvido um brainstorm para a elaboração de ideias de aplicação de sensores, transdutores, condicionadores de sinais, modelos de placas, módulos, protocolos, formas de comunicação dentre outros. Após uma avaliação geral da instrumentação já presente por resultado dos trabalhos anteriores, foram decididos os principais itens da instrumentação e do sistema supervisório ilustrado através da ferramenta Desdobramento da Função Qualidade, demonstrado no item (3.1.1), além da tradução em requisitos técnicos tais como presentes no item (3.1.2).

3.1.1 Desdobramento da Função Qualidade da Instrumentação da Bancada

Tabela 6 – Desdobramento da função qualidade do sistema supervisório.

NÚMERO DA LINHA	IMPORTÂNCIA (0-10)	REQUISITOS DO CLIENTE	REQUISITOS TÉCNICOS															
			Sensores de pressão	Células de carga	Sensor de rotação	Sensor de Fluxo	Sensor de Nível	Display LCD	Quadros de Comando e aquisição	Rede Serial	Protocolo de comunicação	Microcontrolador	Condicionamento de Sinais	Computador (Host) SCADABR	Componentes de segurança	Interface Didática	Módulo de conversão de interfaces seriais	Cabeamento
1	10	Aquisição de pressão em 4 pontos	•						•		•	•	•	○			○	○
2	8	Exibição dos dados de pressão	•						•	○	○	○	•	○	•	○		○
3	10	Aquisição de dados de força		•					•			•	•	○			○	○
4	8	Cálculo do torque resultante		•								•		○				

NÚMERO DA LINHA	IMPORTÂNCIA (0-10)	REQUISITOS TÉCNICOS	
		REQUISITOS DO CLIENTE	Sensores de pressão
16	6	Controle do inversor de frequência	Células de carga
17	9	Robustez a sobretensões	Sensor de rotação
18	9	Robustez a curto-circuitos	Sensor de Fluxo
19	10	Robustez em manobras de emergência	Sensor de Nível
20	6	Interatividade	Display LCD
21	4	Obtenção de dados em tempo real	Quadros de Comando e aquisição
22	5	Fácil manutenção	Rede Serial
23	3	Design agradável	Protocolo de comunicação
24	5	Visualização remota dos dados	Microcontrolador
ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS COMPONENTES DE ENGENHARIA		Computador (Host) SCADABR	Condicionamento de Sinais
Pressão de 0,98 bar		Componentes de segurança	Interface Didática
Força de 10kgf		Módulo de conversão de interfaces seriais	Cabeamento
Frequência de 180Hz		Diagramas esquemáticos	Sinalização
Vazão para 51 litros/segundo		Leds 220 VAC, 24VDC, 12VDC, 5VDC	
De 0 a 1m de altura			
Display LCD 480 x 800 serial			
Quadro de Comando elétrico e quadro de aquisição			
Rede serial com interfaces RS232 e RS485			
Protocolo Serial Modbus RTU			
Arduino Leonardo			
Filtro analógicos ativos com ganhos calculados			
Microcomputador com Linux Ubuntu e SCADABR			
Contactores, disjuntores, fusíveis, botoeiras, etc.			
SCADABR com desenho sistemático da bancada			
Placa de conversão RS485 RS232			
Par trançado e cobre com diâmetro coerente			
Esquemático eletrônico e diagramas de ligação			

Legenda: ● Interação Positiva forte; ○ Interação Positiva fraca.

3.1.2 Tradução dos requisitos técnicos do produto

Os requisitos da solução para o sensoriamento estão descritos, de uma forma mais técnica como o resultado da aplicação do QFD, vistos em forma de tópicos.

- Especificações de requisitos do sensor de pressão:
 - Quatro pontos de recolhimento de pressão:
 1. Subida da coluna d'água;
 2. Descida da coluna d'água;
 3. Entrada da turbina;
 4. Saída da turbina
 - Usar sensores de pressão com saída de 4 a 20 mA (padrão a ser adotado) com dois fios e alimentados de 5 a 24 V (Tensões que estarão disponíveis na fonte);
 - Capacidade para aferir 0,98 bar;
 - 8mm de diâmetro (encaixe nos furos já presentes na bancada).
- Especificações de requisitos das células de carga:
 - Medição de força em dois pontos do eixo da turbina a fim de se ter a diferença e aplicado ao raio tem-se o torque;
 - Capacidade de se aferir 5 Kgf;
 - Alimentação de 5 a 24 V (Tensões que estarão disponíveis na fonte);
 - Compensação de efeitos de temperatura (Baixa deriva);
 - Saída em forma de tensão de 0 a 5 V.
- Especificações de requisitos do sensor de rotação:
 - Sensor cilíndrico de no máximo 2 cm diâmetro para fácil adaptação no suporte já instalado;
 - Alimentação de 5 a 24 V (Tensões que estarão disponíveis na fonte);
 - Saída Normalmente Fechado;
 - Invólucro cilíndrico rosqueado;
 - Invólucro de material metálico resistente a oxidação;
 - Frequência de comutação de $180 \text{ Hz} = 6 \cdot 30 \text{ Hz}$ uma vez que se tem instalado uma engrenagem com 6 ressaltos e rotação máxima da turbina de $1800 \text{ rpm} = 30 \text{ Hz}$;

- Saída Normalmente Fechado para uso da borda de descida.
- Especificações de requisitos do sensor de fluxo:
 - Vazão para 51 litros/segundo;
 - Alimentação de 5 a 24 V (Tensões que estarão disponíveis na fonte);
 - Saída de corrente 4 a 20 mA ou trem de pulso com amplitude de 5 V;
 - Tubo de 4” para conexão na tubulação da bancada;
 - Compatível com fluidos de diversas densidades incluindo água;
 - Resistente a fluidos com altos índices de durezas como a água suja.
- Especificações do microcontrolador e estrutura de processamento de dados, no qual terá como função calcular as potências, exibir os dados no *display* e gerar comunicação do sistema.
 - Velocidade de processamento podendo ser de 11 MHz para rápido processamento e aproximação de um trabalho em tempo real;
 - Conversor A/D com uma boa resolução;
 - Portas digitais (mínimo 8)I;
 - 32kBytes de memória *flash* de programa;
 - *Socket dip* 28 pinos;
 - Alimentação de 5 a 24 V;
 - Velocidade de comunicação serial de 9600 bps ou superior.
- Requisitos do protocolo de comunicação e interface:
 - Velocidade de comunicação de 9600 bps;
 - Sistema mestre-escravo;
 - Compatibilidade com interfaces RS232 e RS485;
 - Fácil operação e manutenção;
 - Checagem de erro por *checksum*;
 - Distância de comunicação compatível com 10 m.
- Robustez elétrica e de segurança:
 - Disjuntores;
 - Contactores para acionamento do circuito;
 - Botões de emergência;

- Leds e lâmpadas para sinalização.
- Interatividade e controle:
 - Display LCD com comunicação comum e opção para comunicação serial;
 - Botões de acionamento identificados;
 - Leds indicativos ;
 - Quadro de comando com funções específicas;
 - Interface amigável do *software*, composta de uma figura proporcional à bancada.

3.2 Proposta Geral do Sistema Supervisório

Neste tópico serão ilustrados as propostas do sistema supervisório para a bancada hidráulica, utilizando de diagramas de funcionamento, por algumas vezes excluindo itens que serão abordados em pontos posteriores do documento.

Seguindo a estrutura física que outrora se encontra no laboratório, algumas conexões inexistentes até o momento serão incluídas, como pode ser visto no item (3.2.1) e a forma de comunicação escolhida como sendo ponto principal da organização de uma nova estrutura de recolhimento dos dados será apresentada no item (3.2.2).

3.2.1 Diagrama de Funcionamento Proposto para o Sistema Supervisório

Utilizando a figura em Oliveira (2014), a estrutura proposta pela Fig.(21) foi sugerido então um novo diagrama composto além da bancada de ensaio de pico turbinas hidrelétricas, com a turbina do modelo Indalma já instalada, da presença do computador que ilustra o controle através do sistema supervisório.

O sistema supervisório foi idealizado inicialmente com a divisão em fontes de tensão e processamento de dados, mas ao longo do projeto chegou-se a um produto mais genérico embarcando as fontes e os processamentos dos dados em uma mesma placa. Dessa forma caso haja necessidade de troca ou repetição da bancada ou itens da mesma, seria então preciso a fabricação de apenas um formato de placa de aquisição de dados e instrumentação.

Como dito anteriormente nesse documento a bancada já havia sido concebida mecanicamente, então foi inserido alguns sensores como pressão, rotação, força, fluxo, etc. Para alimentar o sistema da bancada tem-se acoplado um conjunto moto-bomba que bombeia a água presente no reservatório pela tubulação até a chegada a turbina hidráulica. Para o controle do conjunto tem-se presente um inversor de frequência, passível de controle automático e objeto componente do sistema supervisório aqui sugerido. A

alimentação elétrica e o sistema de proteção e acionamento para do conjunto moto-bomba e inversor de frequência é dada a partir de um quadro de comando, já implementado, denominado quadro de comando do inversor, concebido pela aluna Maria Eugênia do curso de Engenharia de Energia do Campus Gama da Universidade de Brasília.

A solução do sistema se baseia é explicada conforme os itens da legenda do diagrama como sugere a Fig.(21).

1. Inversor de Frequência: responsável por controlar o conjunto moto-bomba;
2. Quadro de Comando de Instrumentação: responsável por fornecer tensões em níveis adequados ao quadro de comando de aquisição e proteger os circuitos a frente de curto-circuito e sobretensões;
3. Quadro de Aquisição: responsável por receber os dados dos sensores, processá-los, exibi-los para o usuário, além de comunicar-se com os demais dispositivos da rede, principalmente enviando os dados para o controlador do sistema supervisor, o *host*;
4. Conjunto moto-bomba: eleva a água pela tubulação a partir do reservatório, sendo possível então controlar diversos níveis de pressão na entrada da turbina;
5. Sensor de pressão na tubulação: identifica a altura da coluna d'água controlada pelo conjunto moto-bomba e as válvulas presentes na tubulação;
6. Sensor de pressão na entrada da turbina: quantiza a pressão na entrada da turbina como variável necessária para o cálculo da potência hidráulica;
7. Sensor de pressão na saída da turbina: quantiza a pressão na saída da turbina como variável necessária para o cálculo da potência hidráulica;
8. Sensor de rotação: quantiza a rotação da turbina para o cálculo da potência de eixo;
9. Células de carga: caracterizam a força gerada pela rotação da turbina. Associada ao raio, tem-se o torque, que é variável necessária para o cálculo da potência de eixo;
10. Transdutor de fluxo: quantiza o fluxo de água na entrada da turbina. Importante para o cálculo da potência hidráulica;
11. Conversor serial RS485/RS232 de modelo WP05 fabricado pela empresa WP Inovações Tecnológicas. Permite a comunicação serial a partir de qualquer uma das interfaces, sendo uma conversão de ambas as direções;
12. Idem item 11;
13. Microcomputador com sistema Linux de distribuição UBUNTU instalado, rodando o sistema supervisório através do *software* SCADABR;

14. Cabos de comunicação par trançado com 4 fios, permitindo a comunicação serial RS485 e integração com as interfaces RJ11 possuindo um tamanho compatível com a tecnologia adotada.

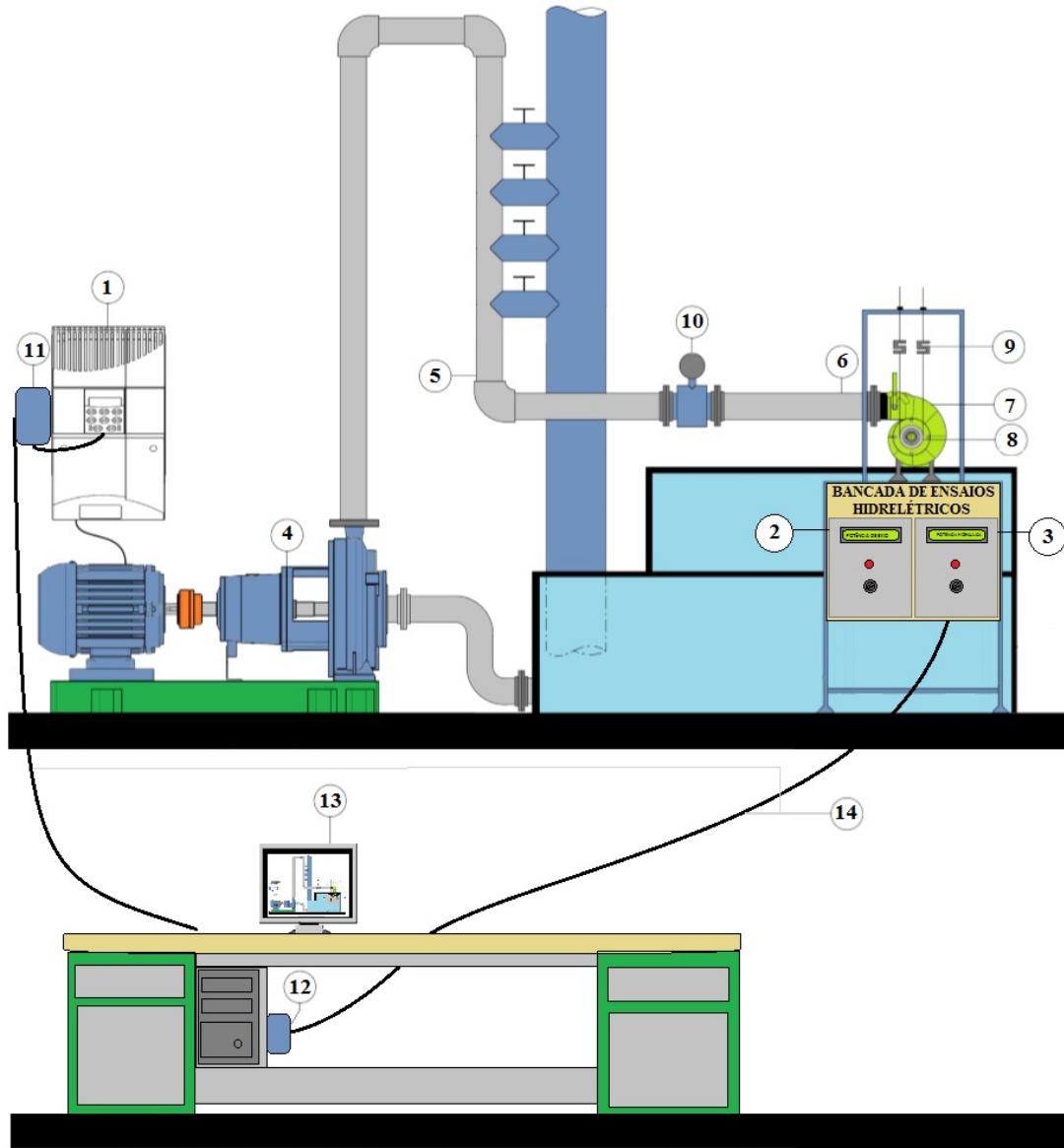


Figura 19 – Disposição física da bancada e integração do sistema supervisório.

As placas WP05, Fig.(62), ilustradas acima são dispositivos conversores de nível elétrico de rede de comunicação RS232 para RS422 ou RS485 (necessita alterações para tal funcionalidade). Esta placa foi concebida pela empresa WP Inovações Tecnológicas. De modo geral, a WP05 converte uma entrada/saída DB9 (RS232) em duas entradas/-saídas RJ45(RS485 ou RS422). Ainda nela está presente uma proteção opto-elétrica pelo contexto onde geralmente esta é inserida, automação de estacionamentos, que é passível de intempéries como descargas elétricas de amplitudes elevadas causando além da queima

dos equipamentos responsáveis pela automação, como cancelas e dispensadoras de tickets, a queima de computadores conectados em rede.

O diagrama seguir ilustra as interconexões físicas e lógicas dos dispositivos da rede:

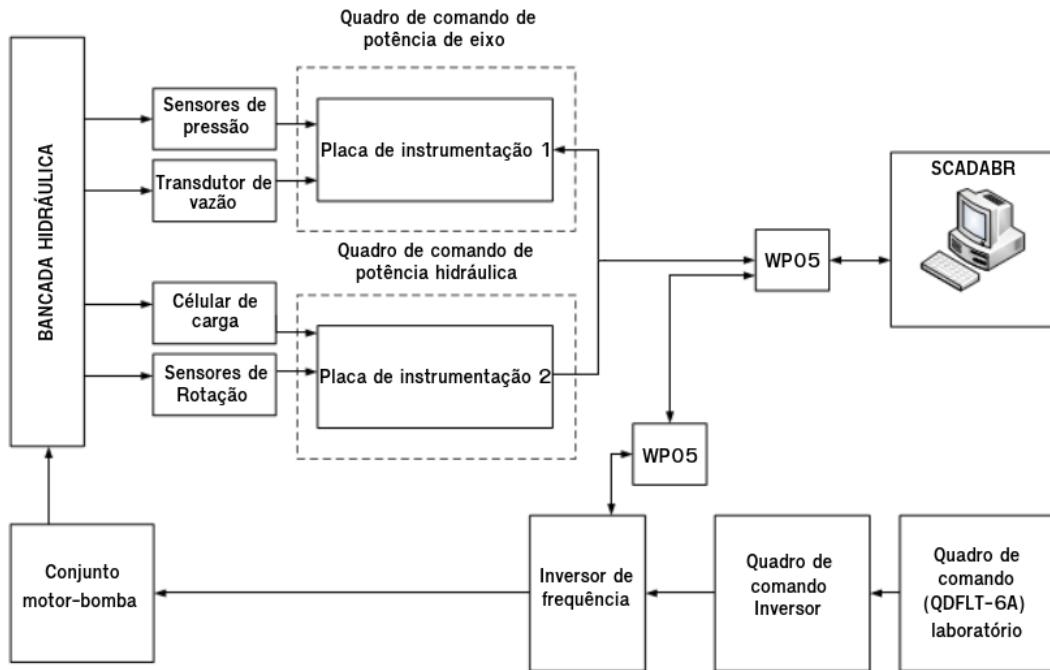


Figura 20 – Diagrama de funcionamento da bancada de ensaio de pico turbina hidráulica Indalma.

O usuário terá acesso remoto a todos os dados de medição dos sensores, além de dados do estados das máquinas e poderá inclusive controlar o conjunto moto-bomba, criando vários perfis de potência hidráulica e como resultado a caracterização mais específica e detalhada da turbina.

3.2.2 Modelo de Comunicação Aplicado à Bancada Indalma

Mudando para o ponto de vista do modelo de comunicação serial, pode-se entender qual a relação do *host* (computadores presentes no laboratório) e os demais componentes seguindo a hierarquia proposta pelo protocolo de rede.

Na situação atual o formato de comunicação é direta (via porta serial USB) do host com um equipamento específico. O prejuízo claro e imediato é a limitação quanto ao número de portas seriais em um mesmo microcomputador. A proposta visa aumentar, por consequência do barramento adotado, para um número limite de 32 portas, englobando então os 3 dispositivos além de fornecer suporte para mais 29 se requerido em processos futuros. Além de suportar processamentos muito mais velozes se comparados ao tempo de troca manual de interfaces e ativação dos *softwares* para recolhimento de dados.

A figura a seguir demonstra a ideia da comunicação proposta por este documento, onde o host (o mestre da rede) utiliza-se de um conversor RS232 – RS485 para a entrada no padrão da rede e pode-se comunicar enviando e recebendo dados dos demais dispositivos escravos também acoplados na rede.

