

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Automação de Teste de Ferramenta de Perfuração

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:*

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

Rodrigo Leão Carvalho

Florianópolis, Junho de 2012

Automação de Teste de Ferramenta de Perfuração

Rodrigo Leão Carvalho

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial

Banca Examinadora:

Eng. Geraldo Antonio Signorini Filho
Orientador na Empresa

Prof. Agostinho Plucenio
Orientador do Curso

Prof. Ricardo José Rabelo
Responsável pela disciplina

Prof. Daniel Juan Pagano, Avaliador

Acadêmico Diego Ferreira de Oliveira, Debatedor

Acadêmico Guilherme Campos Angeloni, Debatedor

Agradecimentos

É irônico pensar que, depois ter escrito a monografia inteira, a parte mais difícil do trabalho é escrever os agradecimentos. Primeiramente, não é simples traduzir em palavras a gratidão que tenho pelos meus pais, Andréa e Antônio Carlos. Não é algo que pode ser traduzido por números ou teorias que são ensinadas na escola de engenharia. Essa gratidão pode ser definida pela sensação de que não foi em vão todo o esforço e confiança depositados em mim em todos esses anos, que todo amor e carinho que recebi da minha família me deram força para superar as mais diversas dificuldades e ter certeza que estava trilhando o caminho certo. Dedico todos os frutos do meu trabalho a eles e espero poder oferecer muito mais do que isso no futuro.

Também não é fácil resumir em apenas um parágrafo o apoio que tive de todos meus amigos de Florianópolis. Apoio de colegas de sala que dividiram noites sem dormir para honrar os compromissos da faculdade. Também houve noites sem dormir, é verdade, para festejar a melhor fase da minha vida na companhia de grandes amigos, e essas foram inesquecíveis! Seria injusto não agradecer em especial ao Igor, pela sua sincera amizade e companheirismo, ao Guilherme e Bruno, meus sócios empreendedores, aos amigos petroleiros de Macaé e a todos os amigos do nosso "seleto grupo de e-mails".

Durante o estágio também tive fundamental ajuda de algumas pessoas que não posso deixar de agradecer. Geraldo, pela sua amizade, paciência, didática e confiança. Diogo, pelo espírito de equipe e pelo constante incentivo. Aos outros estagiários e *trainees* pelo companheirismo, e à confiança de toda a gerência do segmento de *Drilling and Measurements*.

Deixo também um agradecimento especial à Lara. Sem suas palavras confortantes, sua paciência e seu carinho durante todo o período de estágio, eu não teria tido tanta segurança de que, no final, tudo daria certo.

Resumo

Este documento apresenta a documentação do projeto de estágio desenvolvido na empresa Schlumberger Serviços de Petróleo como parte fundamental das atividades do último semestre do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina. As atividades foram realizadas entre os meses de janeiro e junho de 2012, no contexto da disciplina DAS 5511: Projeto de Fim de Curso.

A Schlumberger se destaca por ser a atual líder mundial na prestação de serviços para a indústria do petróleo. Com mais de 80 anos de atuação no setor, a Schlumberger atua no Brasil há mais de 35, tendo a sua maior base operacional do mundo localizada na cidade de Macaé, Rio de Janeiro.

Entre os diversos segmentos em que a Schlumberger é dividida, o segmento de *Drilling and Measurements* é o foco desse trabalho. O objetivo geral é aumentar a produtividade do processo de manutenção de um tipo de ferramenta de perfuração direcional chamada de *push-the-bit*.

O escopo do trabalho foi delimitado a um processo de manutenção conhecido na empresa como *Flow Loop Test*. Esse processo tem a finalidade de testar o comportamento das ferramentas do tipo *push-the-bit* em um ambiente que simula uma operação real. O desenvolvimento do trabalho foi dividido em 5 etapas: definição; medição; análise; processo de melhoria e controle.

A primeira etapa de desenvolvimento do projeto partiu de uma análise da situação inicial do processo, apontando os principais problemas e oportunidades de melhoria. A partir dos problemas encontrados, foi realizada uma investigação de causas e, em seguida, uma análise de viabilidade de possíveis soluções. A quarta etapa do projeto foi realizar o desenvolvimento técnico, que é o foco principal desse trabalho. Por último, foram levantadas medidas para a manutenção das melhorias implementadas.

O desenvolvimento técnico resumiu-se à elaboração de um sistema automático de controle de vazão na planta de teste e a elaboração de um sistema supervisor. O projeto contou com restrições de custo, o que motivou o desenvolvimento de um sistema inteiro através de tecnologias *open-source*.

O sistema de controle de vazão se dividiu no projeto de um controlador PI (Proporcional-Integral) e de um *hardware*. O *hardware* foi composto de uma placa

de aquisição de dados desenvolvida a partir do Arduino. Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre, composta de uma placa microcontrolada. Arduino vem sendo bastante utilizada em projetos de automação e suas principais características são: flexibilidade, rápida curva de aprendizado e custo extremamente baixo para esse tipo de aplicação.

O sistema supervisório também foi elaborado com iniciativas de código aberto, ou do inglês *open-source*. O software foi desenvolvido através da plataforma Java e contou com o uso de bibliotecas e APIs (*Application Programming Interface*) de distribuição livre.

Palavras-chave: Automação, controle digital de processos contínuos, Arduino, desenvolvimento de placa de aquisição de dados, sistema supervisório, Java.

Abstract

This report presents the internship project developed for Schlumberger Oilfield Services Company. The internship is the main activity of the last semester of the Control and Automation Engineering course at Federal University of Santa Catarina.

Schlumberger is the world's largest oilfield services company. It is present in the oilfield area for more than 80 years and has been providing services in Brazil for more than 35. Its biggest base in the world is in Macaé, Rio de Janeiro.

Schlumberger is divided in several segments. "Drilling and Measurements" is one of these segments and it is the focus of this work. The general goal is to increase the productivity of a directional drilling type of tool called push-the-bit.

The project's scope is the maintenance process known in the company as Flow Loop Test. The goal of this process is to test the push-the-bit tool behavior in a simulation environment. The project development was divided in 5 steps: defining, measuring, analyzing, improving and controlling.

The first development step was to analyze the initial state of the Flow Loop Test and to point the main problems and improvement opportunities. Then it was investigated the root cause of the problems and how it could be solved. The fourth step was related to the technical development, that is the main goal of the internship project. Finally, actions for the improvement maintenance were raised.

The technical development was related to the development of a automatic system to control the flow in the test area and a supervisory system. Cost constraints led the development of the entire system to be done through open-source technologies.

The flow control system was divided in the PI (Proportional-Integral) controller design and the hardware development. The hardware is composed by an electronic acquisition board developed through an open-source electronics prototyping platform called Arduino. Basically, Arduino is a microcontroller board that has been very used for automation projects and is: flexible; has a fast learning curve and it is cheap.

The supervisory system was also designed with open source technologies. It was used Java Platform to program the software and free libraries and APIs (*Application Programming Interface*).

Keywords: Automation, digital control of continuous processes, Arduino, acquisition board design, supervisory system, Java.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Simbologia	xiv
1 Introdução	1
1.1 História do Petróleo no Brasil	1
1.2 Momento Atual da Indústria do Petróleo	3
1.3 Schlumberger Serviços de Petróleo	5
1.3.1 Segmento de <i>Drilling and Measurements</i>	6
1.4 Apresentação do Problema	9
1.5 Objetivos do Projeto	12
1.6 Estrutura do Documento	13
2 Processo de Manutenção de Ferramentas <i>push-the-bit</i>	15
2.1 <i>Flow loop Test</i>	16
2.1.1 <i>Define</i>	17
2.1.2 <i>Measure</i>	18
Identificando as Causas dos Problemas	21
2.1.3 <i>Analyze</i>	22
2.1.4 <i>Improve</i>	24
2.1.5 <i>Control</i>	24
2.2 Cronograma	25
3 Hardware	26

3.1	Inversor de Frequência	26
3.1.1	1º Bloco - CPU	27
3.1.2	2º Bloco - IHM	27
3.1.3	3º Bloco - Interfaces	28
3.1.4	4º Bloco - Etapa de potência	28
3.2	Transmissor de vazão	29
3.3	Projeto da Placa de Aquisição de Dados	31
3.3.1	Projeto de Circuito para Controle do Inversor	32
3.3.2	Projeto de Circuito para Leitura da Vazão	36
3.4	Prototipagem	40
4	Modelagem e Controle	43
4.1	Conceitos Básicos de Controle	43
4.2	Objetivos de Controle	44
4.3	Levantamento do Modelo	45
4.3.1	Sistemas de Primeira Ordem	46
4.4	Projeto do Controlador	48
4.5	Algoritmo de Controle	53
4.5.1	Discretização de Controlador Contínuo	54
4.5.2	Obtenção da Equação de Diferenças a partir da Transformada Z	56
4.6	Resultados	56
5	Software Supervisório	59
5.1	Visão Geral do Sistema	59
5.2	Levantamento de Requisitos	59
5.3	Plataforma de Desenvolvimento	61
5.4	Comunicação com o <i>Hardware</i>	62

5.4.1	Protocolo de comunicação	63
5.5	Implementação	65
5.6	Telas do Sistema Supervisório	71
6	Resultados	74
7	Conclusões e Perspectivas	76
	Referências	78
	Apêndice A: Funcionamento Básico dos Inversores de Frequência	83
	Apêndice B: Medidor de Vazão Tipo Magnético	86
	Anexo A: Diagrama do Inversor de Frequência Varispeed E7 - Yaskawa	89
	Anexo B: Lista de Componentes	90
	Anexo C: Tabela de Transformadas	91

Lista de Figuras

1.1	Matriz Energética Mundial - 2009. [7]	3
1.2	Segmentos da Schlumberger.	6
1.3	Subseguimentos de D&M.	7
1.4	Ferramenta de MWD [5].	8
1.5	Modulação de sinal pela ferramenta de MWD [5].	9
1.6	Tipos de perfuração.	10
1.7	<i>Steerable motor</i> - Ferramenta do tipo <i>point-the-bit</i>	11
1.8	<i>PADS</i> - Atuadores mecânicos para ferramentas <i>push-the-bit</i> [5].	11
1.9	Localização espacial das ferramentas de perfuração no fundo do poço [5].	12
1.10	<i>Flow Loop Test</i> - Técnico medindo o torque de ferramenta <i>push-the-bit</i>	13
2.1	Ferramenta <i>push-the-bit</i> [5].	15
2.2	Fluxograma do processo de manutenção de ferramenta <i>push-the-bit</i>	16
2.3	Análise SIPOC - <i>Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers</i>	18
2.4	Visão geral do <i>Flow Loop Test</i>	18
2.5	Fluxograma detalhado do <i>Flow Loop Test</i>	18
2.6	Válvula do tipo esfera	19
2.7	Inversor de Frequência	19
2.8	Motor de 400V utilizado para acionar bomba d'água e linha de vazão do teste.	20
2.9	<i>Timeline</i> do processo antes do projeto.	22
2.10	Processo feito manualmente pelos técnicos com alta taxa de erro humano	22
2.11	Controlador do inversor de frequência.	23
2.12	Processos do <i>Flow Loop Test</i> que devem ser alterados.	23

3.1	Blocos de um inversor de frequência [21].	27
3.2	<i>Display</i> de controle do inversor modelo Varispeed E7 - Yaskawa	28
3.3	Módulo de controle do inversor - Posição <i>automático</i> e <i>manual</i>	29
3.4	Medidor de vazão por placa de orifício	29
3.5	Medidor de vazão por deslocamento positivo	30
3.6	Medidor eletromagnético de vazão	30
3.7	Medidor <i>SITRANS F M MAGFLO Mag5000, Siemens</i>	30
3.8	Placa <i>Arduino Uno</i>	31
3.9	Módulo de entrada analógica do inversor de frequência - Sinais <i>+V, A1</i> e <i>AC</i>	33
3.10	Transistores bipolares NPN e PNP	34
3.11	Utilizando transistor para amplificar sinal PWM do Arduino	35
3.12	Princípio de funcionamento dos optoacopladores	36
3.13	Circuito para controle da entrada analógica do inversor de frequência	36
3.14	Módulo de saída analógica do transmissor de vazão <i>Mag5000</i>	37
3.15	Princípio de funcionamento do circuito utilizado para ler sinal de corrente	37
3.16	Teste da relação entrada-saída do optoacoplador <i>4N35</i>	38
3.17	Resultados do teste da relação entrada-saída do optoacoplador <i>4N35</i>	39
3.18	Faixa de operação aproximadamente linear do optoacoplador <i>4N35</i>	39
3.19	Circuito para leitura do sensor de vazão	40
3.20	Sinal de corrente com ruído	40
3.21	Sinal de corrente filtrado	40
3.22	Circuito final do projeto	41
3.23	Placa de circuito impressa com escala em <i>mm</i>	41
3.24	Soldagem de componentes eletrônicos	42
3.25	<i>Hardware</i>	42
4.1	Sistema de controle de vazão em malha aberta.	43