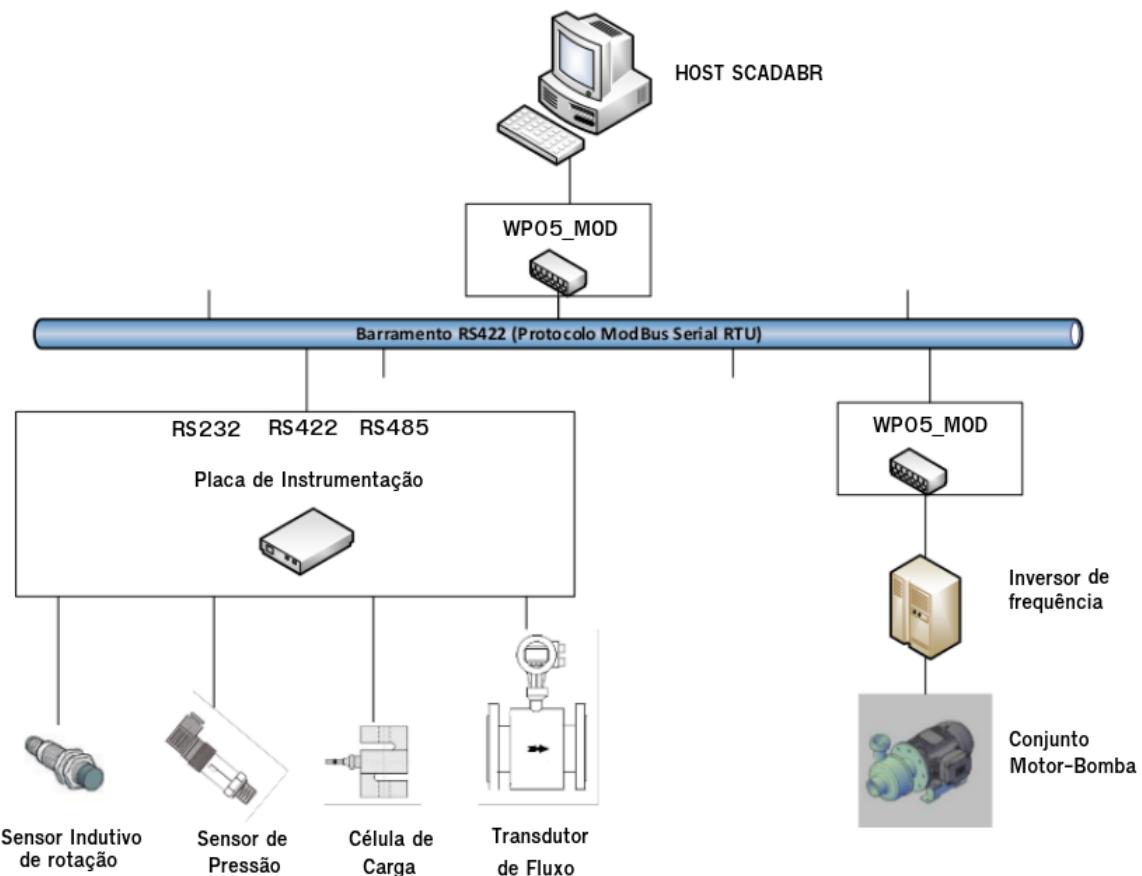


Figura 21 – Sistema Supervisório do ponto de vista da comunicação serial.

3.3 Confiabilidade e Análise de Falhas

Uma vez tido o modelo do produto a ser implementado, a aplicação da ferramenta FMEA foi sugerida como passo importante no projeto, uma vez que previsto a falha do equipamento, logo na fase de projeto e protótipo já se pudesse tomar ações corretivas, inserindo ainda mais itens de qualidade.

O método de análise de falhas proposto pela ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) propõe o uso de uma tabela de forma a enfatizar o produto analisado, a forma que este pode falhar, as consequências que a falha pode causar no processo ou danos ao usuário e quantifica a falha através da multiplicação de três indicadores:

1. A estimativa do número de ocorrências, baseado em experiência, análise do material e intuição do projetista (quantizado de 1 a 10);

2. Gravidade da falha (quantizado de 1 a 10);
3. A capacidade de detecção da falha pelo sistema, quantizado com número de 1 a 10, onde 1 significa facilmente detectável e 10 significa dificilmente detectável pelo sistema [Baxter (1998)].

A principal vantagem desta ferramenta é o direcionamento, no âmbito do projeto, para os elementos com maior identificador de risco a falhas trazendo uma robustez e maior qualidade do projeto. Além de atender as expectativas do cliente, o produto pode ter um tempo de duração prolongado e evitar danos significativos aos usuários, uma vez que foi previsto a ação a ser tomada pelo sistema.

Tabela 7 – Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA).

ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA (FMEA)								
OBJETO AVALIADO: SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA BANCADA DE ENSAIO DE PICOTURBINA HIDRÁULICA INDALMA								
Descrição do produto	Tipo de Falha	Causa	O.	Efeito	G.	Ação	D	Ind.
Controle do Inversor de Frequência	Não acionamento	Comunicação não eficiente	5	Erros de checksum	5	Verificar cabeamento e placa serial	3	75
		Ausência de alimentação	3	Não acionamento da bancada	5	Verificar quadro de comando	3	45
		Defeitos internos	3	Ações inesperadas	5	Acionar manutenção	4	60
	Açãoamento de frequência acima do esperado	Comunicação não eficiente	4	Erros de checksum	7	Verificar cabeamento e placa serial	3	84
		Botão com mau funcionamento	3	Acionamentos inesperados	7	Desligar máq./acionar manutenção	8	168
		Erros de processamento interno	2	Ações inesperadas	7	Acionar manutenção	4	56
	Açãoamento de frequência abaixo do esperado	Comunicação não eficiente	4	Erros de checksum	5	Verificar cabeamento e placa serial	3	60
		Botão com mau funcionamento	3	Acionamentos inesperados	4	Acionar manutenção	8	96

ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA (FMEA)								
OBJETO AVALIADO: SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA BANCADA DE ENSAIO DE PICOTURBINA HIDRÁULICA INDALMA								
Descrição do produto	Tipo de Falha	Causa	O.	Efeito	G.	Ação	D	Ind.
Quadro de Comando elétrico de instrumentação	Não fornece alimentação	Erros de processamento interno	2	Ações inesperadas	5	Acionar manutenção	4	40
		Circuitos reguladores não funcionam	3	Não ativa instrumentação	4	Troca de componentes	5	60
		Quadro geral com mau funcionamento	3	Não ativa aciona reguladores	5	Verificação do quadro geral	7	105
		Falha no cabeamento	5	Não ativa instrumentação	5	Verificação do cabeamento	6	150
	Fornece alimentação excedente	Chaves com mau funcionamento	4	Não ativa instrumentação	4	Troca de componentes	6	96
		Círculo regulador com mau funcionamento	4	Danos a instrumentação	8	Troca de componentes	5	160
	Fornece alimentação reduzida	Componentes mau dimensionados	3	Danos a instrumentação	7	Redimensionamento do projeto	6	126
		Círculo regulador com mau funcionamento	5	Não excita sensores	5	Troca de componentes	6	150
		Componentes mau dimensionados	3	Não excita sensores	5	Redimensionamento do projeto	5	75
	Não liga	Excesso de carga	2	Danos a instrumentação	8	Redimensionamento do projeto	4	64
		Cabeamento desconectado	5	Não ativa instrumentação	4	Verificação do cabeamento	5	100
		Chave com mau funcionamento	3	Não ativa instrumentação	4	Troca de componentes	6	72
		Curto-circuito	2	Danos a instrumentação	8	Verificação de curto-circuito	7	112
		Sobretensão	3	Danos a instrumentação	8	Redimensionamento da placa	7	168
Quadro de Instrumentação	Não ascende os leds	Conexão errada dos componentes	4	Danos a instrumentação	6	Verificação do projeto	6	144
		Alimentação inexistente	5	Não alerta funcionamento	3	Verificar quadro de comando	7	105
		Leds danificados	7	Não alerta funcionamento	3	Efetuar troca led danificado	8	168
	Não lê sensores	Conexão incorreta de condutores	6	Não alerta funcionamento	4	Verificação do cabeamento	8	192
		Mau funcionamento de sensores	5	Não afere grandeza	5	Verificação do sensor danificado	5	125
		Conexão incorreta de condutores	4	Não afere grandeza	5	Verificação do cabeamento	7	150
		Mau funcionamento do processador	5	Não recebe, nem processa dados	5	Reconfigura processador ou efetuar troca	6	150

ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA (FMEA)								
OBJETO AVALIADO: SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA BANCADA DE ENSAIO DE PICOTURBINA HIDRÁULICA INDALMA								
Descrição do produto	Tipo de Falha	Causa	O.	Efeito	G.	Ação	D	Ind.
	Não comunica serial	Mau funcionamento do cabo serial	8	Não envia ou recebe dados	3	Verificação do cabeamento serial	4	96
		Mau funcionamento do circuito conversor serial	4	Não converte para padrão serial	3	Efetuar troca do circuito conversor serial	4	48
		Ausência de Alimentação	5	Não ativa circuito conversor serial	4	Verificar quadro de comando	3	60
		Mau funcionamento do processador	5	Não envia ou recebe serial	3	Reconfigura processador ou efetuar troca	7	105
	Não processa dados	Conexão incorreta de condutores	4	Não recebe dados	5	Verificação do cabeamento	5	100
		Mau funcionamento do processador	5	Não executa processamento	3	Reconfigura processador ou efetuar troca	8	120
	Não exibe display	Mau funcionamento do display	5	Não exibe caracteres ou exibe caracteres desordenados	2	Efetuar trocar display	5	50
		Mau funcionamento do processador	4	Não exibe dados corretos	3	Reconfigura processador ou efetuar troca	7	84
		Ausência de alimentação	6	Não liga display	2	Verificar quadro de comando	7	84
		Conexão incorreta de condutores	7	Não liga display	3	Verificação do cabeamento	6	126

Legenda:

- O.: número estimado de ocorrência da falha;
- G.: gravidade da falha;
- D.: capacidade de detecção da falha pelo sistema;
- Ind.: índice de quantificação da falha.

4 Concepção do Produto

Após avaliação dos requisitos do produto e principalmente a sua qualidade, pôde-se ter então uma proposta mais sólida e detalhada. Serão listados a seguir os itens já presentes na instrumentação tais como os sensores instalados, também como uma forma de documentação do que já foi empreendido, mas os tópicos seguintes detalharão cada ponto do sistema supervisório, desde os módulos para condicionamento dos sinais, até as especificações do *software* SCADABR e suas funcionalidades importantes para o desenvolvimento do projeto. No apêndice (A) estão expostos todos os sensores e itens de maior importância para a instrumentação.

4.1 Placa de Aquisição de Dados

A placa foi concebida a partir da necessidade de uma instrumentação eletrônica mais robusta que englobasse todos os sensores presentes na bancada. A resposta dos sensores eletrônicos, os quais seriam as entradas da placa de aquisição de dados são de diversas naturezas como tensão, corrente e pulso. Considerando a tensão máxima de entrada da porta do microcontrolador de 5V, cada sinal foi tratado pelo seu correspondente circuito condicionador para que pudesse ser interpretado de maneira correta pelo estágio de processamento.

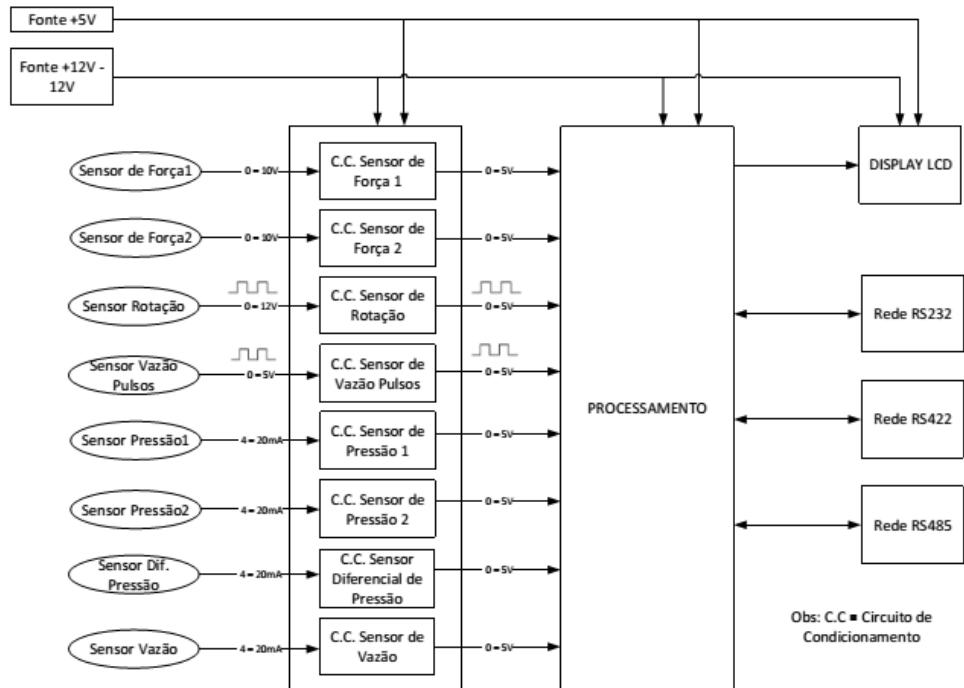


Figura 22 – Diagrama de funcionamento da placa de aquisição de dados.

4.1.1 Fontes

As fontes de +5 V e ± 12 V são responsáveis pela alimentação dos circuitos, referência para os comparadores e amplificadores operacionais bem como a alimentação do *display LCD*, entre outros.

4.1.1.1 Fonte de 5 V

A fonte de tensão de 5 V inicia-se com a retificação da onda gerada pelo transformador conectado ao *borne* J9 como mostra a Fig.(23), onde sua amplitude é de 7 V com frequência de 60 Hz. Os diodos conectados em forma de ponte instrui a corrente na direção positiva, eliminando a parte negativa da onda, a qual é refletida para o eixo positivo, efeito denominado retificação de onda completa. O capacitor ligado em paralelo suaviza as quedas da tensão por sua característica intrínseca de rejeição a mudanças abruptas de tensão. Com isso um perfil de tensão contínua começa a formar-se, ajudado pelo regulador de tensão, tem-se uma aproximação de um valor constante, com desconsideráveis ruídos. O capacitor multivoltas presente na saída do circuito tem como objetivo filtrar os pequenos ruídos ainda presentes na onda e aumenta a impedância de saída.

Para a sinalização do funcionamento do circuito e da placa foi inserido o resistor R15 e o LED PWR1.

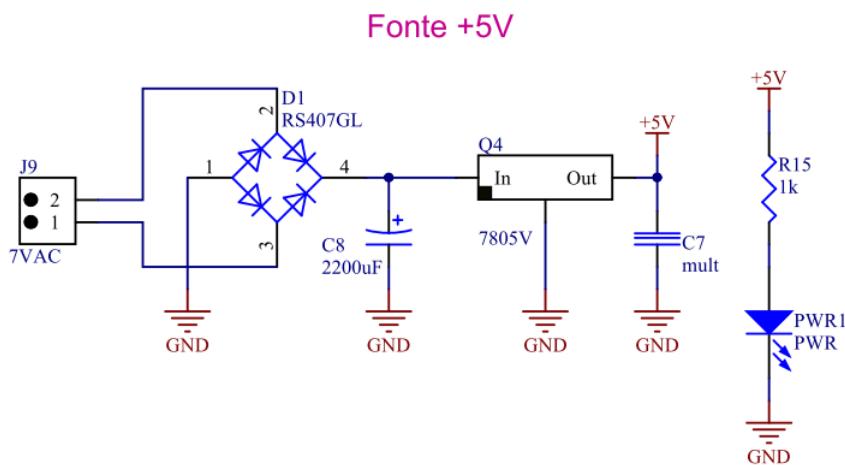


Figura 23 – Esquemático da fonte de 5 V.

Analizando o resultado da simulação presente na Fig.(24), pode-se ver à esquerda um gerador de tensão senoidal com tensão de pico de aproximadamente 7 V como mostra o voltímetro conectado em paralelo. Após passar pela ponte de diodos, a tensão retificada exibe um valor de aproximadamente 8.4 V. Ao final do circuito, como esperado, encontra-se uma tensão de 5 V e a conexão do resistor e LED de sinalização. O LED apresentado na simulação, como visto na Fig.(24), é animado e apresenta uma coloração esverdeada, enfatizando sua ativação.

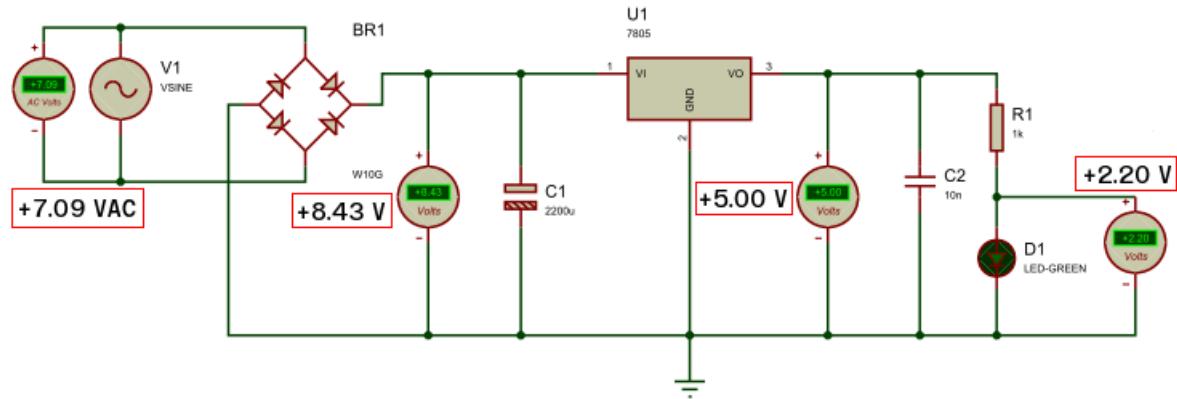
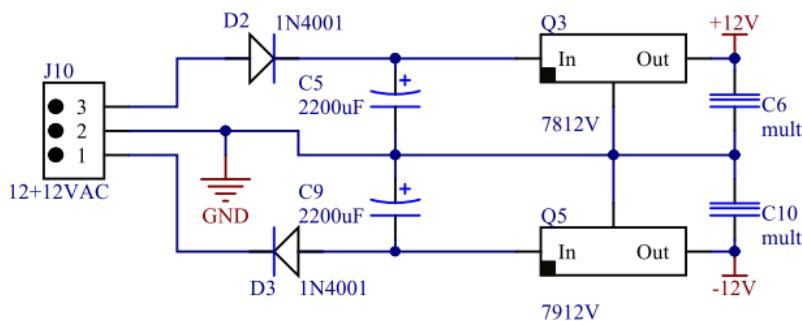


Figura 24 – Simulação da fonte de 5 V.

4.1.1.2 Fontes de $\pm 12\text{V}$

A fonte simétrica de $\pm 12\text{V}$ é formada a partir da retificação de meia onda da tensão presente no borne J10 vinda do transformador. O diodo D2 elimina a corrente no sentido borne – saída, viabilizando a passagem da tensão positiva, que é amortecida no capacitor C5 e totalmente retificada a partir do regulador de tensão Q3. A função do capacitor C6 é semelhante ao capacitor multivoltas C5 da fonte de tensão de 5 V e ao capacitor C10, ou seja, filtra pequenos ruídos e aumenta a impedância de saída do circuito.

No diodo D3, a parte negativa da onda prevalece dada as características de condução do diodo. O capacitor C9 tem seu terminal positivo ligado ao terra e o seu terminal negativo ligado ao anodo do diodo D3 pois a diferença de tensão é positivo neste sentido. Este capacitor ajuda na retificação da onda negativa tornando-a um perfil contínuo após passar pelo regulador de tensão 7912, onde encontra o capacitor multivoltas C10.

Fonte $+12\text{V} - 12\text{V}$ Figura 25 – Esquemático da fonte de $\pm 12\text{V}$.

Analizando o resultado da simulação presente na Fig.(24), pode-se ver que foi inserido um transformador com duas bobinas em paralelo ao gerador de tensão para que fossem geradas duas ondas senoidais e o centro das bobinas como referência

Observa-se uma tensão contínua resultante de aproximadamente 14,6 V na saída dos diodos como resultado da retificação parcial. Na saída dos reguladores de tensão observam-se os valores de tensão esperados: +12 V para o regulador U1 (7812) e -12 V para o regulador U2 (7912).