4.2	Sistema de controle em malha fechada.	44
4.3	Ensaio de degrau	46
4.4	Resposta de sistema de primeira ordem para entrada degrau, (a) sem zero, (b) com zero [32]	47
4.5	Diagrama pólo-zero da Equação 4.8 com realimentação negativa	50
4.6	SISOTOOL - Ferramenta do Matlab que auxilia o projeto de controladores	50
4.7	Resposta a um degrau de amplitude unitária	51
4.8	Diagrama <i>Simulink</i> para teste de robustez	52
4.9	Resposta ao degrau para teste de robustez	52
4.10	Sistema de controle digital	53
4.11	Relação entre os sinais de entrada e saída de um conversor A/D.	54
4.12	Transformação de pulsos em degraus através de um <i>ZOH</i>	55
4.13	Mudança de <i>set-point</i> da referência de vazão para 130 GPM.	57
4.14	Comportamento do controlador para diferentes <i>set-points</i>	57
5.1	Requisitos funcionais do modo de controle do motor.	60
5.2	Requisitos funcionais sobre o <i>Downlink</i>	60
5.3	Requisitos funcionais sobre teste de torque.	61
5.4	IDE: Eclipse.	62
5.5	IDE: NetBeans.	62
5.6	Comunicação serial do Arduino através de conexão USB	63
5.7	FIRMATA: protocolo de comunicação entre o Arduino e o software.	64
5.8	Seções principais do software.	65
5.9	Painel de monitoramento principal.	65
5.10	Aba <i>Home</i>	66
5.11	Aba <i>Downlink</i>	67
5.12	Aba <i>Testing</i>	68
5.13	Fluxograma do teste de torque.	69

5.14 Torquímetro digital <i>CEDAR - DIW 15</i>	70
5.15 Relatórios gerados na forma de planilhas do <i>Microsoft Excel</i>	71
5.16 Controlador de vazão	72
5.17 <i>Downlink</i>	72
5.18 Teste de Torque	73
6.1 Estado inicial do processo de teste	74
6.2 Estado final do processo de teste	75
6.3 Análise quantitativa das melhorias	75
7.1 Sinais do inversor de frequência em um ambiente industrial	76
A.1 Estrutura básica de um inversor de frequência trifásico.	83
A.2 Componentes de um motor de indução [28].	84
A.3 Modulação PWM [21].	84
A.4 <i>Duty Cycle</i> de um sinal PWM [21].	85
B.1 Princípio de funcionamento de medidores eletromagnéticos de vazão	87
B.2 Quadro comparativo entre tipos de medidores de vazão	88

Lista de Tabelas

2.1	Planejamento do estágio 1 do projeto	25
2.2	Planejamento do estágio 2 do projeto	25
2.3	Planejamento do estágio 3 do projeto	25
3.1	Sinais do módulo de entrada analógico do inversor	33
4.1	Modelos experimentais	48
5.1	Funcionalidades da tela de monitoramento geral do sistema	66
5.2	Funcionalidades da aba <i>Home</i>	67
5.3	Funcionalidades da aba <i>Downlink</i>	68
5.4	Funcionalidades da aba <i>Testing</i>	69
B.1	Lista de componentes	90

Simbologia

ANP : Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

SLB : Schlumberger.

D&M : *Drilling and Measurements.*

DD : *Directional Drilling.*

MWD : *Measure While Drilling.*

LWD : *Logging While Drilling.*

BHA : *Bottom Hole Assembly.*

PWM : *Pulse With Modulation.*

CC : Corrente Contínua.

CA : Corrente Alternada.

IGBT : Transistor Bipolar de Porta Isolada.

PCB : Placa de circuito impressa (*Printed Circuit Board*).

OSI : *Open Systems Interconnection.*

DTE : *Data Terminal Equipment.*

DCE : *Data Communication Equipment.*

IDE : *Integrated Development Environment.*

Capítulo 1: Introdução

1.1: História do Petróleo no Brasil

No Brasil, a existência do petróleo foi relatada pela primeira vez durante os tempos do regime imperial com a extração de betume nas margens do rio Marau, na Bahia. Contudo, apenas na década de 1930 foi criado o CNP - Conselho Nacional do Petróleo - que determinou várias as diretrizes sobre a propriedade e exploração das reservas nacionais [1].

Apesar das primeiras descobertas de petróleo no Brasil terem sido em pequena escala, o surgimento dessa nova riqueza incentivou, em 1953 com a Lei nº 2004, a oficialização do monopólio estatal sobre a atividade petrolífera. Assim, nesse ano, foi criada a empresa estatal "Petróleo Brasileiro S.A.", mais conhecida como Petrobras [1].

Na década de 1960, novas medidas ampliaram o grau de atuação da Petrobras na economia brasileira. No ano de 1968, a empresa passou a desenvolver um projeto de extração iniciando a exploração de petróleo em águas profundas. Após as primeiras descobertas, outras prospecções ampliaram significativamente a produção petrolífera brasileira. Em 1974 foi descoberto petróleo na Bacia de Campos, a maior reserva de petróleo do país [1].

Em 1997, a Lei nº 9.478, também conhecida como nova lei do petróleo, revogou a lei de 1953, citada anteriormente. Com a nova lei do petróleo, além da Petrobras, outras empresas constituídas sob as leis brasileiras e com sede no Brasil passam a poder atuar em todos os elos da cadeia do petróleo [2], ou seja, do poço ao posto (em inglês, *from well to wheel*), em regime de concessão ou mediante autorização do poder concedente - a União. Até o advento desta lei, outras empresas só podiam atuar no *downstream* isto é, apenas na venda dos derivados do petróleo. A Petrobras perdeu, assim, o monopólio da exploração e do refino de petróleo no Brasil.

Também através da Lei nº 9.478, em 1997, foi criada a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A ANP é o órgão regulador das atividades que integram as indústrias de petróleo e gás natural e de biocombustíveis no Brasil. A ANP tem a finalidade de estabelecer regras, contratar e zelar pelo cumprimento das normas nas atividades de exploração, desenvolvimento e produção de

petróleo e gás natural no país.

Com o passar do tempo, o Brasil se tornou uma das únicas nações a dominar a tecnologia de exploração petrolífera em águas profundas e ultra profundas. De porte dessa tecnologia avançada, o Brasil conseguiu em 2007 descobrir uma grande reserva de petróleo conhecida como Pré-Sal.

Em termos mundiais, o Pré-Sal descoberto em Tupi foi a maior descoberta da década para a indústria do petróleo. Segundo a Petrobras, sendo conservador, o petróleo do Pré-Sal pode, no mínimo, dobrar as reservas de hidrocarbonetos do Brasil [6]. Por enquanto a reserva do Pré-Sal situa-se do litoral de Santa Catarina até o litoral do Espírito Santo, com indícios de que pode ir até o Ceará [10].

Em 2009, o governo aprovou novas regras para exploração e produção de petróleo e gás natural na área de ocorrência da camada Pré-Sal e em áreas que venham a ser consideradas estratégicas. Esse novo conjunto de regras é conhecido como o novo marco regulatório da indústria de petróleo no Brasil e define que o regime de exploração e produção de petróleo e gás natural no Brasil podem ser por concessão, partilha de produção ou cessão onerosa.

A principal característica do sistema de concessão é que as atividades são realizadas por conta e risco do concessionário, sem interferência ou maior controle dos governos nos projetos de exploração e produção, respeitada a regulação existente [4]. Com o novo marco regulatório, a primeira grande mudança está na troca do modelo de concessão (que será mantido para os blocos já licitados) para o contrato de partilha da produção, adotado em países com grandes reservas, como Arábia Saudita, Venezuela, Irã e Iraque [3].

No contrato de partilha, o Estado e as empresas dividem entre si a produção de óleo e gás, permitindo à União capturar a maior parte da riqueza gerada com a renda do petróleo. Nesse novo modelo o governo poderá contratar a Petrobras para produzir diretamente no pré-sal e em áreas estratégicas ou contratar empresas privadas por meio de licitação, assegurando à estatal uma fatia mínima de 30% em cada bloco. Nesse regime, a União será representada por uma nova estatal, a Petro-Sal [3].

A cessão onerosa de direitos prevê que a União poderá ceder à Petrobras o direito de exercer atividades de exploração e produção, em determinadas áreas do Pré-Sal, sem licitação, no limite de até 5 bilhões de barris de petróleo e gás natural. A companhia arcará com todos os custos e assumirá os riscos de produção. O valor desta cessão onerosa será avaliado segundo as melhores práticas da indústria do

petróleo, e a Petrobras pagará à União este valor [4].

1.2: Momento Atual da Indústria do Petróleo

Fontes de energia não renováveis, como o petróleo, têm prazo para acabar, pois demoram milhões de anos para serem criadas pela natureza e suas reservas vêm diminuindo ou ficando inacessíveis à medida que o tempo passa. Muitas iniciativas para a substituição do petróleo por fontes renováveis de energia tem sido tomadas, entretanto, o petróleo ainda é, e será, a principal matriz energética mundial por vários anos.

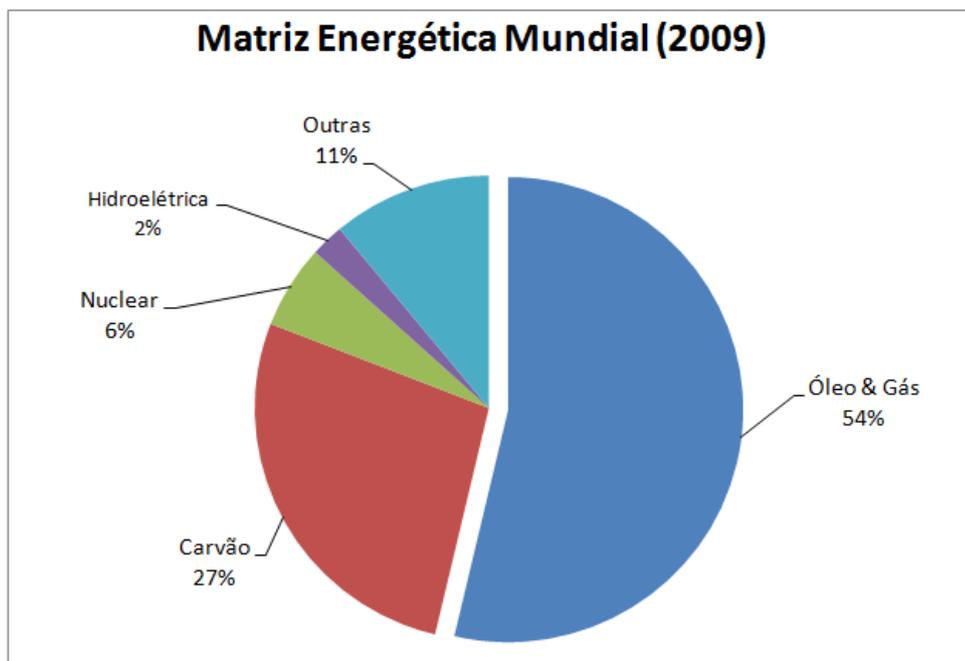


Figura 1.1: Matriz Energética Mundial - 2009. [7]

A Figura 1.1 mostra o comparativo entre as principais matrizes energéticas mundiais. Estudos realizados pela Agência Internacional de Energia (IEA) mostram que até 2030 o petróleo continuará sendo a fonte primária de energia [8].

Atualmente, a agricultura moderna e 90 % dos meios de transportes estão fortemente associados ao petróleo. A segurança alimentar de quase sete bilhões de indivíduos depende de uma agricultura bastante dependente dos derivados de petróleo por dois grandes motivos. O primeiro é que o petróleo é o combustível para grande parte do maquinário utilizado no cultivo dos alimentos. Além disso, grande parte das áreas de produção agrícola são distantes dos centros consumidores, o que torna o

escoamento da produção também dependente de meios de transportes movidos a petróleo.

Em meio a esse panorama, o Brasil vê sua riqueza proveniente do ouro negro se valorizar mais a cada dia. Com as estimativas do Pré-Sal, o Brasil se encontra entre os seis países que possuem as maiores reservas de petróleo do mundo, ficando atrás somente de Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Emirados Árabes [9].

Até 2011 as reservas de petróleo brasileiras totalizaram 15 bilhões de barris. Com a incorporação das reservas não provadas do pré-sal as reservas brasileiras de petróleo e gás serão elevadas para 30 bilhões de barris, segundo o gerente executivo de Desenvolvimento da Produção da Petrobras, Osmond Coelho Júnior [11]. Em valor de mercado, atualmente a Petrobras já é a segunda maior empresa do continente americano e a quarta maior do mundo, no ano de 2010 [16].

Para conseguir se adaptar a essa nova realidade, o Conselho de Administração da Petrobras aprovou um plano de investimentos de R\$ 487,2 bilhões entre 2012 e 2016. O que corresponde a uma média de US\$ 47,3 bilhões por ano em aplicações. A maior parte dos recursos será destinada a atividades de exploração e produção (E&P) no total de US\$ 141,8 bilhões [13].