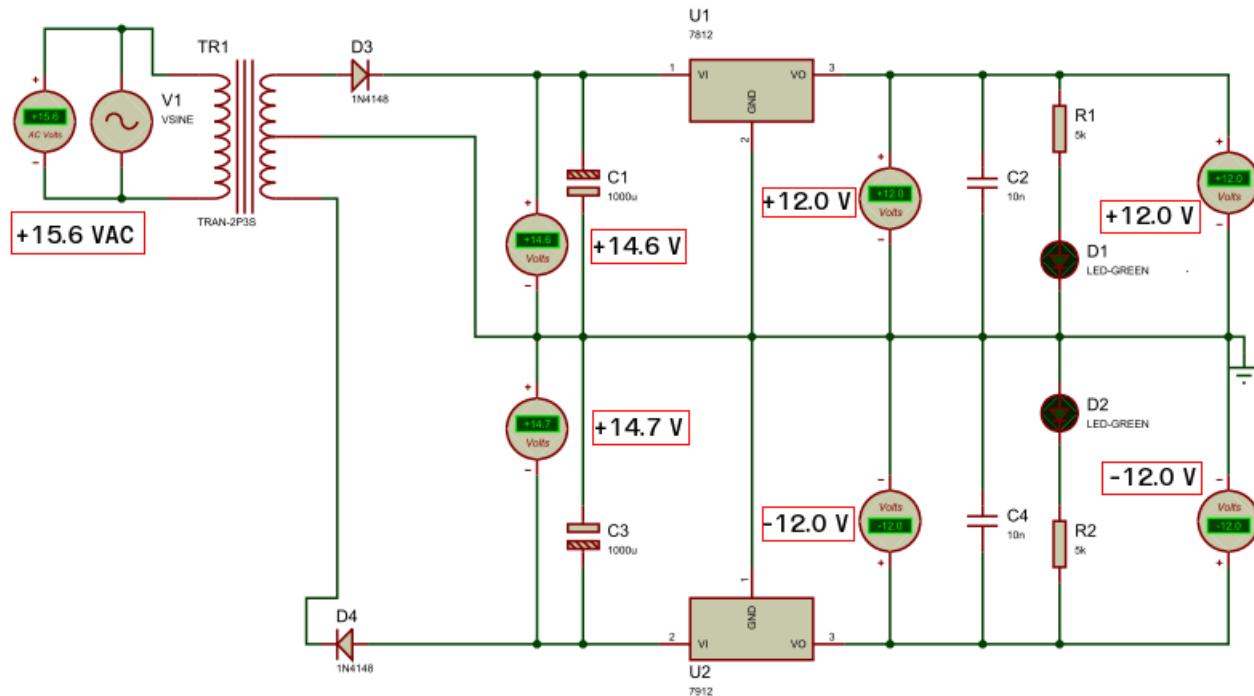


Figura 26 – Simulação da fonte de ± 12 V.

4.1.2 Condicionamento dos Sinais

Para que os níveis de sinais vindos dos sensores pudessem ser integrados ao processador e lidos com coerência, foi caracterizado a resposta individual para que filtros ou módulos de condicionamentos de sinais pudessem ser gerados.

4.1.2.1 Sensor de Pressão e Fluxo

Os sensores de pressão e uma das respostas de saída do sensor de fluxo gera uma saída em corrente de 4 a 20 mA, necessitando de um módulo de conversão de corrente para tensão que tenha valores máximo e mínimo compatíveis com o microcontrolador utilizado. Foi proposto e implementado o circuito integrado RCV420. Alimentado por uma tensão simétrica de 12 V, além da conversão de correntes entre valores de 0 a 4 mA para tensão de 0 a 5 V, também faz uma filtragem do sinal de saída, melhorando sua resposta. A Fig.(27) faz parte do conjunto de quatro conversores presentes na placa de aquisição de dados da bancada, todas com a configuração semelhante a apresentada:

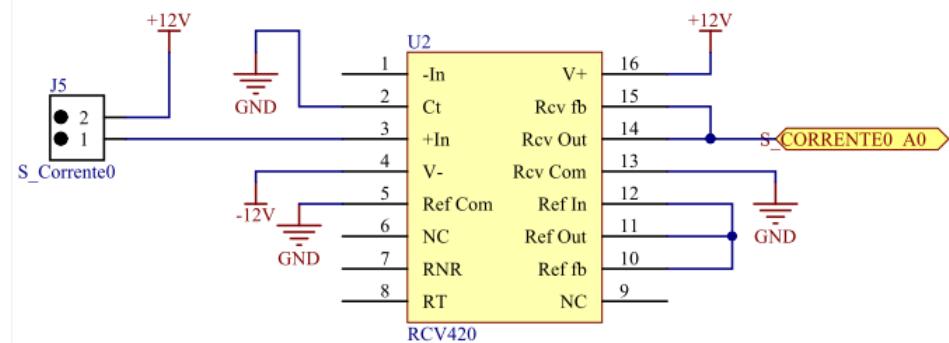


Figura 27 – Circuito integrado RCV420 conversor corrente em tensão.

4.1.2.2 Sensor de Rotação

Na placa de aquisição de dados estão reservadas duas entradas para pulsos, são estas para o sensor de rotação e para uma das formas de saída do sensor de vazão, que geram uma resposta em forma de onda de pulsos com amplitude de 12 V. A certeza do valor 12 V para a amplitude da onda quadrada se dá pelo fato de se usar uma configuração de transistor por coletor aberto, ou seja, o sensor retornará uma tensão chaveada, segundo a grandeza física aferida, com amplitude máxima com mesmo valor da tensão presente no transistor coletor de seu circuito interno.

Na Fig.(28) é mostrado o circuito responsável por tornar os valores de 0 a 12 V para 0 a 5 V utilizando a mesma topologia presente nos sensores acima mencionados, porém fixando a tensão de saída a 5 V e a tensão de entrada a 12 V.

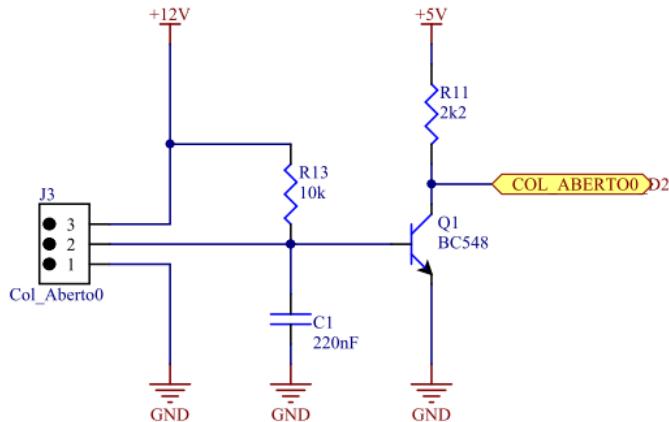


Figura 28 – Esquemático do circuito de condicionamento de sinais para sensor de pulso.

O circuito a coletor aberto, Fig.(29), pôde ser simulado da seguinte forma: um gerador de pulsos com frequência de 100 Hz (valor escolhido arbitrariamente) e amplitude de 12 V foi conectado ao circuito condicionador e a saída inserida em um simulador de osciloscópio. A onda final pode ser visualizada na Fig.(30), onde a onda com coloração amarelada é a entrada do circuito com amplitude de 12 V e a onda de cor azul é a saída do circuito 5 V.

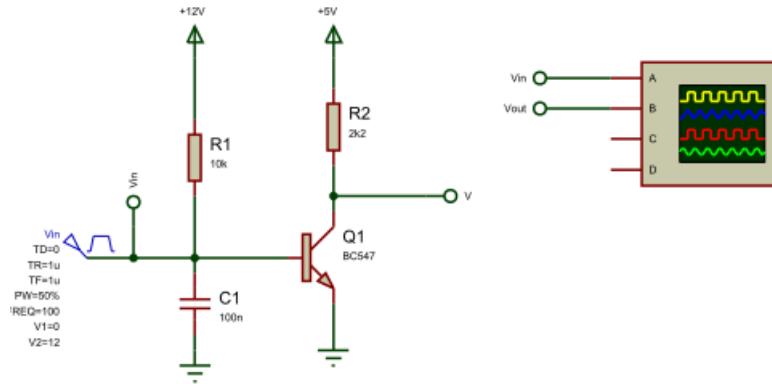


Figura 29 – Testbench do circuito de condicionamento de sinais para sensor a coletor aberto.

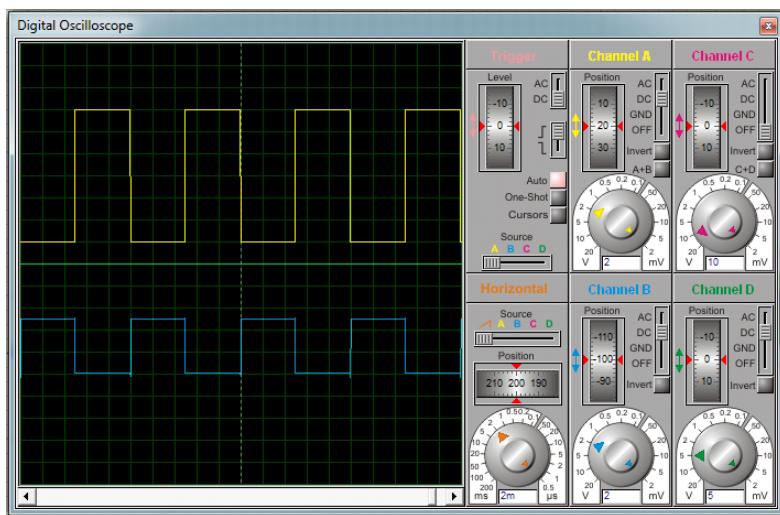


Figura 30 – Simulação do circuito de condicionamento de sinais para sensor a coletor aberto.

4.1.2.3 Células de Carga

Para a devida ligação e funcionamento das células de carga é necessário a conexão com um módulo do próprio fabricante (MK) de modelo TC05, no qual recebe em sua entrada a fiação da célula de carga e disponibiliza uma tensão de 0 a 10 V proporcional ao esforço realizado sobre os sensores. Como visto nas especificações do microcontrolador, a entrada máxima de tensão é de 5 V, inviabilizando a ligação direta do módulo com o processamento.

O circuito inicia com um divisor de tensão, dividindo por um fator de 10. O amplificador operacional com a configuração não inversora a frente fornece uma amplificação de 5 vezes do sinal de entrada. Essa topologia foi projetada para que se pudesse reduzir a quantidade de amplificadores operacionais, uma vez que utilizando a configuração inversora, seria necessário o dobro da quantidade de amplificadores operacionais utilizados. Mesmo que a configuração inversora seja capaz de produzir uma saída menor que a entrada, sem necessidade do divisor de tensão, haveria a necessidade de uma inversão do sinal, justificada a presença de mais um estágio amplificado para tal funcionalidade.

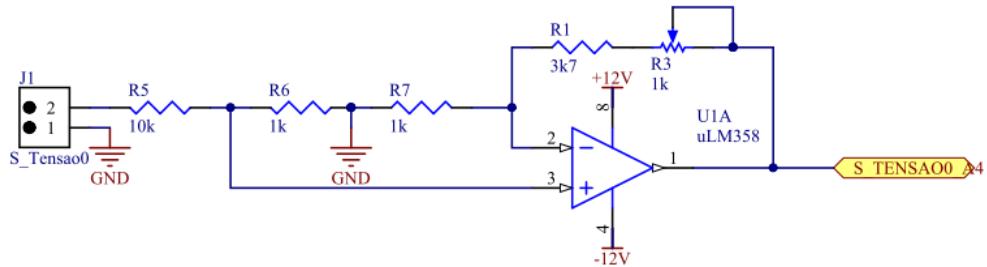


Figura 31 – Amplificador operacional para condicionamento da célula de carga.

O circuito condicionador de tensão visto na Fig.(32) pode ser simulado com a inserção de um gerador de tensão senoidal com frequência de 200 Hz (valor escolhido arbitrariamente) e amplitude de 10 V na entrada do circuito condicionador, e na saída foi inserida um simulador de osciloscópio. A onda final pode ser visualizada na Fig.(33), onde a onda de cor amarela é a entrada do circuito e a onda de cor azul é a saída do circuito com 5 Vpp.

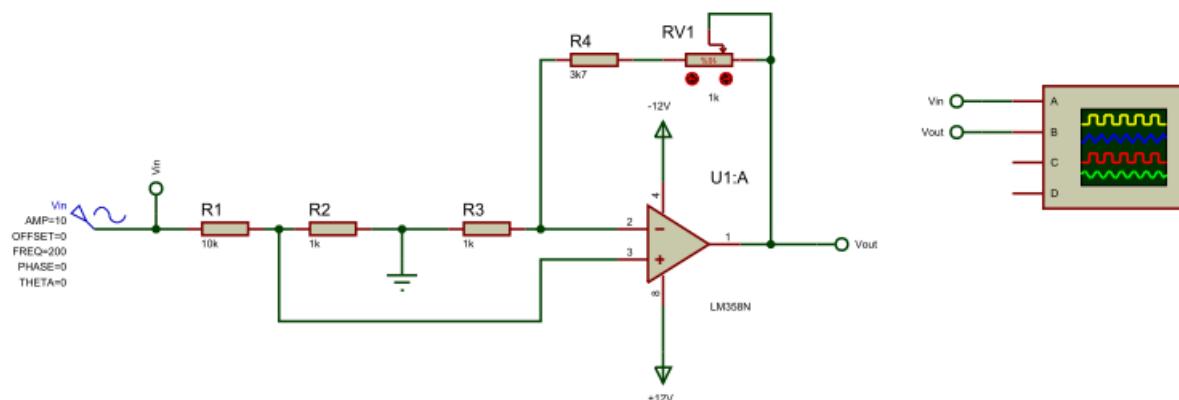


Figura 32 – *Testbench* do circuito de condicionamento de sinais para células de carga.

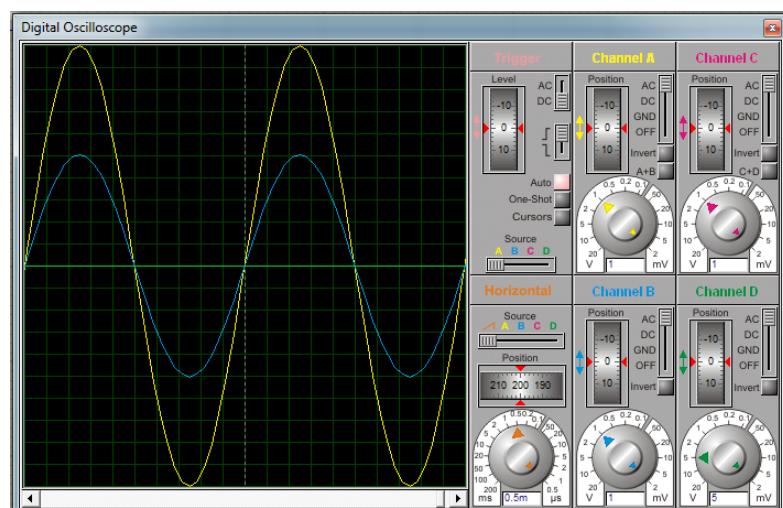


Figura 33 – Simulação do circuito de condicionamento de sinais para células de carga.

4.1.3 Processamento

O principal dispositivo do processamento dos dados gerados pelos sensores presentes na bancada é a placa de desenvolvimento Arduino. Essa placa, apesar de não ser utilizada como objeto industrial, tem características didáticas importantes para se atingir outro objetivo da bancada que é o aprendizado de disciplinas do curso de Engenharia de Energia, sendo então um equipamento versátil, de fácil aplicação e alteração.

Quando o Arduino é conectado na porta USB de um computador, este fornece +5 V em um de seus pinos, visto isso, a presença do diodo D4 é necessária para evitar o curto-circuito entre a tensão +5 V da placa de aquisição e da tensão gerada pelo Arduino, mas quando este já foi configurado e não possui conexão USB, é necessário essa tensão para alimentação dos componentes internos como o microprocessador, então ao colocar-se o *jumper* JW1, a fonte da placa consegue gerar energia necessária para que o Arduino esteja ligado.

Para exibição dos dados na própria bancada de ensaio, foi sugerido a implementação de um *display* LCD de 40 colunas por 2 linhas e suas conexões são demonstradas no esquemático da Fig.(34).

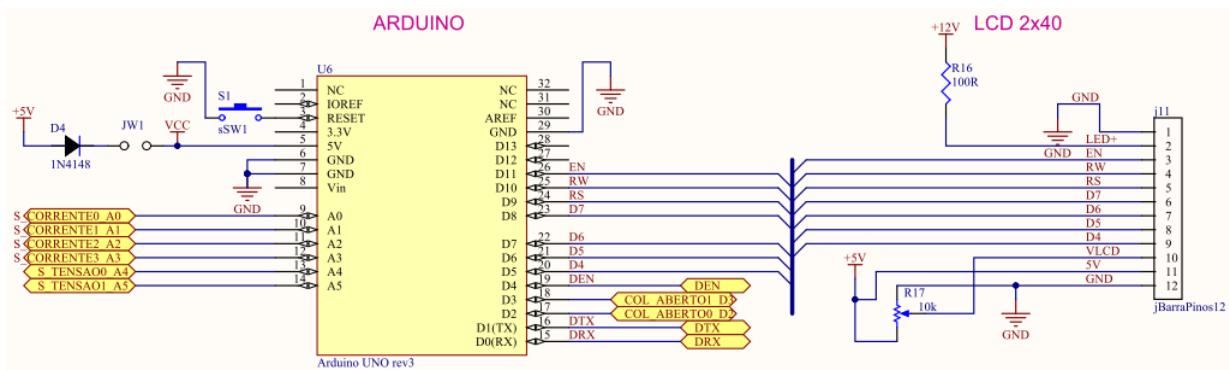


Figura 34 – Circuito para processamento e exibição de dados.

4.1.4 Comunicação e Rede

Com o pré-requisito de ser genérica, a placa de aquisição de dados possui quatro formas físicas de comunicação serial que são elas: RS232, RS485, RS422 e USB.

As comunicações RS485 e RS422 diferem na quantidade de canais para comunicação *Host/Terminal*, no qual RS422 é uma forma de comunicação *full-duplex* (2 canais) enquanto o *Host* envia informações, este também pode receber, ao contrário da comunicação RS485, onde o *Host* ocupa o barramento enquanto envia informações e não pode receber até cessar a primeira atividade [Electric \(2007\)](#). Usou-se o circuito integrado 75176 para a transformação do nível TTL (0 a 5 V) presente na saída do microcontrolador do Arduino para os níveis de tensão das redes 422 e 485. No caso da comunicação RS232,

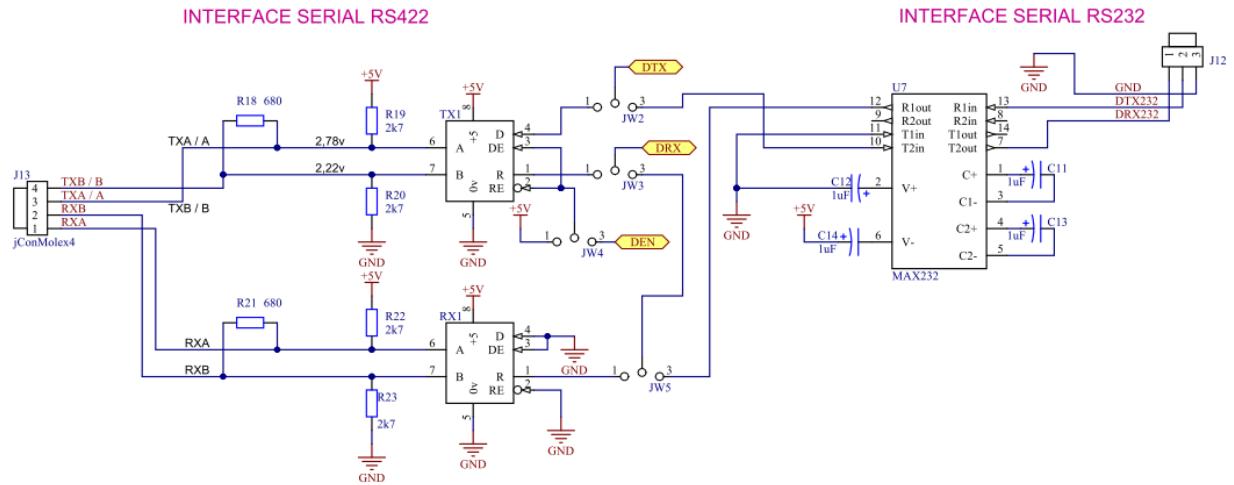
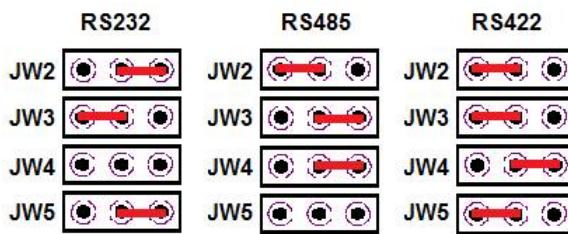


Figura 35 – Circuito para comunicação nos padrões RS232, RS485 ou RS422.

outro circuito integrado é necessário, o MAX232, capaz de tornar sinais a nível TTL em níveis RS232. A forma de comunicação via USB, neste caso, é utilizada para a gravação do *firmware* da placa na memória de programa, além de ser possível a visualização dos dados seriais transmitidos ou recebidos através do próprio console do Arduíno.

Os conectores de saída para cada rede são do tipo molex, uma vez que a placa de aquisição estará disposta em um quadro de comando e assim será possível a conexão utilizando um conector ou vários conectores presos à carcaça do quadro de comando, gerando assim uma simplificação nas conexões da placa.

A seleção da rede no qual se deseja implementar é possível através dos *jumpers* JW2, JW3, JW4 e JW5 como sugere a Fig.(36).

Figura 36 – *Jumpers* para seleção do tipo de rede.

4.1.5 Placa de Circuito Impresso

As entradas de tensão alternadas e os circuitos das fontes têm sua localização no canto superior esquerdo da placa, os circuitos integrados RCV420 para sensores de corrente no centro e inferior, os amplificadores operacionais para tratamento dos sensores de tensão também localizados no inferior da placa, a placa de processamento Arduino logo ao centro, os conectores e circuitos para sensores de pulso no inferior direito da placa, o *display* a direita logo abaixo dos conectores das redes seriais.

Um dos itens de principal atenção no *layout* da placa foi a distância entre as fontes de tensão e os dados seriais a serem transportados pelas interfaces de rede, uma vez que uma influência de uma tensão mais alta poderia alterar os padrões da rede ao qual a placa de aquisição estaria inseria, como possível consequência a queima de uma porta do computador ou outro dispositivo similar.

Os esquemáticos do projeto completo se encontram no apêndice B contendo o diagrama de conexões entre as separações por funcionalidade: bloco de aquisição de dados para cálculo da potência de eixo, potência hidráulica, bloco para processamento e exibição no *display*, redes e fontes de tensão.

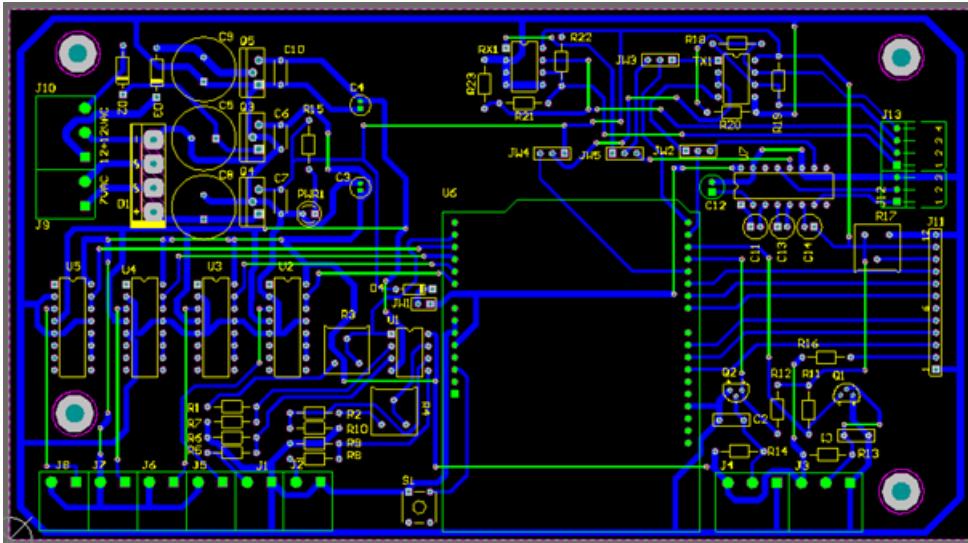


Figura 37 – Placa de circuito impresso de aquisição de dados.

Conforme desenho projetado, foi fabricado manualmente um protótipo da placa para verificação de erros e validação do circuito. A Fig.(38) revela o resultado final das etapas descritas a seguir da fabricação manual:

- Projeto e desenho da placa no *software Proteus*;
- Transferência térmica do desenho impresso em folha de papel A4 para uma placa virgem de fenolite-cobre;
- Corrosão com ácido percloroeto de ferro;
- Furação com furador manual;
- Limpeza da tinta com acetona;
- Proteção contra corrosão com a aplicação de verniz incolor.

Após todo o processo foram soldados os componentes gerando então a interface presente na Fig.(39). As conexões da face superior da placa, como apresenta o desenho

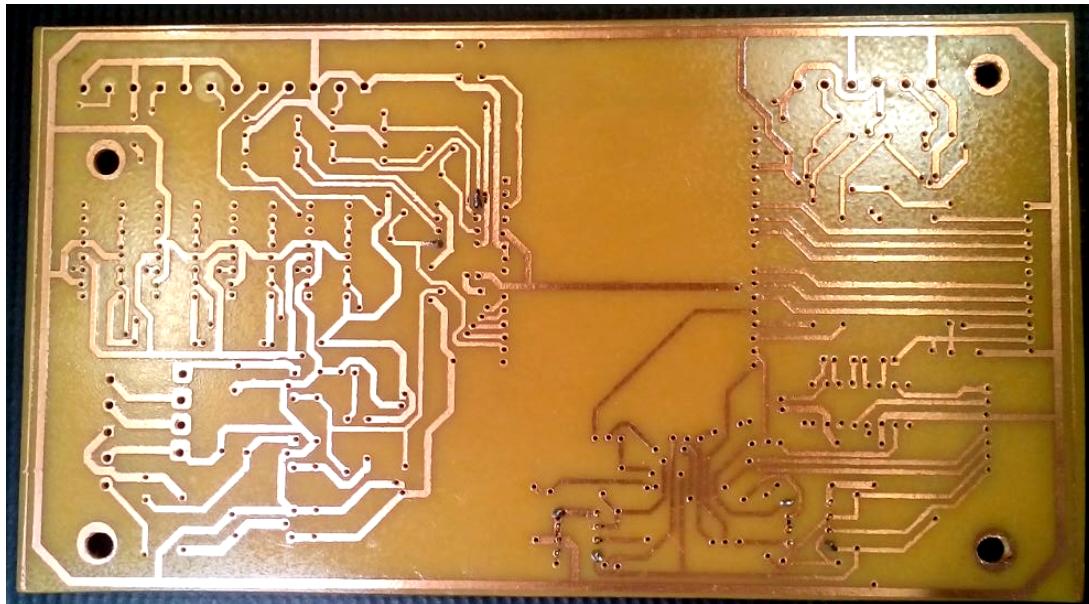


Figura 38 – Fotografia da placa de circuito impresso de aquisição de dados.

do circuito impresso são chamados de *jumpers* para conexão de trilhas que necessitam sobrepor outras trilhas no lado oposto da placa.

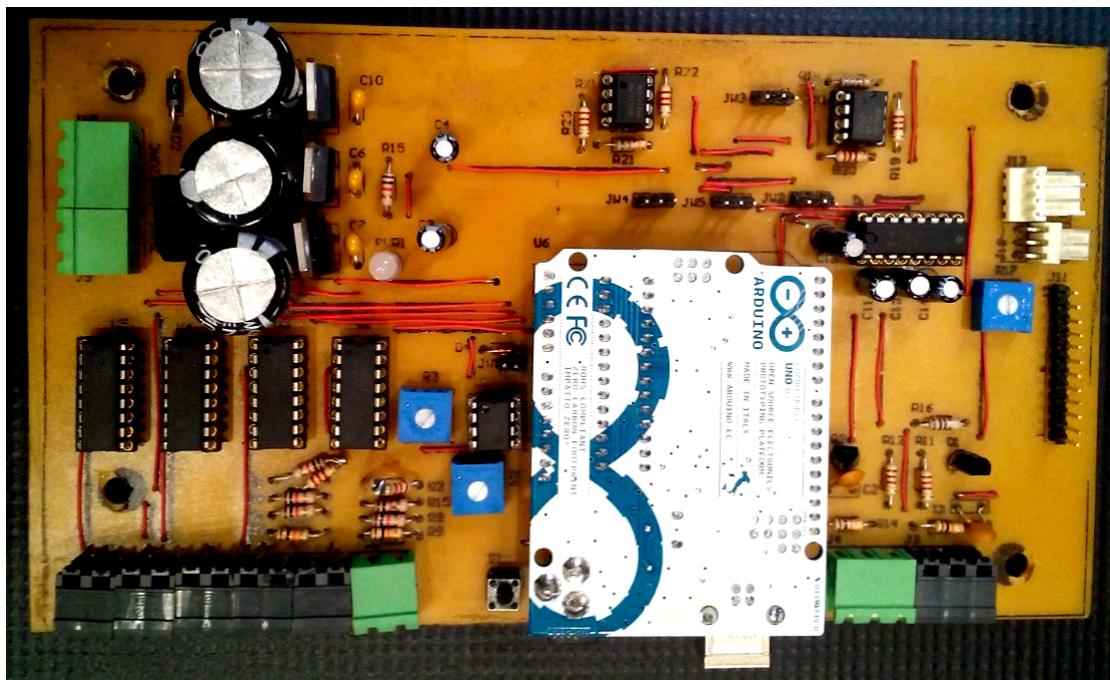


Figura 39 – Fotografia da placa de circuito impresso de aquisição de dados com componentes.

4.1.6 Firmware

O código é dividido em vários blocos de programa, como indica o diagrama da Fig.(40) e os códigos do apêndice D. Então é iniciado pelo bloco MAIN_BANCADA, onde estão incluídas as bibliotecas, declaração das variáveis do programa todo, inicialização de *thread* (ferramenta que permite que os blocos de código rodem concorrentemente), configuração inicial dos sensores, inicialização da porta serial e possui a função *loop* que é um laço “infinito”.

Os blocos FLUXO, FORCA, PRESSAO e ROTACAO possuem a mesma estrutura, onde primeiramente configuram qual função cada *thread* chamará, além do tempo de execução/reinicialização da mesma.

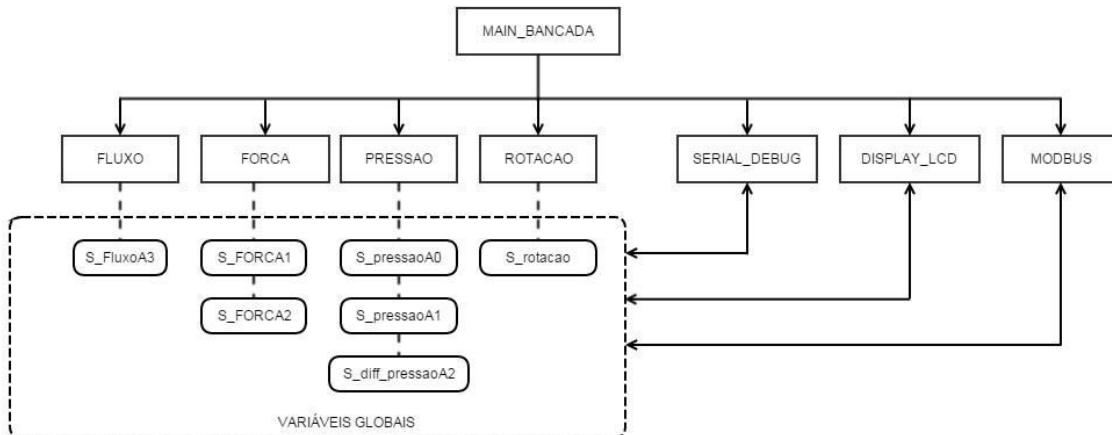


Figura 40 – Diagrama de funcionamento do *firmware*.

A função principal presente em cada bloco acima citados, exibem uma chamada do pino ao qual estão inseridos para verificação de dados digitais, além de parametrizar o valor recebido de 0 a 1023 (resultado da conversão analógico/digital) para valores mínimos e máximos que cada sensor está inserido. Além disso, cada bloco ocorre um incremento ou decremento das respectivas variáveis globais.

Os blocos SERIAL_DEBUG, DISPLAY_LCD e MODBUS, verificam os dados das variáveis globais e executam suas rotinas. O tempo de atualização desses blocos é maior que o tempo de aquisição de dados pela leitura digital dos pinos para que o tempo de aquisição dos dados seja feita antes da amostragem.

A parte do código referente à função SERIAL_DEBUG, verifica inicialmente se a macro SIMULADO ou a macro REAL foi definida para que rode a parte do código implementada para cada função. Caso definido SIMULADO, uma série de palavras, acompanhadas de seus valores serão exibidas na tela da interface de programação do Arduino, caso definido REAL, ao invés disso, os dados serão enviados para o *host* em formato he-

xadecimal através da rede serial. É possível fazer a depuração do código, além de verificar imediatamente as variáveis recebidas (valores dos sensores).

4.2 Quadros de Comando

A instrumentação realizada na bancada de ensaio de pico turbina hidráulica Indalma é dividida em dois quadros de comando. Cada quadro possui uma placa de aquisição de dados semelhante, porém com sensores diferentes, de forma a valorizar a segurança na operação, onde caso um dos quadros possua algum tipo de falha o outro permite a continuidade na recepção dos dados.

4.2.1 Quadro de Comando de Potência de Eixo

O quadro de instrumentação da potência de eixo possui uma organização funcional como é demonstrado na Fig.(41), onde a partir da interface borneira, a tensão da rede elétrica é levada até o disjuntor. Na tampa do quadro estão o comutador e uma lâmpada. O comutador consegue controlar a energização do quadro e a lâmpada indica a presença de tensão.

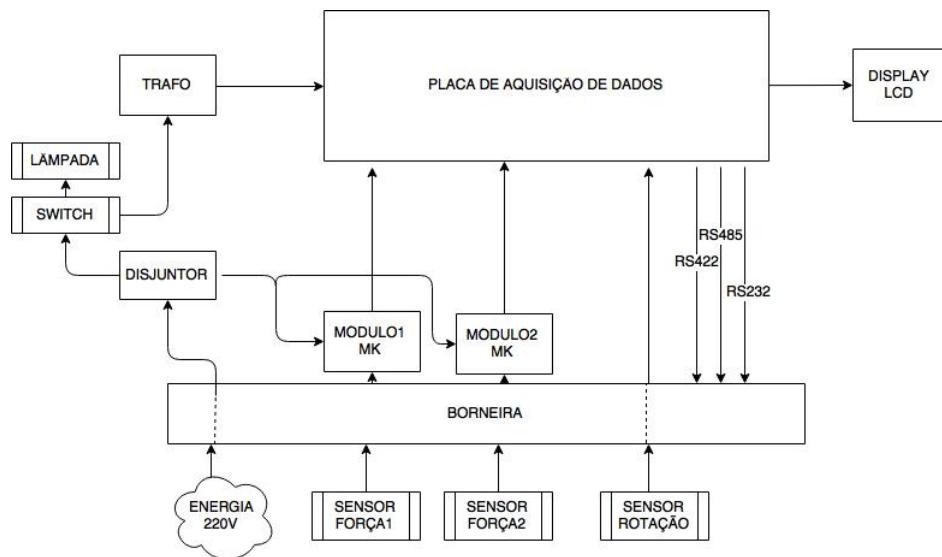


Figura 41 – Diagrama do quadro de comando de potência de eixo.

A partir do disjuntor, os módulos MK-05 também são energizados e prontos para a amplificação dos sinais vindos do *Strain Gauges*. Já o sensor de rotação liga-se diretamente à borneira e desta para a placa de aquisição de dados. E por fim um conector em barra, faz a conexão da placa com o *display LCD*, presente na tampa do quadro. O diagrama físico com as conexões mencionadas, pode ser conferido na Fig.(42) e em anexo no apêndice C, Fig.(63).

Para a simulação do quadro, Fig.(43), obtiveram-se a caracterização da placa de desenvolvimento Arduino, a validação de parte do código (aquisição de potência de eixo), e a validação dos circuitos de condicionamento de sinais para tensão de 0 a 10 V (sensores com saída de tensão) e sensores a coletor aberto (sensor de rotação).

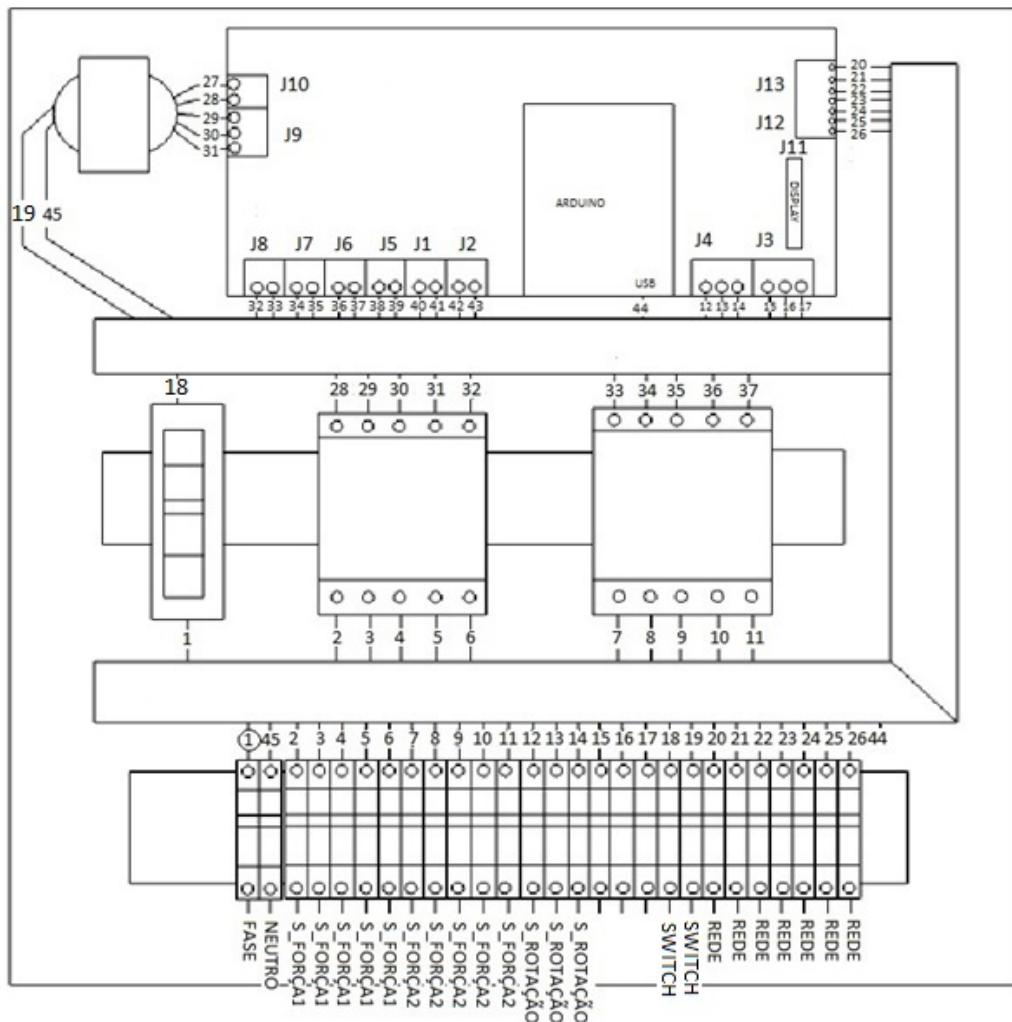


Figura 42 – Esquema físico do quadro de comando de potência de eixo.

A partir da simulação é possível ver também a ativação do *display LCD* e a exibição de valores escolhidos aleatoriamente, como por exemplo: a entrada V_{in2} exibe uma tensão contínua de 8,3 V, é dividida por 10, no divisor de tensão projetado com R5 e R6 e então amplificada 5 vezes pela topologia não inversora do amplificador operacional U1:B, então é conectado à porta A5 do Arduino. O código possui uma linha de comando no qual recebe o valor gerado pelo conversor analógico/digital do microcontrolador e parametriza para valores na faixa que se deseja, nesse caso de 0 a 20, o que representa um valor em Kilograma-força [Kgf].