A Petrobras também divulgou um plano de investimentos da ordem de US\$ 31,2 bilhões para ampliação do parque nacional de refino de petróleo até 2017. Esse investimento significará um aumento na capacidade de refino do país de 2 milhões para 2,4 milhões de barris de petróleo por dia até 2014 [14]. O investimento no refino do petróleo traz consigo um aumento no valor agregado do petróleo e um grande benefício para a economia nacional.

Para atender a demanda desse aumento de produção, o Brasil precisará de muitos profissionais capacitados. A indústria de óleo e gás, incluída a cadeia de fornecedores, estima que, apenas no nível técnico, até 2015 vão surgir mais de 50 mil oportunidades de emprego por ano. Para isso, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) financia programas de capacitação de profissionais como o PRH (Programa de Recursos Humanos - ANP), com recursos próprios e também por meio da Cláusula de P&D dos contratos de concessão (obrigatoriedade de investimentos em P&D de 1 % da receita bruta dos campos de grande produção). Também existem programas como o Prominp, o Programa de Formação de Recursos Humanos da Petrobras (PFRH), o Ciência Sem Fronteiras para o setor do petróleo e os programas dos centros de formação de profissionais para Marinha Mercante (Ciaga

e Ciaba).

Diante desses novos desafios, o curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina proporciona aos seus alunos uma ótima oportunidade de terem contato com projetos de pesquisas na área de petróleo e gás e se prepararem para o mercado de trabalho. Desde os primeiros anos do curso, os alunos podem participar de projetos de P&D da Petrobras ou até de fazer parte do programa de capacitação da ANP, o PRH-34.

1.3: Schlumberger Serviços de Petróleo

Na indústria do petróleo, podemos dividir as empresas, de forma generalista, em operadoras e prestadoras de serviços. A Petrobras, por exemplo, é a maior operadora do Brasil. Em 2008, ela contava com 63 sondas de exploração (terra e mar) e 13174 poços de produção [16]. Enquanto as empresas operadoras possuem os direitos exploratórios das reservas de petróleo, existem as empresas prestadoras de serviços que oferecem as mais avançadas tecnologias para viabilizar a exploração e produção dessa riqueza. A Schlumberger Serviços de Petróleo (SLB) é uma dessas empresas.

A Schlumberger é uma empresa francesa que atua na área de petróleo há mais de 80 anos, estando presente no Brasil há mais de 35. Nesse período, ela conseguiu se tornar a maior empresa prestadora de serviços da indústria do petróleo no mundo, estando presente em mais de 80 países e empregando mais de 110 mil pessoas. A Schlumberger oferece serviços como:

- Aquisição e processamento sísmico;
- Prospecção, perfuração e manutenção de poços de petróleo;
- Fraturação e estimulação hidráulica;
- Consultoria e desenvolvimento de sistemas de informação.

Para conseguir prestar serviços em quase todos os passos do ciclo de exploração do petróleo, a Schlumberger se divide em diversos segmentos. A Figura 1.2 mostra essa divisão.

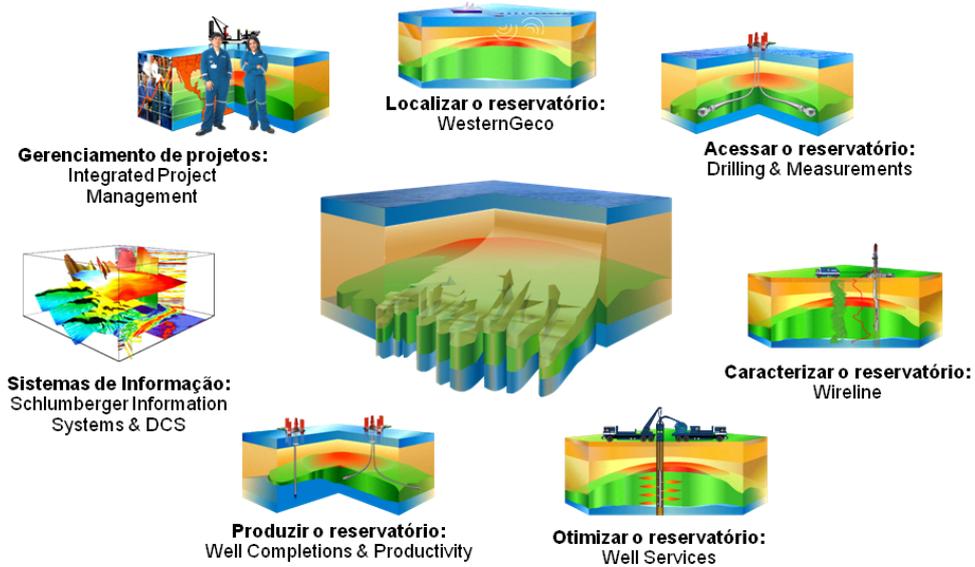


Figura 1.2: Segmentos da Schlumberger.

1.3.1: Segmento de *Drilling and Measurements*

Em meados dos anos 70, a atividade de perfuração estava extremamente alta e a Schlumberger era a líder mundial. Entretanto, os clientes começaram a exigir novas tecnologias para que, durante a operação de perfuração, se pudesse avaliar o ambiente, formação e dados dos poços em tempo real. Nessa época, a SLB tinha um segmento chamado Schlumberger Drilling Services (SDS) e que, em 1977, comprou a Analysts - que era uma companhia composta por analistas de perfis de lama ou geologistas, que pegavam amostras de lama da sub-superfície e a avaliavam [17].

A Analysts uniu-se ao SDS e formou-se a ANADRILL, que hoje é chamada de Drilling and Measurements (D&M). A visão de D&M é "fornecer soluções de perfuração em tempo-real através de pessoas e tecnologia de ponta". D&M busca prover a indústria do petróleo com serviços de perfuração com alto volume e em tempo real visando encontrar óleo e gás eficientemente, de maneira segura e aceitável do ponto de vista do meio-ambiente [17].

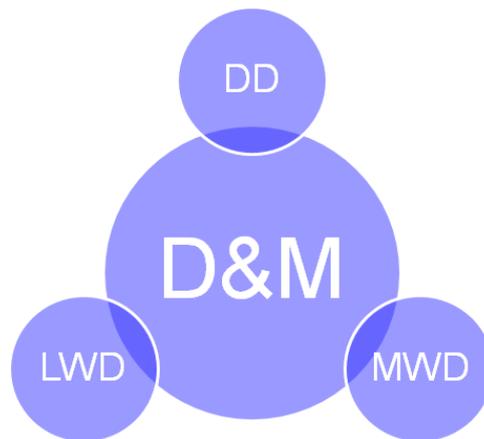


Figura 1.3: Subsegmentos de D&M.