O sensor de rotação também pôde ser simulado com o gerador de pulsos V_{in3} com as configurações de 50 Hz de frequência e amplitude de 12 V, então este sinal passou pelo

circuito condicionador de sinais de pulsos e fica disponível na pino 2 (pino habilitado para interrupções externas ao microcontrolador), onde o código multiplicou a frequência lida por 60 vezes, modulando a rotação para rotações por minuto (RPM).

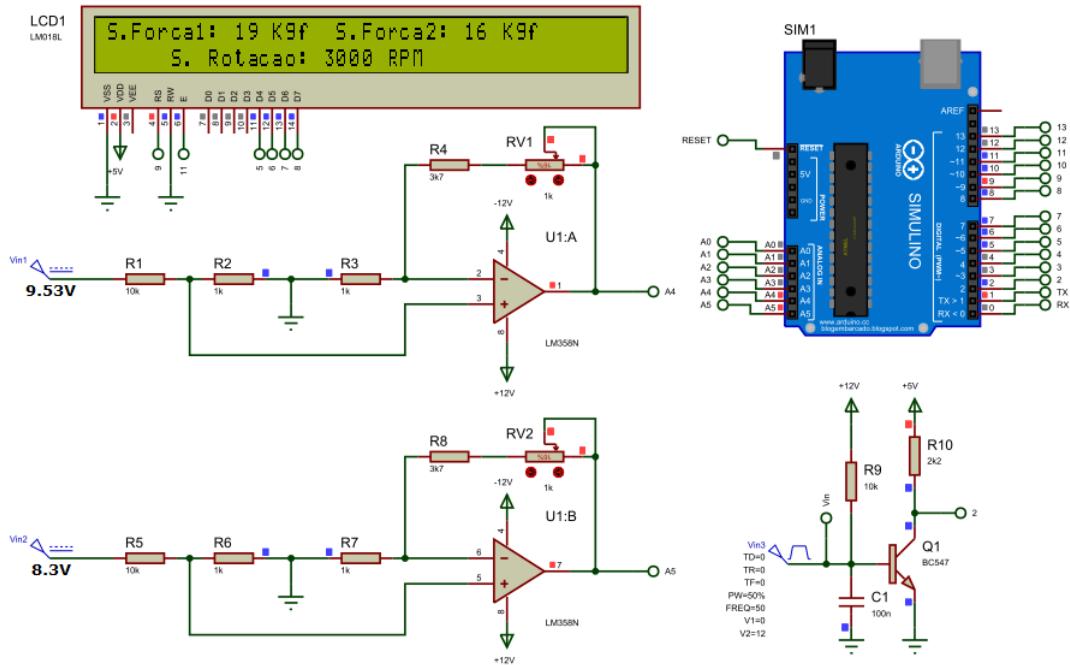


Figura 43 – Simulação do quadro de comando de potência de eixo.

4.2.2 Quadro de Comando de Potência Hidráulica

O quadro de instrumentação da potência hidráulica é capaz de processar os sensores de pressão, de fluxo na entrada da turbina e tem como resultado a potência inserida no sistema da bancada. Utilizando uma placa de aquisição de dados semelhante ao do quadro de potência de eixo, o diagrama funcional deste quadro é bastante semelhante ao do quadro anterior, com exceção dos módulos amplificadores MK-05.

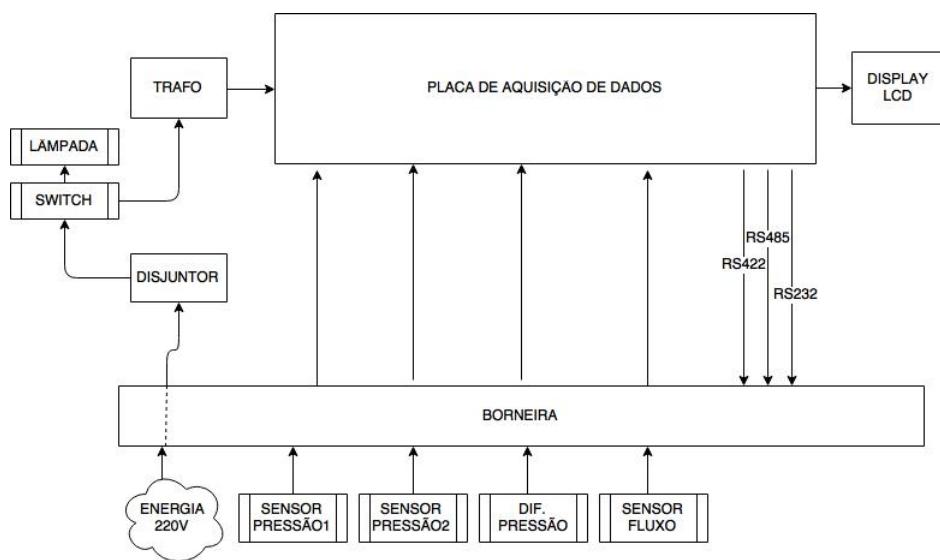


Figura 44 – Diagrama do quadro de comando de potência hidráulica.

A borneira é a interface principal do quadro com a bancada, fornecendo canal para a alimentação do disjuntor, comutador, transformador e da placa de aquisição de dados.

Tanto os sensores de pressão, quanto o sensor diferencial de pressão e o sensor de fluxo se ligam diretamente à placa de aquisição de dados, tendo tensão de alimentação e pinos de processamentos adquados.

A disposição física dos componentes do quadro de potência hidráulica pode ser vista na Fig.(45).

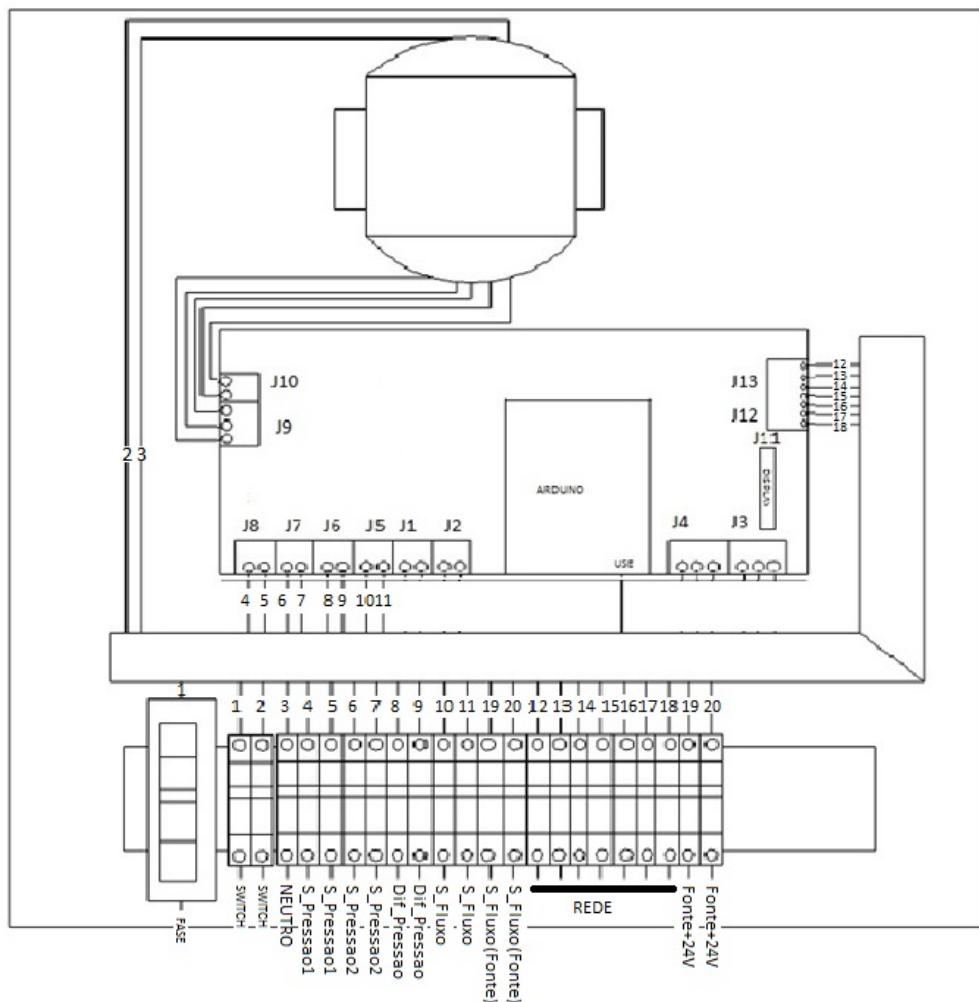


Figura 45 – Esquema físico do quadro de comando de potência hidráulica.

O simulador usado não possui o circuito integrado RCV420, com função de transformação de valores de corrente para tensão, então na simulação ilustrada pela Fig.(46) foram colocadas as respostas das saídas de tensão destes componentes em uma escala de 0 a 5 V, escolhidos valores aleatórios como 5.0, 3.21, 2.25 e 4.73.

A placa de aquisição de dados receberá quatro sensores, que possuem saída de corrente, e será possível observar os valores de cada sensor convertido para as grandezas devidas, como indica o *display* de LCD validado pela simulação.

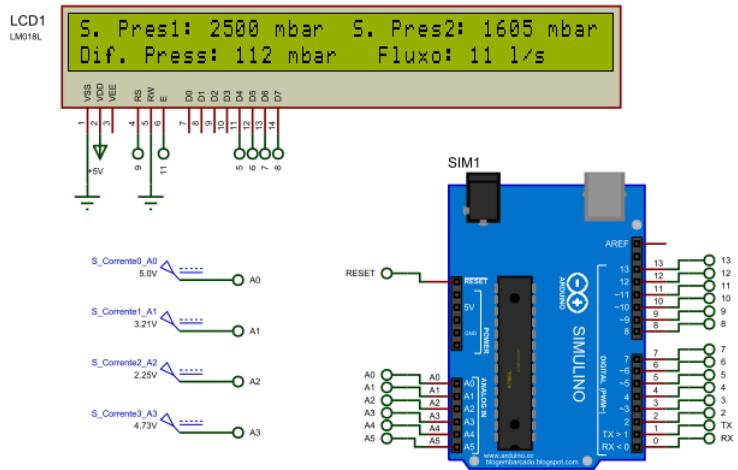


Figura 46 – Simulação do quadro de comando de potência hidráulica

Conforme projetado, os quadros de aquisição de potência de eixo e potência hidráulica foram concebidos como indicam as figuras presentes do apêndice C.

4.3 Teste do Protótipo

A fim de testar a resposta serial da placa de desenvolvimento Arduino e as entradas que comporão ambas as instrumentações para cálculo das potências de eixo e hidráulica foram inseridos em uma mesma simulação todos os exemplares dos circuitos condicionadores de sinais, além de um simulador interno do terminal serial. A resposta pode ser comprovada pela Fig.(47), onde a parte do código implementada, exibe as respostas dos vários sensores em uma única linha e repete a essa exibição a cada 1s.

Montada a estrutura inicial de um dos quadros de comando, foram testados algumas das saídas dos sensores e a comunicação serial da seguinte forma: uma bancada de equipamentos para testes foram organizados de forma que fornecessem as entradas para o circuito.

Apesar de não ser possível observar valores concretos dos dados com a Fig.(49) é possível perceber os elementos para testes como uma fonte de tensão (simulou a saída dos sensores de força) servindo como entrada para os circuitos condicionadores de tensão para células de carga, o *notebook* foi a ferramenta responsável por efetuar os códigos do microcontrolador e observar a saída serial que o próprio Arduino fornece em sua interface. O *notebook* foi conectado a um monitor externo (ao centro da figura). No outro monitor (à direita) é possível observar os dados recebidos por outro computador conectado à rede RS422 através da placa conversora WP05 (entrada do computador no padrão RS232 com conector DB9 e saída da conversora no padrão RS422 com conector RJ45) validando assim a rede RS422, embora existam as conexões físicas para a rede RS485, mas que não foram testadas.

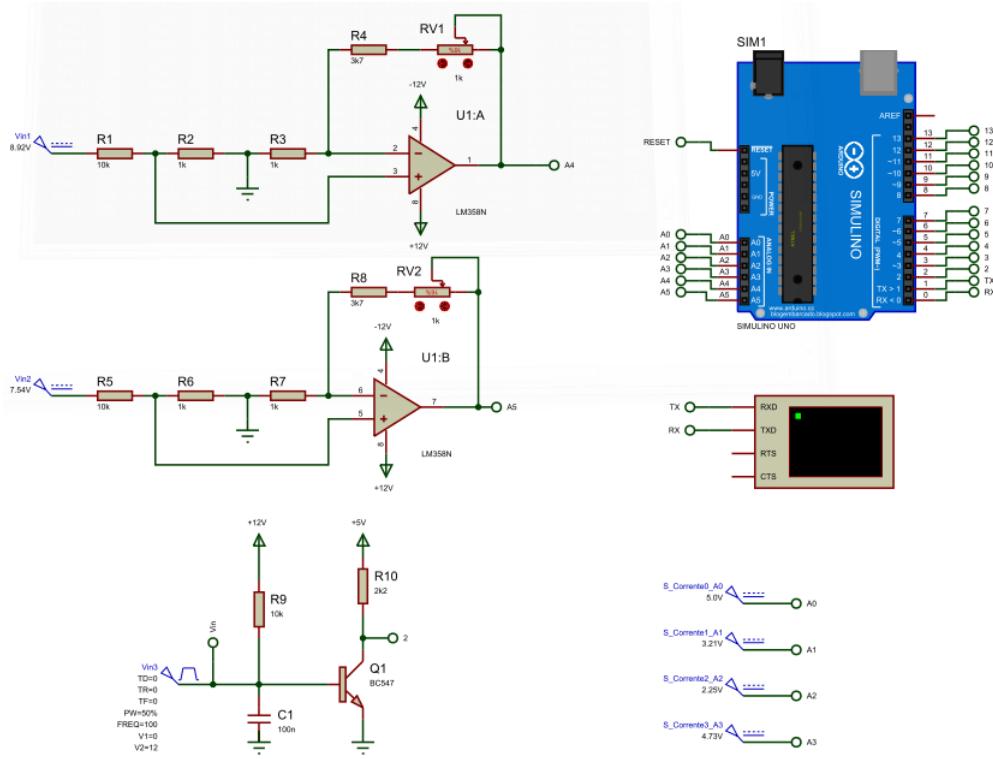


Figura 47 – Simulação virtual do protótipo

Através de um teste usando um sensor de pressão diferencial, foi possível observar uma variação em forma de corrente elétrica quando uma diferença de pressão entre os seus dois terminais de entrada é apresentada e a saída de corrente é inserida na placa para testes.

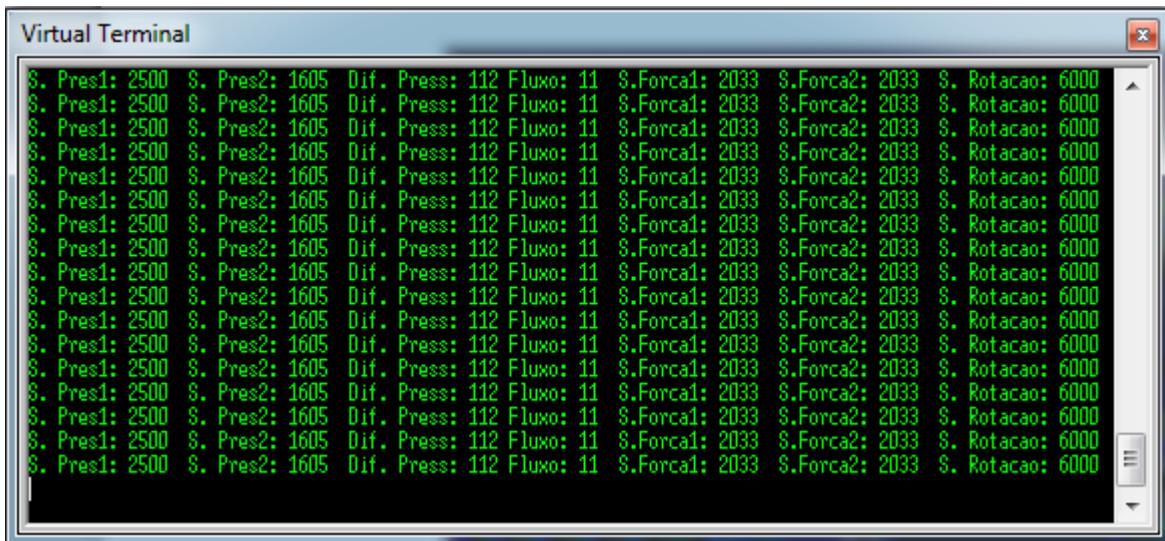
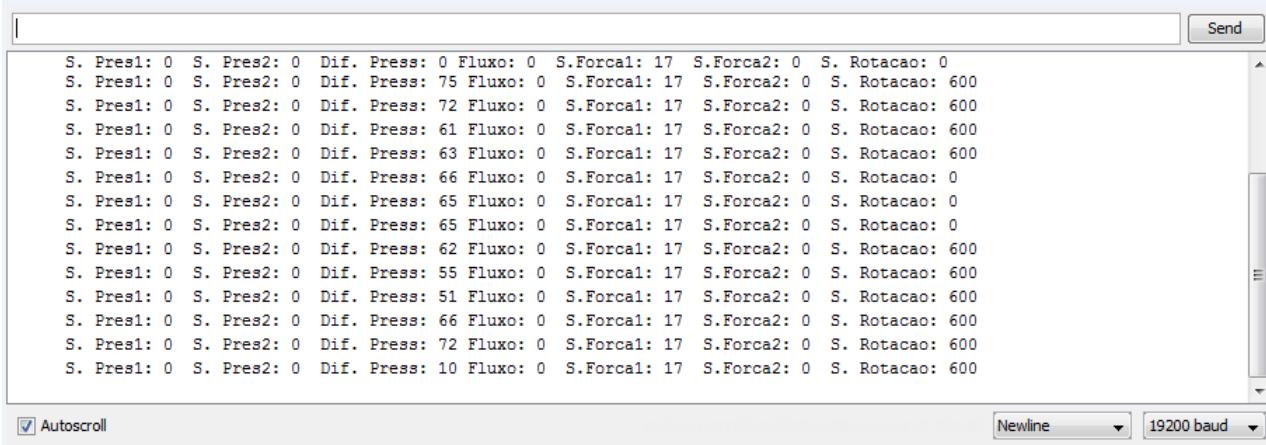


Figura 48 – Simulação virtual do protótipo

Os dados exibidos nos dois monitores podem ser conferidos na Fig.(63), onde somente o sensor diferencial de pressão, o sensor de força 1 e o sensor de rotação foram inseridos, por isso o valor zero para os demais campos.



The screenshot shows a terminal window with the following configuration at the bottom:

- Autoscroll
- Newline
- 19200 baud

The terminal window displays a series of data lines, each consisting of six fields separated by colons:

- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 0 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 0
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 75 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 72 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 61 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 63 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 66 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 0
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 65 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 0
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 65 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 0
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 62 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 55 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 51 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 66 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 72 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600
- S. Pres1: 0 S. Pres2: 0 Dif. Press: 10 Fluxo: 0 S.Forca1: 17 S.Forca2: 0 S. Rotacao: 600

Figura 49 – Reposta real do protótipo

O circuito de condicionamento de sinais para sensores de coletor aberto foi testado utilizando-se um sensor de rotação real e através da variação manual da aproximação do sensor com materiais metálicos foi gerada uma onda quadrada de frequência mensurada pelo processador.

4.4 Software

4.4.1 SCADABR

Sistemas para Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA) objetivam criar uma interface com o operador e processos diversos como máquinas industriais, controles automáticos e sensores, etc. Das funcionalidades presentes em um SCADA genérico estão:

- “Geração de gráficos e relatórios com o histórico do processo;
- Detecção de alarmes e registro de eventos em sistemas automatizados;
- Controle de processos incluindo envio remoto de parâmetros e set-points, acionamento e comando de equipamentos;
- Uso de linguagens de script para desenvolvimento de lógicas de automação (“receitas”) [SCADABR (2014)].”