A Figura 1.3 mostra como D&M é dividida. Seus principais serviços são:

- **Directional Drilling (DD):** Processo de guiar um poço para seguir o melhor caminho geométrico para alcançar seu objetivo ou seguir uma tendência geológica;
- **Logging While Drilling (LWD):** É um processo utilizado para fazer medidas da formação geológica enquanto o poço é perfurado. Algumas medidas comuns de ferramentas de MWD são: taxa de emissão natural de gamma-ray, resistividade da formação, densidade e porosidade. Com essas medidas o cliente pode inferir que tipo de formação está sendo perfurada e se há ou não presença de hidrocarbonetos.
- **Measurements While Drilling (MWD):** Possui uma função chave para a área de D&M. Através das ferramentas de MWD, as medidas tomadas a cada instante pelas ferramentas de LWD podem ser enviadas à superfície em tempo real através de técnicas de telemetria. Outro papel fundamental das ferramentas de MWD é fornecer energia para as ferramentas de LWD a partir da energia gerada pela sua turbina (transforma a energia mecânica do fluido de perfuração em energia elétrica).

Para uma melhor compreensão do projeto nos capítulos posteriores, é necessário entender como se dá a comunicação das ferramentas do BHA (Bottom Hole Assembly - é a parte da coluna de perfuração que vai da broca até, geralmente, a última ferramenta de D&M) com os equipamentos de superfície. Uma vez que não há cabos conectando as ferramentas de D&M com a superfície, toda a troca de comunicação entre eles deve utilizar outro meio de propagação.

As ferramentas de MWD podem utilizar 2 formas para enviar os dados de medição do fundo do poço para a superfície. Para os casos em que a perfuração usa fluido de perfuração gasoso, as ferramentas enviam as informações através de ondas eletromagnéticas. Na maioria dos casos, o fluido perfuração usado não é gasoso e sim líquido, ou mais conhecido como "lama". Nesses casos, as ferramentas de MWD modulam os dados em sequências binárias e as transmitem para a superfície por pulsos de lama. Para modular os dados a ferramenta conta com modulador constituído de um estator e um rotor, Figura 1.4.

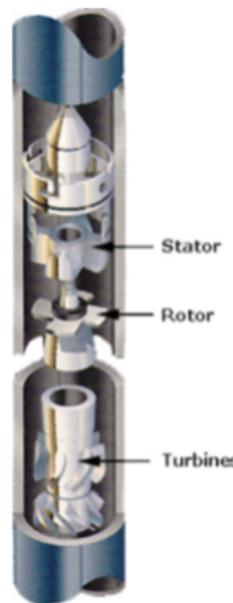


Figura 1.4: Ferramenta de MWD [5].

Em um processo de perfuração normal, a lama é bombeada da superfície até a ponta da broca por dentro da coluna de perfuração. Isso significa que a lama passa pela ferramenta de MWD em direção à broca, e, à medida que a lama vai passando, o rotor do modulador vai girando. Como o estator do modulador não se move, os lóbulos do rotor se alinham e desalinham com os lóbulos do estator o tempo inteiro. Com isso, quando os lóbulos estão desalinhados, a lama tem dificuldade de passar pela ferramenta de MWD e gera um aumento de pressão dentro da coluna. Da mesma forma, quando os lóbulos estão alinhados a lama pode passar livremente e há uma queda de pressão na coluna, Figura 1.5.

Para codificar a informação há um motor que controla a velocidade de giro do rotor, podendo mudar a frequência e defasagem de fase do sinal. Na superfície existem sensores de pressão que identificam a variação de pressão dentro da coluna e enviam essa informação para que os dados sejam demodulados no computador.

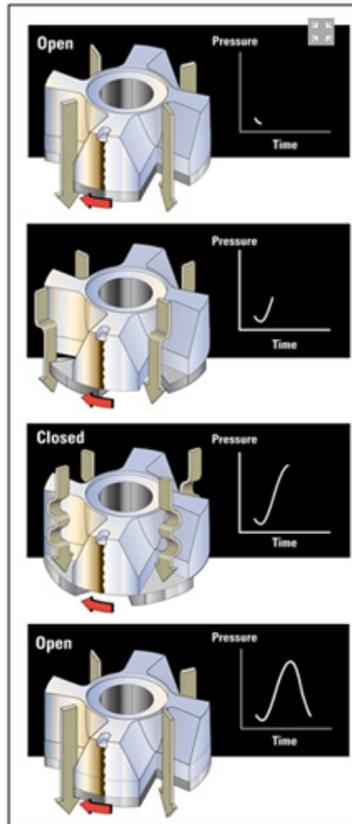


Figura 1.5: Modulação de sinal pela ferramenta de MWD [5].

1.4: Apresentação do Problema

O estágio na Schlumberger foi realizado na área de *Drilling and Measurements* e o projeto foi relacionado com a área de *Directional Drilling*. Resumidamente, poços direcionais são poços que não são exatamente verticais, que possuem uma trajetória calculada por pessoas especializadas, como por exemplo, por geólogos. A Figura 1.6 mostra a diferença entre cada tipo de perfuração. Essas trajetórias são calculadas por diversos motivos, entre eles:

- Acessar regiões inacessíveis por poços verticais;
- Aumentar a produtividade dos poços;
- Perfuração em solo salino;
- Desviar de poços já existentes na região.

Nesse contexto, a Schlumberger possui diversas tecnologias para prover a perfuração de poços direcionais, ou horizontais. Basicamente, essas tecnologias são divididas em