O *software* adotado para o sistema supervisor proposto por este documento é o SCADABR, que segue o modelo de *software open-source*, ou seja, seu código-fonte é disponível e aberto a modificações, geração de novas distribuições e outras características de *software* livre. Utiliza também o conceito de aplicação multiplataforma, isto é, independentemente do sistema operacional instalado na máquina do usuário, o *software*

funcionará, uma vez que para acessá-lo, antes o usuário terá que manter conexão com um servidor de aplicações (sendo o Tomcat a escolha mais comum e padrão).

De forma simplificada ao executar o aplicativo, este poderá ser acessado por um *browser* de escolha do usuário, sendo os mais indicados o Firefox e o Google Chrome.

Logo ao inicializar o SCADABR, o usuário tem acesso a uma interface intuitiva onde estarão presentes barras de tarefas, ícones para visualização de gráficos, históricos, protocolos, alarmes, opções de configuração, entre outros.

Após configurado todo o protocolo de intercomunicação com o sistema a ser automatizado ou adquirido os dados, é possível criar uma interface homem-máquina utilizando o próprio navegador.

O *software* SCADABR é bem amplo e permite inclusive a criação de aplicativos personalizados em qualquer linguagem de programação moderna.

Seguindo a instalação proposta pelo documento Manual do *Software* SCADABR, presente no próprio *site* do fornecedor (<http://www.scadabr.com.br/>) tem-se as seguintes características e funcionalidades do sistema supervisório: [SCADABR (2014)]

- Menu principal: usado para se ter uma visão geral do sistema construído além de ferramentas de controle, indicativo de alarmes (ícone de uma bandeira com cor específica de acordo com a criticidade);
- Tipos de Dados: podem ser utilizados cinco tipos de dados - binários, estados múltiplos (por exemplo ligado/desligado/desativado), numéricos, alfanuméricos e imagens;
- Data Sources: são a parte fundamental da aplicação, sendo o local de recepção dos dados, podendo ser virtualmente qualquer coisa suportada pelo protocolo de comunicação, como por exemplo até mesmo dados randômicos;
- *Data points*: “é a coleção de valores históricos associados. [SCADABR (2014)]”;
- A leitura de valores de um sensor específico pode ser um *datapoint* para a tomada de uma decisão de acionamento, por exemplo;
- Monitoramento: pode ser feito observando a criação de listas dinâmicas de pontos e seus respectivos valores e dados complementares de tempo ou também é possível criar representações gráficas como imagens animadas, gráficos dinâmicos entre outros. Uma curiosidade é que tais representações podem estar visíveis para *web sites* públicos caso o usuário defina assim;

- Controle: está relacionado a uma ação do sistema SCADA para o sistema externo, como tomada de decisões. Um exemplo pode ser a configuração de um termostato ou um interruptor remoto para acionamento de um dado dispositivo;
- Eventos: uma vez definido um limiar ou espera-se a ação de um dispositivo e tal ação ocorre, isto é um evento ocorre. Tem-se como exemplo detectores de valor, eventos agendados, resultado da relação de multipontos lógicos, entre outros;
- Sons de alarmes: o SCADABR pode emitir sons configuráveis mas principalmente sons de alarmes urgentes, críticos e de risco de vida;
- Gráficos: o *software* possui uma pequena biblioteca com *design* de modelos de gráficos sendo possível alterar o nome, o tamanho, a altura e a posição dos títulos dos eixos;
- Ícones da Aplicação:

Tabela 8 – Ícones de aplicação.

Ícone	Função	Ícone	Função
	<i>Data Source</i>		<i>Data Point</i>
	Gráfico		<i>Set Point</i>
	<i>Watch List</i>		Representação Gráfica
	Atualizar		Detector de Valor
	Evento Composto		Evento Agendado
	Tratadores de Eventos		Alarme
	Usuário		Relatório
	Listas de Envio		<i>Publisher</i>
	Aviso		<i>Logout</i>

- Relatórios: é possível a geração de relatórios compatíveis com os principais programas voltados a relatórios customizados. Ao configurar o nome, o modelo de relatório e a posição dos dados, o relatório é iniciado ou pode ser agendado para uma data futura, podendo, após concluir totalmente ou parcialmente, ser enviado para um correio eletrônico de escolha do usuário.

4.4.2 Interface do Sistema Supervisório

Com base na ilustração feita no trabalho Oliveira (2014), foi feito a inserção de *datasources* e *datapoints* virtuais, ícones de botões, gráficos e *displays* para que se tivesse

uma interface lúdica, apresentando a usabilidade do software SCADABR como gerente do sistema supervisório.

A Fig.(50) a seguir representa o que foi escrito. Observa-se que a numeração, que não estará presente de fato, foi inserida para que se pudesse analisar os principais pontos presentes na interface, como a legenda indica:

1. Visor rotações motor-bomba;
2. Botão liga/desliga moto-bomba;
3. Visor fluxo;
4. Visor pressão entrada ;
5. Visor força 1;
6. Visor força 2;
7. Visor pressão saída;
8. Visor rotações;
9. Gráfico potência de hidráulica;
10. Gráfico potência de eixo;
11. Gráfico rendimento;
12. Gráfico rendimento %;

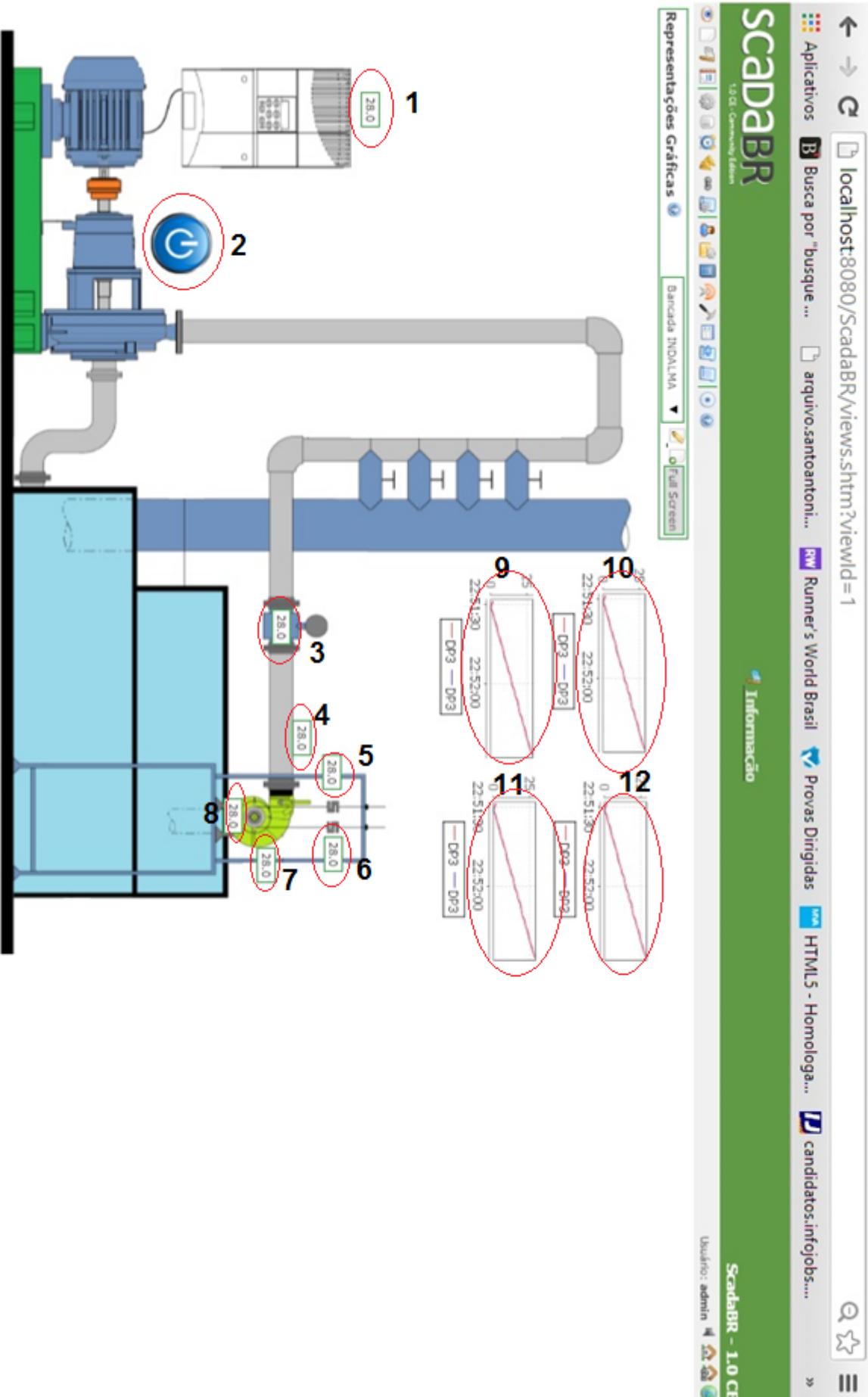


Figura 50 – Interface Sistema Supervisório.

5 Conclusões

Ao final deste trabalho foi gerado um modelo aplicável de sistema supervisório para a bancada de ensaios de pico turbina hidráulica com a turbina de modelo Indalma instalada. O modelo proposto foi ilustrado a partir de diagramas de funcionamento, uma vez que se propôs a validação deste documento como sendo parte interessante da documentação da própria bancada.

Foram geradas especificações de toda a instrumentação da bancada a partir de ferramentas de desenvolvimento de produto como QFD e FMEA, desde as descrições dos sensores, da formatação da rede e comunicação a ser utilizada e da interface entre usuário e o sistema, através do *software* SCADABR.

Seguindo a lógica sugerida na metodologia, foi levantado um embasamento teórico sobre a utilização física dos sensores e seu enquadramento elétrico através do condicionamento de sinais como pôde ser verificado através dos esquemáticos dos circuitos propostos.

Chegou-se a um protótipo implementável da placa genérica de aquisição de dados, onde as funcionalidades de condicionamento de sinais de corrente, condicionamento de sinais de tensão, condicionamento de sinais de sensores a coletor aberto, processamento de dados através da placa de desenvolvimento Arduino, comunicação serial RS232, RS422 e RS485, exibição no *display*, pulso foram validados a partir de simulações e testes físicos simples utilizando-se de materiais laboratoriais.

Foram montados os quadros de comando para cálculo de potência de eixo e potência hidráulica com uma estrutura inicialmente organizada e os mesmos já se encontram instalados no laboratório e podem ser utilizados.

Foi montada uma estrutura de rede com cabeamento à par trançado, fixação das placas WP05, fixação dos quadros de comando e suas placas internas, assim como a fiação dos sensores e a devida conexão com os quadros, instalação do *software* SCADABR e a geração de uma interface inicial, porém não validado protocolo de comunicação *modbus* serial e as funcionalidade do *software*, ou seja, a estrutura mecânica e de *hardware/firmware* foi concebida e testada, faltando apenas a estrutura de *software* e validação do protocolo *modbus* via SCADABR.

5.1 Trabalhos Futuros

- Implementação do protocolo de comunicação serial *Modbus RTU* entre Arduino, SCADABR e inversor de frequência;
- Configuração e testes da interface SCADABR e sua integração com os dispositivos de *hardware*;
- Reestruturação do sistema elétrico como por exemplo a instalação de tubulações;
- Conexão do inversor de frequência à rede serial e testes de funcionamento;
- Adequação dos quadros aos padrões industriais visando à comercialização do produto;
- Fabricação industrial da placa de aquisição de dados;
- Geração de manuais de utilização e manutenção.

Referências

- BAXTER, M. Projeto de produto: guia prático para o desenvolvimento de novos produtos. São Paulo.: Edgard Blücher,, 1998. Citado 2 vezes nas páginas [51](#) e [65](#).
- CASSIOLATO, C. Medição de vazão. 2004. Citado na página [44](#).
- CASTELETTI, L. F. *Instrumentação Industrial*. 2014. Disponível em: <<http://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2010/09/instrumentacao.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas [37](#) e [38](#).
- CONTECH. Medidor de vazão eletromagnético. 2014. Citado na página [45](#).
- ELECTRIC, S. Redes de comunicação industrial. 2007. Citado 5 vezes nas páginas [17](#), [35](#), [50](#), [51](#) e [76](#).
- ELS, R. H. v. Sustentabilidade de projetos de implementação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na amazônia: Casos no suriname e amapá. 2010. Citado na página [27](#).
- ELS, R. H. van et al. Eletrificação rural em santarém: contribuição das micro centrais hidrelétricas. *Rev Bras Energia*, v. 16, n. 2, p. 35–46, 2010. Citado na página [27](#).
- FREUND, G. P. Redes de computadores i: livro didático. Palhoça.: UnisulVirtual,, 2008. Citado na página [50](#).
- GOHN, M. Scada - sistema supervisório, a importância da tecnologia da informação na logística integrada. 2006. Citado 2 vezes nas páginas [34](#) e [36](#).
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Fundamentos de física. In: *Fundamentos de Física*. [S.l.]: Compañía Editorial Continental, 1997. Citado na página [38](#).
- LOPES, M.; MOREIRA, A. Importância dos sistemas supervisórios no controle de processos industriais. *Monografia–Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto*, 2009. Citado na página [35](#).
- MENDES, M. Comunicação fabril e o projeto map/top. *Editora Kapeluz, Argentina*, 1989. Citado na página [47](#).
- OLIVEIRA, D. d. S. Avaliação experimental em modelo reduzido da turbina hidráulica indalma. 2014. Citado 6 vezes nas páginas [15](#), [28](#), [36](#), [44](#), [60](#) e [90](#).
- OMRON. *Automação Industrial - Sensores Indutivos*. 2014. Disponível em: <http://industrial.omron.pt/pt/products/catalogue/sensing/inductive_sensors/default.html>. Citado na página [41](#).
- SANTANDER, O. L. S. Montagem e instrumentação de uma bancada para turbina hidráulica. 2015. Citado na página [27](#).
- SCADABR. *SCADABR 0.7, Sistema Open-Source para Supervisão e Controle*. 2014. Disponível em: <<http://ufpr.dl.sourceforge.net/project/scadabr/Software/Docs/Manual%20ScadaBR.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas [88](#) e [89](#).

STANEK, J.; REHAK, J.; HLAVAC, J. Introduction to rs 422 & rs 485. Disponível na Internet: <http://www.hwserver.com/docs/rs485.html>. Último acesso em Setembro de, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 49.

TANENBAUM, A. S. Computer networks 4th edition . ed: Prentice Hall, 2003. Citado na página 46.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. d. Sensores industriais—fundamentos e aplicações. São Paulo, v. 3, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 34, 39 e 40.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros. [S.l.: s.n.], 1995. Citado na página 41.

UBUNTUORG. Getting Started with Ubuntu 14.04. 2014. Disponível em: <<http://ubuntu-manual.org/>>. Citado na página 53.

WHITE, F. M. Mecânica de fluidos. Madrid.: McGraw-Hill, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

ZON, A.; BROZEGUINI, C. H. Apostila Linux Básico. 2014. Disponível em: <http://www.linuxsocial.com/pdf/apostila_linux_basico_ncd_v1.pdf>. Citado na página 52.

Apêndices

APÊNDICE A – Sensores da Instrumentação

Este tópico abordará as especificações dos sensores presentes na bancada com o intuito de documentação e caracterização completa da solução do sistema supervisório.

- Especificações mais relevantes da solução do sensor de pressão:



Figura 51 – Sensor de pressão WIKA.

- Fabricante: WIKA;
- Modelo: A-10;
- Faixa de operação de 0 a 2,5 bar = 25,49 mca (metros de coluna d'água);
- Não-linearidade de 0,25 a 0,5 %;
- Saída de 4 a 20 mA (2 fios);
- Padrão M12 = 8 mm de diâmetro;
- Deriva com temperatura de 1 % na faixa de 0 a 80°C;
- Tempo de ligação < 15 ms;
- Tempo de estabilização < 4 ms;
- Tempo total para primeira amostragem < 20 ms;
- Proteção contra curto-circuito e inversão de polarização;
- Demais características relevantes vide manual.

- Especificações mais relevantes da solução célula de carga:



Figura 52 – Célula de carga MK.

- Fabricante: MK Controle e Instrumentação;
- Modelo: CSAZL com capacidade de 5 kgf;
- Sensibilidade nominal de $2 \pm 0,02 \frac{mV}{V}$;
- Deriva com a temperatura de 0,02 %;
- Temperatura de operação de $-20^{\circ}C$ a $55^{\circ}C$;
- Impedância de saída de $350 \pm 3 \Omega$;
- Tensão de excitação de 9 a 12 VDC;
- Não-linearidade de 0,03 %;
- Sobrecarga admissível de 150 %;
- Material liga de alumínio;
- Demais características relevantes vide manual.

- Especificações mais relevantes da solução do sensor de rotação:



Figura 53 – Sensor de rotação BHS.

- Fabricante: BHS;
 - Modelo: LM8-3002 NA;
 - Metais detectados = ferro, aço, inox, alumínio e cobre;
 - Frequência de comutação de 500 Hz = 30000 rpm;
 - 3 fios NA (Normalmente Aberto);
 - Alimentação 6 a 36 VDC;
 - Corrente de consumo máximo de 10 mA;
 - Queda de tensão no sensor de < 3 V;
 - Modelo tubular;
 - Invólucro metálico;
 - Cabo de 1,5 mts;
 - Não-faceada;
 - Distância sensorial nominal de 2 mm;
 - Padrão M12 = diâmetro de 8 mm;
 - Demais características relevantes vide manual.
- Especificações mais relevantes da solução do transdutor de fluxo:



Figura 54 – Transdutor de Fluxo Contech.

- Fabricante: Contech;
- Modelo: CHHD 4”;
- Máxima velocidade de fluido de 15 m/s (vazão volumétrica de $120 \frac{l}{s}$);
- Alimentação de 18 a 36 VDC ou 85 a 265 VAC (45/63 Hz);
- Consumo < 20 W;
- Saída de corrente de 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA;

- Saída de frequência de 1 a 5 kHz;
 - Temperatura de operação de $-10^{\circ}C$ a $60^{\circ}C$;
 - Alarme quando tubo sem fluido ou taxa de fluxo excedente o limite;
 - Interface RS232, RS485;
 - Proteção contra raios;
 - *Display* frontal;
 - Demais características relevantes vide manual.
- Especificações mais relevantes da solução do protocolo de comunicação:
 - Protocolo *ModBus* Serial RTU;
 - Possui sistema mestre-escravo ou cliente-servidor;
 - Trabalha na camada de aplicação e interagem bem com as interfaces RS232, RS485 e *Ethernet*;
 - Velocidade de comunicação variável sendo usual até 20000 bps (bits por segundo);
 - Possui maturidade e é grandemente utilizado na indústria atual;
 - Mensagens trafegadas são de 1 *byte* divididos em 4 *bits* de caracteres hexadecimais incentivando a rapidez na transmissão;
 - Tamanho máximo de 15 m do cabo serial RS232;
 - Tamanho máximo de 300 m do cabo serial RS485;
 - Checagem de erro por paridade ou CRC (Soma dos bits enviados);
 - Demais características relevantes serão abordadas gradativamente ao longo do documento.
 - Especificações mais relevantes da solução do microcontrolador - arduino UNO



Figura 55 – Face superior e inferior do arduino UNO.

- Microcontrolador ATmega 16 μ 2P - arduino UNO;
- Baixo consumo de energia elétrica;
- Alimentação 5 V;
- Leitura de tensão máxima 5 V;
- Faixa de temperatura de -40°C a 85°C;
- Velocidade de processamento de 0 a 20 MHz;
- 14 portas digitais I/O programáveis;
- 12 canais de 10 bits conversor analógico/digital (ADC);
- 32 kB de memória de programa (sendo 4 kB para uso do *bootloader - firmware* para identificação das bibliotecas do arduino);
- 1 kB de memória EEPROM;
- Velocidade do *clock* de 16 MHz;
- Interface USB;
- Demais características relevantes vide *datasheet* do componente.