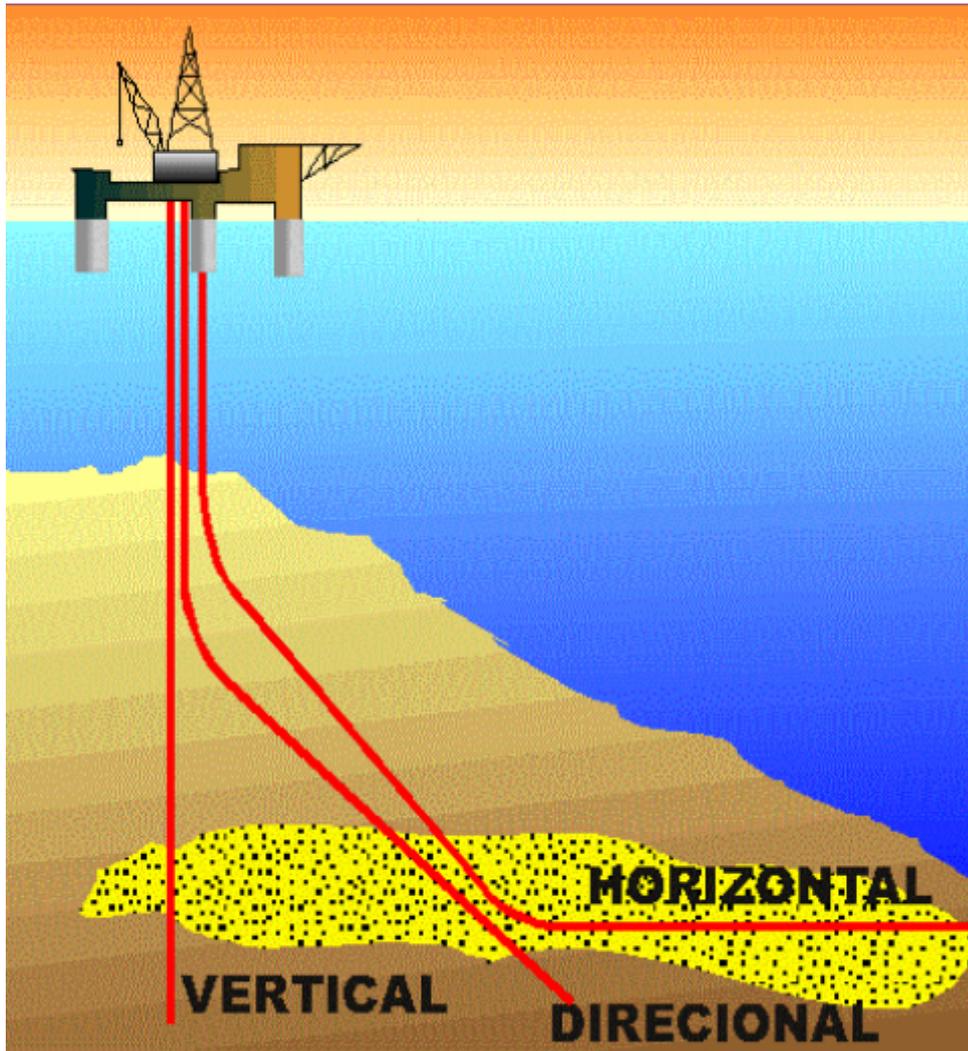


Figura 1.6: Tipos de perfuração.

ferramentas de perfuração *point-the-bit* e *push-the-bit*. Ferramentas do tipo *point-the-bit* fazem com que o eixo da broca seja desalinhado em relação ao eixo do resto da coluna de perfuração, formando um ângulo que, à medida que o poço vai sendo perfurado a broca vai seguindo uma determinada direção em relação à vertical, veja a Figura 1.7. Ferramentas do tipo *push-the-bit* possuem um mecanismo diferente. À medida que a coluna gira e o poço é perfurado, a ferramenta utiliza o fluido de perfuração para acionar alguns dispositivos mecânicos, chamados de *pads*, que colidem contra a formação do poço e empurram a ponta da broca para a direção desejada. A Figura 1.8 mostra esses dispositivos mecânicos.

Ferramentas do tipo *push-the-bit* possuem três *pads* independentes que, à medida que a coluna gira, eles são acionados de forma a compensar a rotação da coluna e "empurrar" a broca sempre para uma mesma direção e inclinação. Para poder fazer o cálculo da velocidade de abertura e qual dos três *pads* deve ser acionado

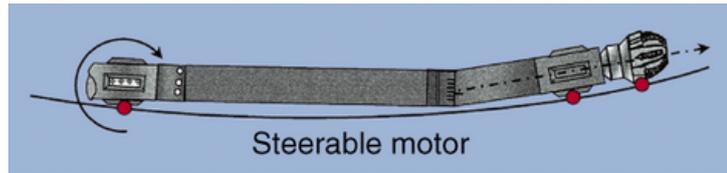


Figura 1.7: *Steerable motor* - Ferramenta do tipo *point-the-bit*

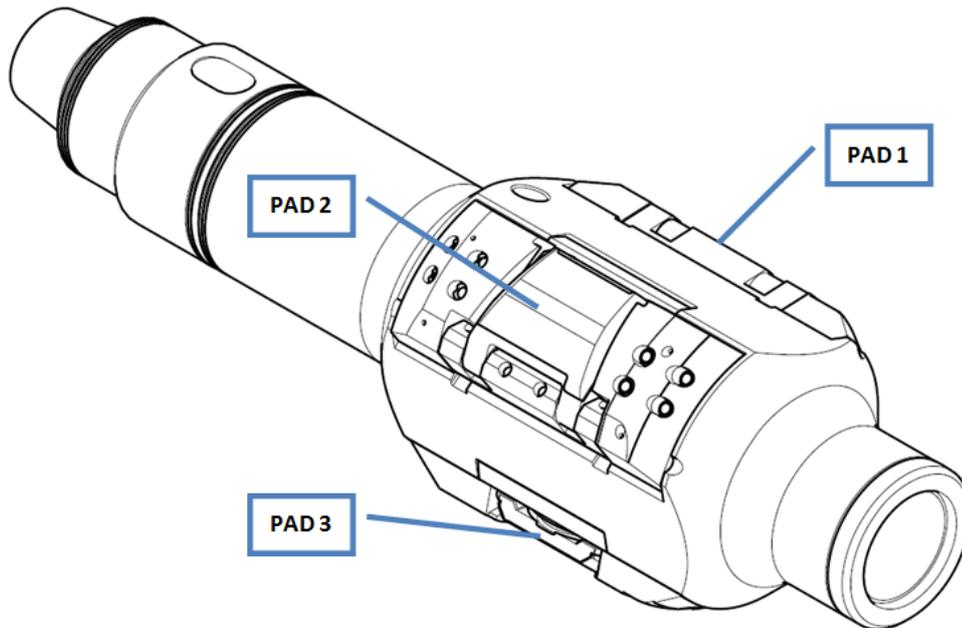


Figura 1.8: *PADS* - Atuadores mecânicos para ferramentas *push-the-bit* [5].

em cada momento, as ferramentas *push-the-bit* possuem circuitos eletrônicos de controle e sensores para determinar a sua localização espacial. A localização especial possui duas referências, uma em relação ao sentido do campo gravitacional e a outra em relação ao norte magnético terrestre, veja a Figura 1.9. Esses sensores são constituídos por magnetômetros e acelerômetros.