APÊNDICE B – Esquemático de Circuitos

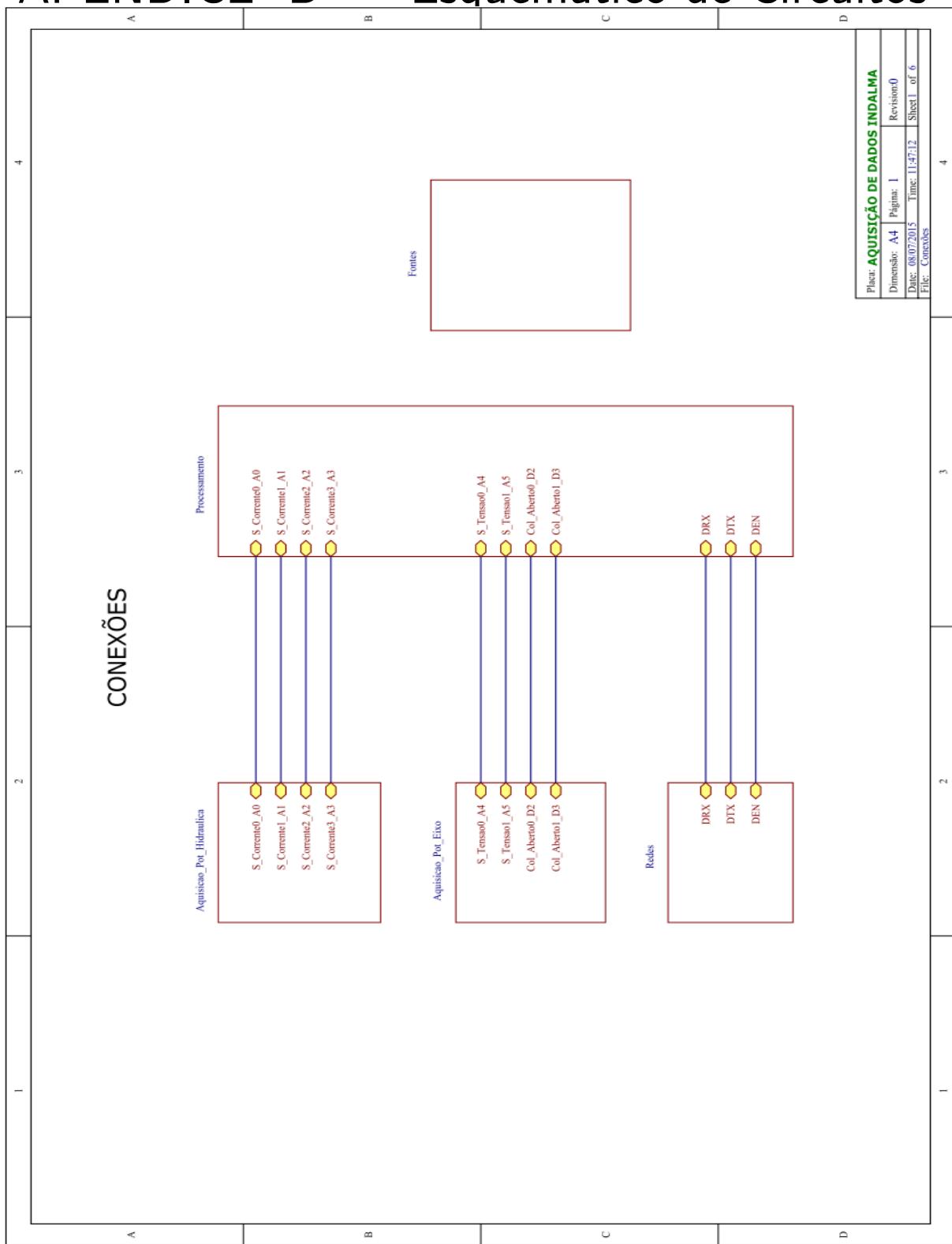


Figura 56 – Diagrama de conexões dos blocos funcionais da placa.

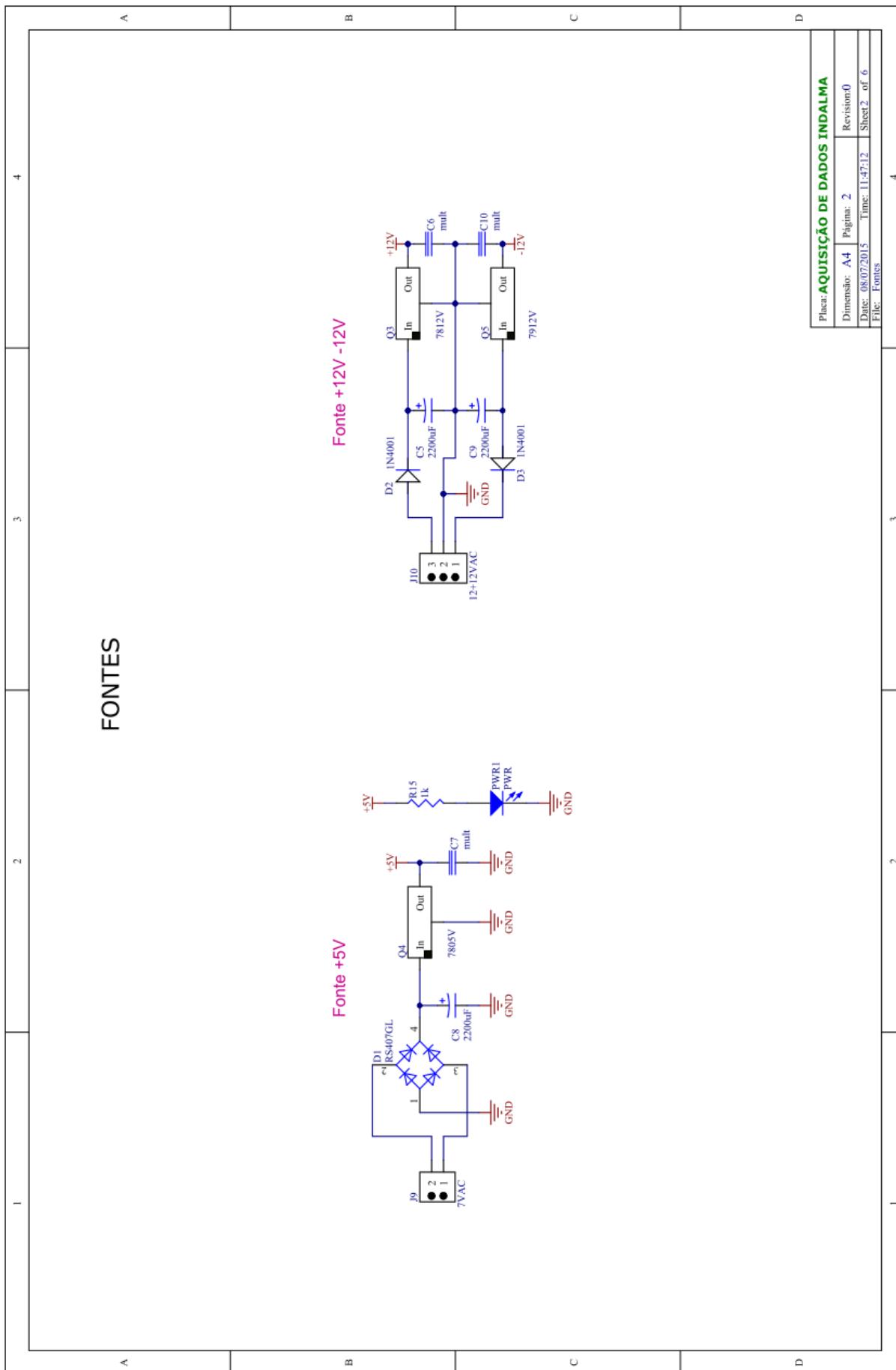


Figura 57 – Esquemático das fontes de tensão.

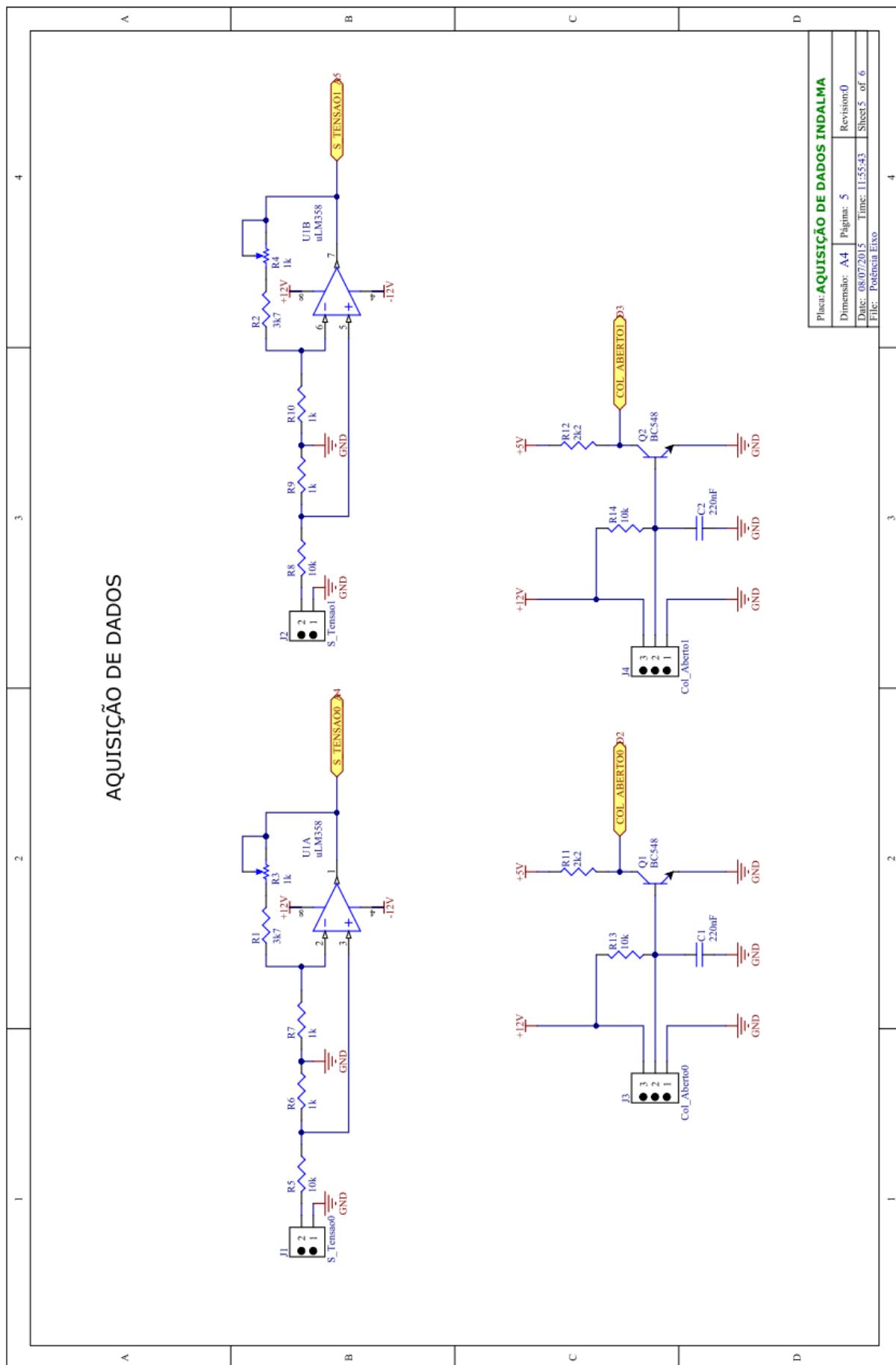


Figura 58 – Esquemático dos circuitos de condicionamento para aquisição de potência de eixo.

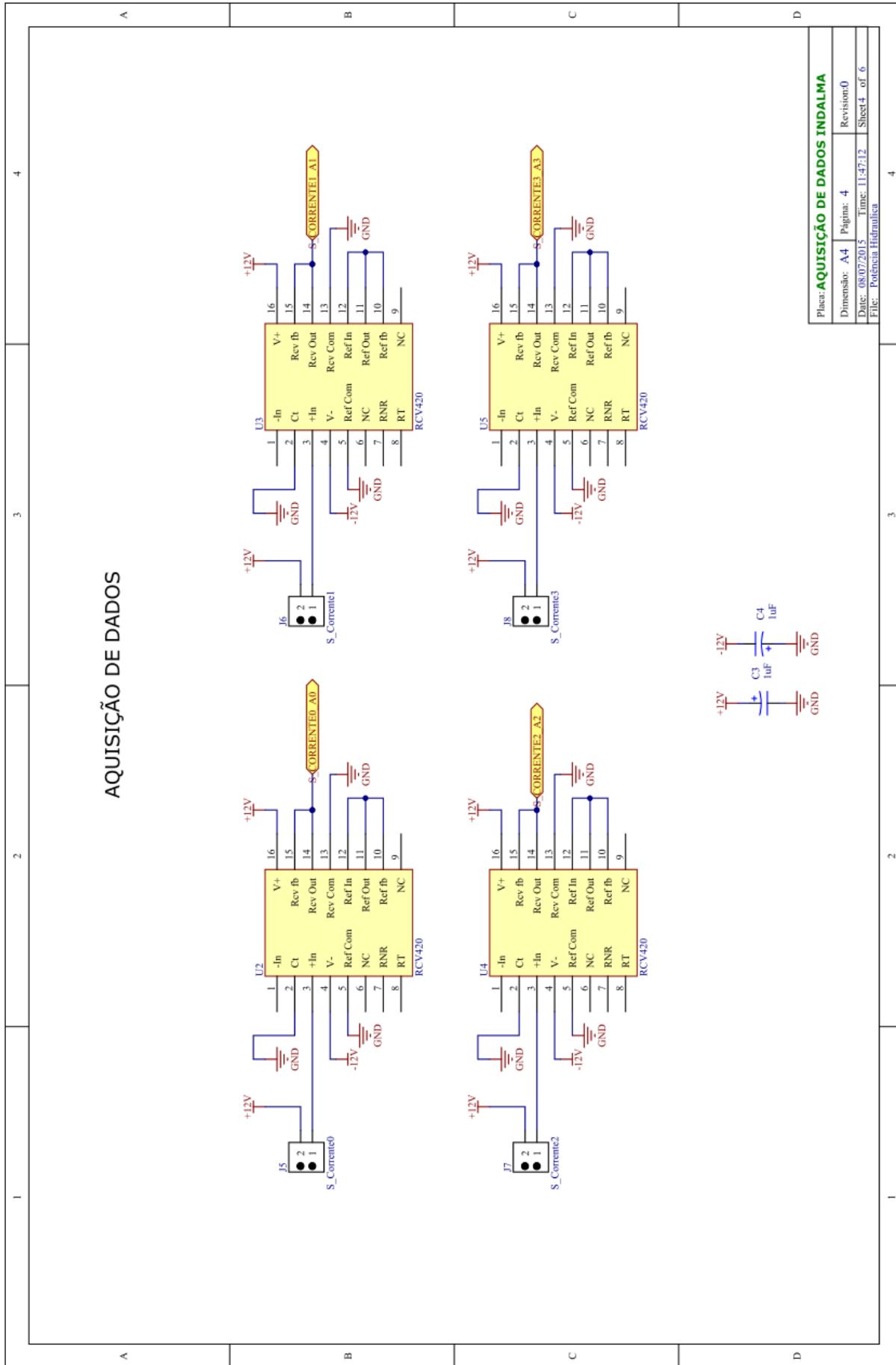


Figura 59 – Esquemático dos circuitos de condicionamento para aquisição de potência hidráulica.

Placa: AQUISIÇÃO DE DADOS INDALMA			
Dimensão: A4	Página: 4	Revision: 0	
Date: 08/07/2015	Time: 11:47:12	Sheet 4 of 6	
File: Potencia_Hidraulica			

4

4

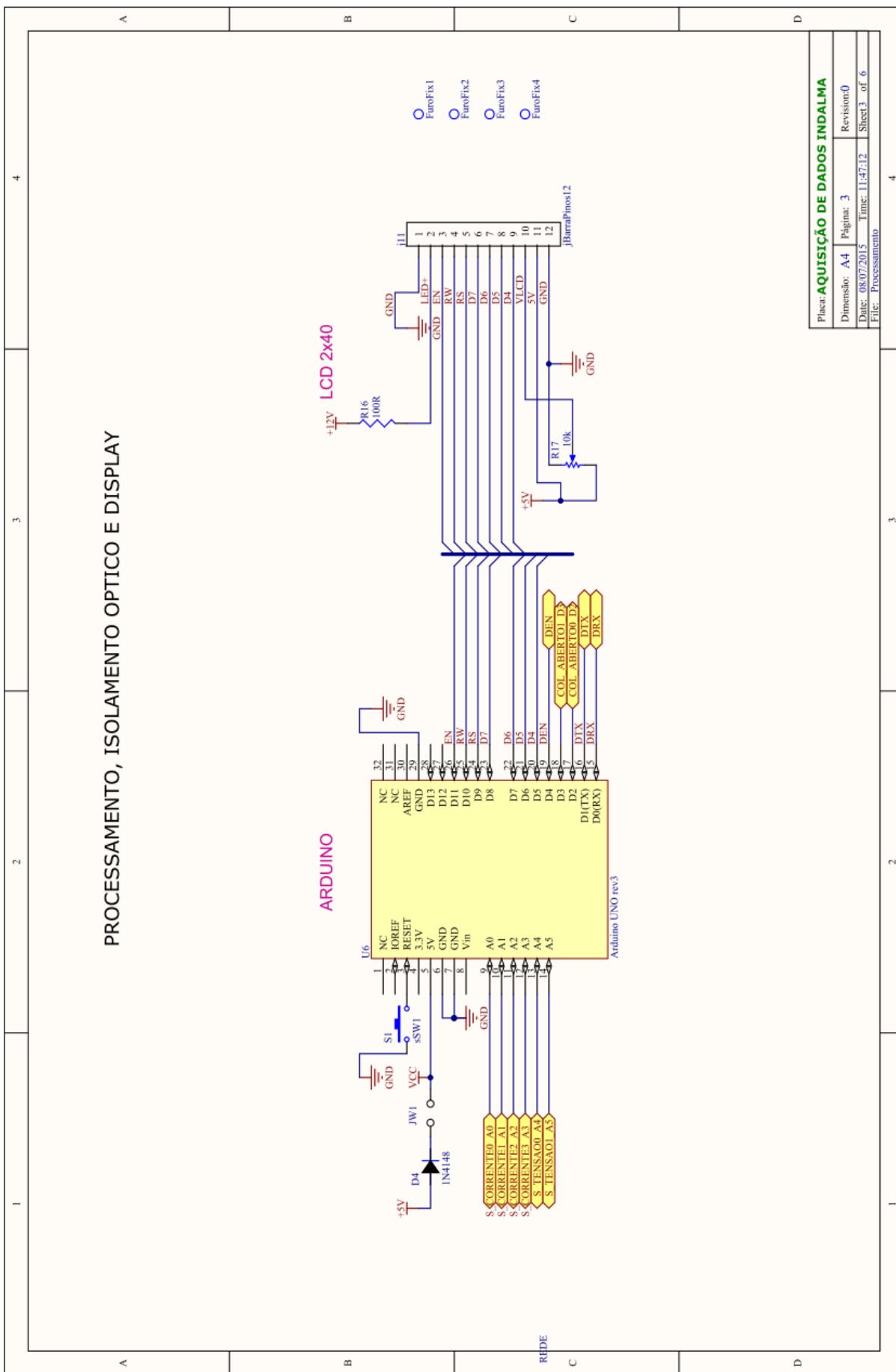


Figura 60 – Esquemático do processamento e conexões para o *display*.

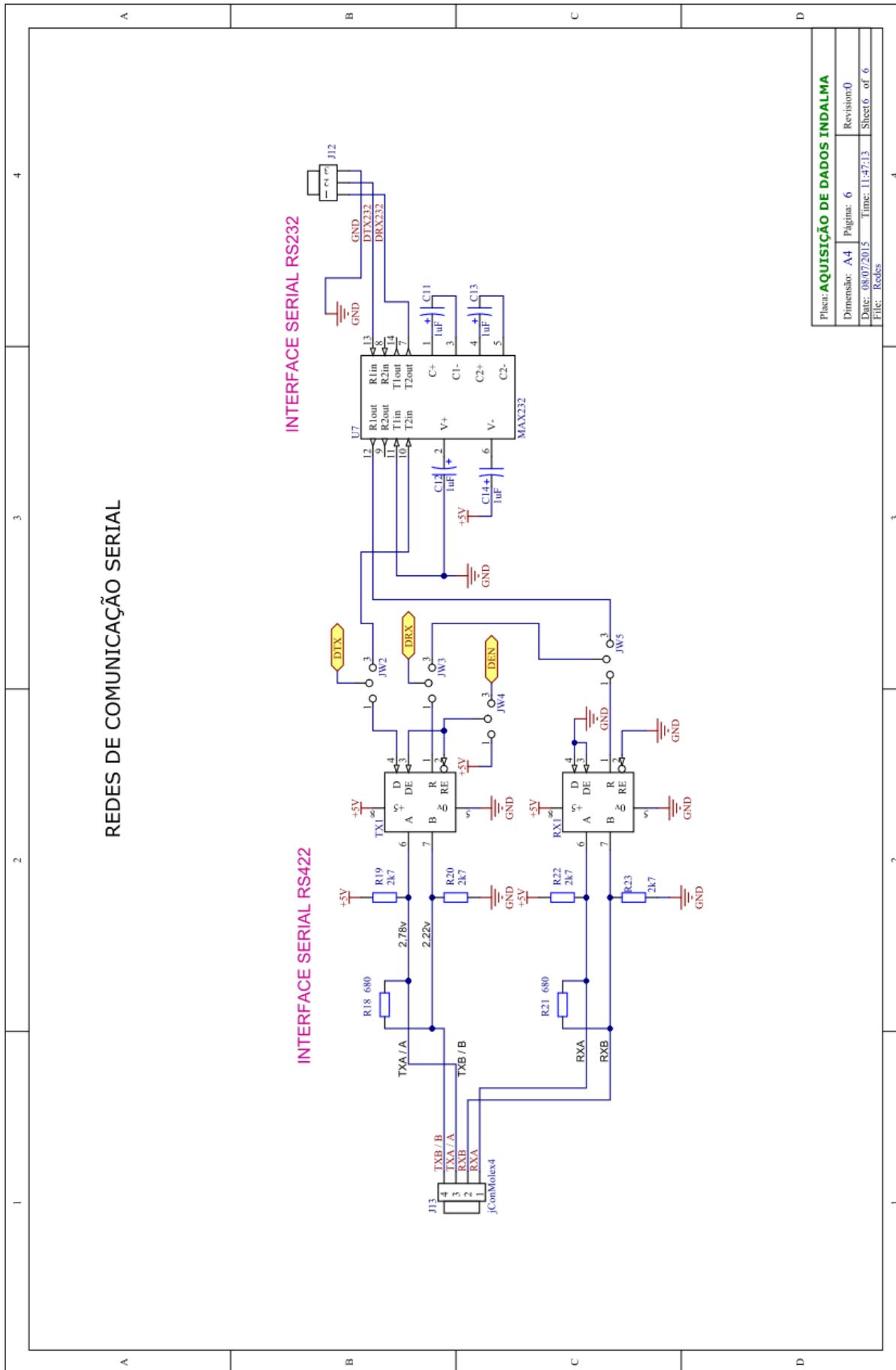


Figura 61 – Esquemático das redes de comunicação usadas na placa.

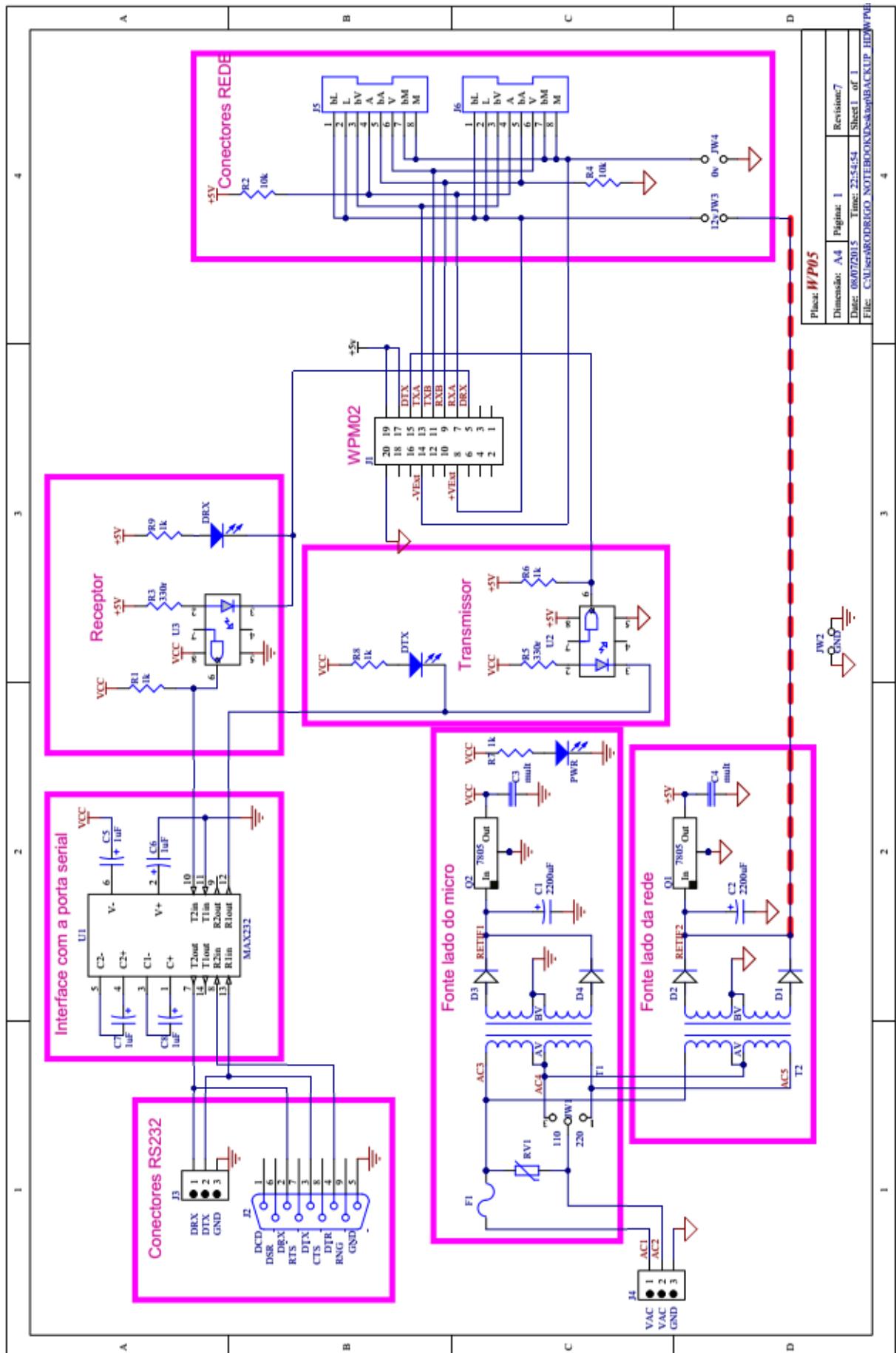


Figura 62 – Esquemático da placa WP05.

APÊNDICE C – Fotografias de testes

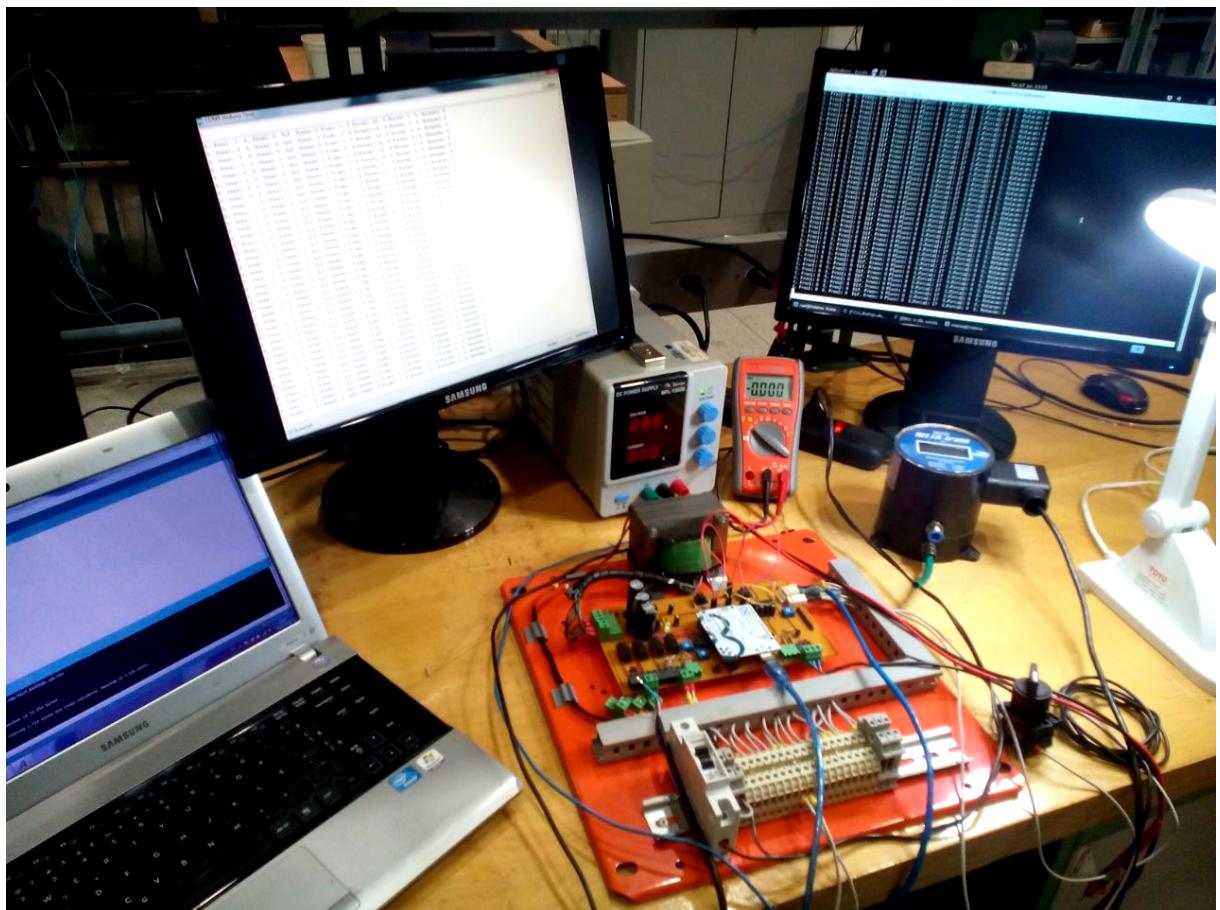


Figura 63 – Bancada usada para testes.

APÊNDICE D – Códigos

D.1 Código Principal

```
//////////////////////////////  

// UNIVERSIDADE DE BRASILIA  FACULDADE UNB GAMA //  

// ALUNO: RODRIGO DE OLIVEIRA CALIXTO //  

// PROFESSOR: RUDI HENRI VAN ELS //  

// TRABALHO DE CONCLUSAO DE CURSO 2 //  

//////////////////////////////  

/*          BANCADA DE ENSAIO DE PICO TURBINA HIDRAULICA INDALMA  

   CODIGO PRINCIPAL  

*/  

// Inclusao de bibliotecas  

#include <Thread.h>  

#include <ThreadController.h>  

// Declaracao de variaveis globais  

long S_FORCA1 = 0, S_FORCA2 = 0, pulsos = 0, S_rotacao = 0,  

S_pressaoA0 = 0, S_pressaoA1 = 0, S_diff_pressaoA2 = 0, S_FluxoA3 = 0;  

// Thread controladora das demais Threads dos sensores  

ThreadController cpu = ThreadController();  

// Thread para recolher dados de cada sensor da bancada  

Thread forca1 = Thread();  

Thread forca2 = Thread();  

Thread rotacao = Thread();  

Thread pressao1 = Thread();  

Thread pressao2 = Thread();  

Thread dif_pressao = Thread();  

Thread fluxo = Thread();  

// Mostra valores na interface serial  

Thread exibe_serial = Thread();  

// Thread para exibicao no display LCD  

Thread exibe_display = Thread();  

// Funcao de configuracao geral  

void setup()  

{  

    Serial.begin(19200); // Configura baud rate da porta serial de 19200  

    // Funcoes de configuracao  

    setup_display();  

    setup_forca();  

    setup_rotacao();  

    setup_pressao();  

    setup_fluxo();  

    setup_serial();  

    // Adicionando Threads ao controlador  

    cpu.add(&forca1); // & para passar o ponteiro para o controle_sensores
```

```

cpu.add(&forca2);
cpu.add(&rotacao);
cpu.add(&pressao1);
cpu.add(&pressao2);
cpu.add(&dif_pressao);
cpu.add(&fluxo);

cpu.add(&exibe_display);
cpu.add(&exibe_serial);

delay(500);
}

void loop()
{
    cpu.run(); // Inicia as Threads
}

```

D.1.1 Display LCD

```

//#define POTENCIA_EIXO          // Macro para habilitacao das funcoes do
                                // display para quadro de potencia de eixo

#define POTENCIA_HIDRAULICA      // Macro para habilitacao das funcoes do
                                // display para quadro de potencia de eixo

// Inclusao de bibliotecas:
#include <LiquidCrystal.h>

// Inicializacao da biblioteca com os pinos do display
LiquidCrystal lcd(9, 11, 5, 6, 7, 8);
//LiquidCrystal lcd(RS, EN, D4, D5, D6, D7)

/* PINAGEM DO CIRCUITO:
 * LCD RS pin to digital pin 9
 * LCD Enable pin to digital pin 11
 * LCD D4 pin to digital pin 5
 * LCD D5 pin to digital pin 6
 * LCD D6 pin to digital pin 7
 * LCD D7 pin to digital pin 8
 * LCD R/W pin to ground
 * LCD VSS pin to ground
 * LCD VCC pin to 5V
 * 10K resistor:
 * ends to +5V and ground
 * wiper to LCD VO pin (pin 3)
 */
void display_POT_HIDRAULICA()
{
    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("S. Pres1: ");
    lcd.print(S_pressaoA0);
    lcd.print(" mbar ");

    lcd.print("S. Pres2: ");

```

```
lcd.print(S_pressaoA1);
lcd.print(" mbar ");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Dif. Press: ");
lcd.print(S_diff_pressaoA2);
lcd.print(" mbar ");

lcd.print(" Fluxo: ");
lcd.print(S_FluxoA3);
lcd.print(" l/s ");
}

void display_POT_EIXO()
{
    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("S.Forcal: ");
    lcd.print(S_FORCAL/1000);
    lcd.print(" Kgf ");

    lcd.print("S.Forca2: ");
    lcd.print(S_FORCA2/1000);
    lcd.print(" Kgf ");

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" S. Rotacao: ");
    lcd.print(S_rotacao);
    lcd.print(" RPM ");
    lcd.print(" ");
}

void display_LCD()
{
    #ifdef POTENCIA_EIXO
        // Posiciona o cursor para escrita na 2a linha e 6a coluna do display
        lcd.setCursor(5, 1);
        // Imprime texto default do LCD linha 2
        lcd.print("Aquisicao de Potencia de Eixo");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(" ");
        exibe_display.onRun(display_POT_EIXO);
    #endif

    #ifdef POTENCIA_HIDRAULICA
        // Posiciona o cursor para escrita na 2a linha e 3a coluna do display
        lcd.setCursor(2, 1);
        // Imprime texto default do LCD linha 2
        lcd.print("Aquisicao de Potencia de Hidraulica");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(" ");
        exibe_display.onRun(display_POT_HIDRAULICA);
    #endif

    pinMode(10, OUTPUT);
    digitalWrite(10, LOW);
}
```

```

void setup_display()
{
    // Seta o numero de linhas (2) e colunas (40) do display
    lcd.begin(40, 2);
    // Posiciona o cursor para escrita na 1a linha e 1a coluna do display
    lcd.setCursor(0, 0);
    // Imprime texto default do LCD linha 1
    lcd.print("Bancada de Ensaio de PicoTurbina Indalma");

    // Configura Thread exibe_display
    exibe_display.onRun(display_LCD);      // Chamara funcao display_LCD
    exibe_display.setInterval(100);         // Thread periodica a cada 100ms
}

```

D.1.2 Fluxo

```

void setup_fluxo()
{
    // Configura Thread fluxo
    fluxo.onRun(Processa_Sensor_FluxoA3); // Chamara funcao
    fluxo.setInterval(100);                 // Thread periodica a cada 100ms
}

// Funcao chamada pela Thread fluxoA3 processa entrada analogica A3
void Processa_Sensor_FluxoA3()
{
    S_FluxoA3 = map(analogRead(A3), 0, 1023, 0, 12);
}

```

D.1.3 Força

```

void setup_forca()
{
    // Configura Thread forca1
    forca1.onRun(Processamento_TensaoA4); // Chamara funcao
    forca1.setInterval(100);               // Thread periodica a cada 100ms

    // Configura Thread forca2
    forca2.onRun(Processamento_TensaoA5); // Chamara funcao
    forca2.setInterval(100);               // Thread periodica a cada 100ms
}

void Processamento_TensaoA4()
{
    S_FORCA1 = map(analogRead(A4), 0, 1023, 0, 20000);
}

void Processamento_TensaoA5()
{
    S_FORCA2 = map(analogRead(A5), 0, 1023, 0, 20000);
}

```

D.1.4 Pressão

```

void setup_pressao()
{
    // Configura Thread pressao1
    pressao1.onRun(Processa_Sensor_PressaoA0); // Chamara funcao
    pressao1.setInterval(100); // Thread periodica a cada 100ms

    // Configura Thread pressao2
    pressao2.onRun(Processa_Sensor_PressaoA1); // Chamara funcao
    pressao2.setInterval(100); // Thread periodica a cada 100ms

    // Configura Thread dif_pressao
    dif_pressao.onRun(Processa_Sensor_Diferencial_PressaoA2); // Chamara funcao
    dif_pressao.setInterval(100); // Thread periodica a cada 100ms
}

// Funcao chamada pela Thread pressaoA0 processa entrada analogica A0
void Processa_Sensor_PressaoA0()
{
    S_pressaoA0 = map(analogRead(A0), 0, 1023, 0, 2500);
}

// Funcao chamada pela Thread pressaoA1 processa entrada analogica A0
void Processa_Sensor_PressaoA1()
{
    S_pressaoA1 = map(analogRead(A1), 0, 1023, 0, 2500);
}

// Funcao chamada pela Thread pressaoA0 processa entrada analogica A0
void Processa_Sensor_Diferencial_PressaoA2()
{
    S_diff_pressaoA2 = map(analogRead(A2), 0, 1023, 0, 250);
}

```

D.1.5 Rotação

```

void voltas()
{
    pulsos++;
}

void RPM()
{
    S_rotacao = pulsos*60*10;
    pulsos = 0;
}

void setup_rotacao()
{
    attachInterrupt(0, voltas, RISING);

    rotacao.onRun(RPM); // Chamara funcao rotacao
    rotacao.setInterval(100); // Thread periodica a cada 100ms
}

```

D.1.6 Serial

```
//#define SIMULADO
#define REAL

void setup_serial()
{
    exibe_serial.onRun(EXIBE_SERIAL_DEBUG); // Chamara funcao
    exibe_serial.setInterval(500);          // Thread periodica a cada 100ms
}

void EXIBE_SERIAL_DEBUG()
{
    #ifdef SIMULADO
        Serial.print("S. Pres1: ");
        Serial.print(S_pressaoA0, DEC);

        Serial.print(" S. Pres2: ");
        Serial.print(S_pressaoA1, DEC);

        Serial.print(" Dif. Press: ");
        Serial.print(S_diff_pressaoA2, DEC);

        Serial.print(" Fluxo: ");
        Serial.print(S_FluxoA3, DEC);

        Serial.print(" S. Forcal: ");
        Serial.print(S_FORCA1, DEC);

        Serial.print(" S. Forca2: ");
        Serial.print(S_FORCA2, DEC);

        Serial.print(" S. Rotacao: ");
        Serial.println(S_rotacao, DEC);
    #endif

    #ifdef REAL
        Serial.write(S_pressaoA0);
        Serial.write(S_pressaoA1);
        Serial.write(S_diff_pressaoA2);
        Serial.write(S_FluxoA3);
        Serial.write(S_FORCA1);
        Serial.write(S_FORCA2);
        Serial.write(S_rotacao);
    #endif
}
```