Por envolver bastante tecnologia e custos de operação, qualquer erro desse tipo de ferramenta pode custar muito dinheiro para a empresa. Para minimizar falhas, a Schlumberger provê uma série de testes de manutenção em suas ferramentas de perfuração. Um desses testes para as ferramentas do tipo *push-the-bit* é chamado de *Flow Loop Test*, e é o foco desse trabalho.

No *Flow Loop Test*, as ferramentas de perfuração *push-the-bit* são testadas em uma planta que simula algumas operações de campo. Para isso, são conectadas mangueiras na ferramenta por onde é bombeado água a uma pressão de 0 a 2000 GPM (galões por minuto). Essa é a faixa de operação da maior parte das ferramentas de perfuração.

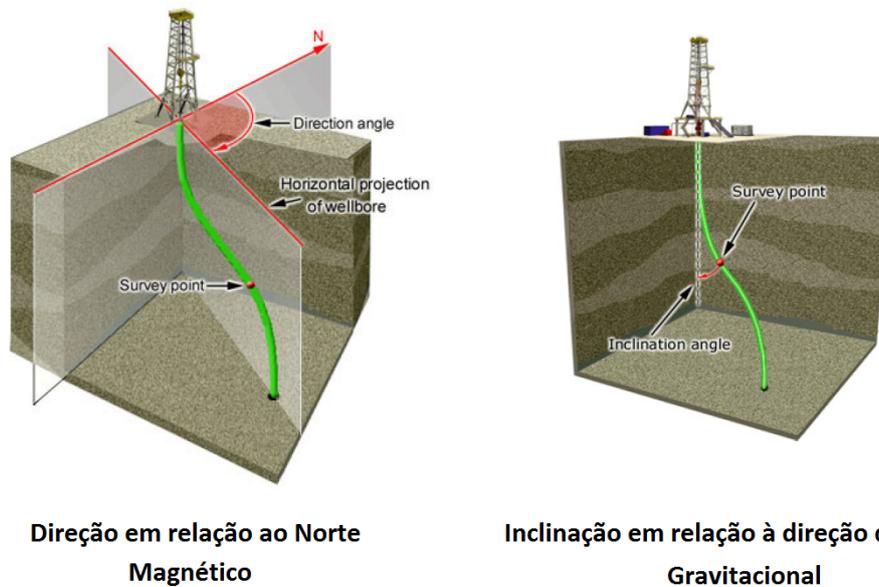


Figura 1.9: Localização espacial das ferramentas de perfuração no fundo do poço [5].

No teste, a ferramenta fica parada sobre um cavalete e é programada para simular a ação de "empurrar" a broca para uma determinada direção. Basicamente, como a ferramenta não está girando, se ela for programada para "perfurar" em uma determinada direção, apenas um dos *pads* deve ser acionado e permanecer aberto durante todo o tempo, uma vez que em operações de campo os outros *pads* são acionados apenas para compensar o giro da coluna. Partindo desse princípio, o *Flow Loop Test* analisa o comportamento da ferramenta para diversos comandos e também mede o torque que a ferramenta fornece para o acionamento dos *pads*. A Figura 1.10 mostra um *Flow Loop Test* em andamento na planta.

1.5: Objetivos do Projeto

O objetivo desse trabalho é fazer um estudo detalhado sobre como o *Flow Loop Test* vem sendo feito na Schlumberger, propor e implementar melhorias no processo. A ideia é aumentar a produtividade do processo de manutenção das ferramentas do tipo *push-the-bit*, fazendo com que o trabalho dos técnicos seja feito de forma mais prática e com melhor qualidade. Os requisitos básicos do projeto foram: ter baixo custo e utilizar equipamentos/componentes disponíveis na região de Macaé.

Antes da implementação do projeto, o teste demorava aproximadamente 1,5 h para ser realizado; era necessário ter 2 técnicos durante todo o período e a taxa de retrabalho era de até 20% devido a erros humanos, o que representava um atraso da



Figura 1.10: *Flow Loop Test* - Técnico medindo o torque de ferramenta *push-the-bit*

ordem de 30 min no teste.

Nesse contexto, foram definidos dois objetivos:

- Tornar o teste factível por apenas um técnico;
- Eliminar erros humanos no teste.

1.6: Estrutura do Documento

Esta monografia é composta por 7 capítulos, Apêndices e Anexos. O primeiro capítulo contextualiza o assunto abordado pelo trabalho e aponta os objetivos gerais do projeto.

O Capítulo 2 define a metodologia que o projeto foi desenvolvido e faz uma análise aprofundada do problema. A partir dessa análise, são definidos os objetivos específicos, é justificado o porquê do trabalho e definido um cronograma para pesquisas e desenvolvimento técnico.

O Capítulo 3 aborda a primeira questão relacionada diretamente ao curso de Engenharia de Controle e Automação, que é o desenvolvimento de uma placa eletrônica

de aquisição de dados. Além do embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da placa, esse capítulo mostra como foi possível construir um protótipo para testes.

No Capítulo 4 é demonstrado a teoria básica de modelagem de sistemas dinâmicos e métodos de análise e controle de sistemas realimentados. Também são demonstrados os resultados de testes do sistema de controle projetado aplicados na planta real.

O Capítulo 5 apresenta o produto final do projeto, que é um software supervisor comunicando com a placa de aquisição de dados projetada anteriormente. Esse capítulo apresenta as especificações do sistema e a implementação do mesmo.

Os resultados do projeto são apresentados no Capítulo 6 e as conclusões finais e perspectivas futuras estão no Capítulo 7.

Os Apêndices A e B apresentam alguns conceitos técnicos necessários para o desenvolvimento do *hardware*. Os Anexos mostram algumas informações adicionais que podem ser interessantes para consultas futuras.

Capítulo 2: Processo de Manutenção de Ferramentas *push-the-bit*

As ferramentas do tipo *push-the-bit* são compostas por basicamente 3 módulos: *Bias Unit*, *Control Unit* e *Control Collar*. A Figura 2.1 mostra como é a disposição de cada módulo na ferramenta.



Figura 2.1: Ferramenta *push-the-bit* [5].

- **Control Collar:** É responsável por manter a integridade física da ferramenta. É formado por material não-magnético de alta tecnologia, resistente a choques, temperatura etc. Mesmo sendo a parte mecanicamente mais simples, é o módulo mais caro da ferramenta.
- **Bias Unit:** É um sistema constituído de atuadores mecânicos (*pads*) protegidos por um colar não-magnético. Seu objetivo é converter a pressão hidráulica do fluido de perfuração, que passa por dentro da ferramenta em direção à broca, em energia mecânica para direcionar a perfuração do poço.
- **Control Unit:** É o "cérebro" da ferramenta. Contém toda a parte eletrônica e de sensores utilizadas para direcionar o poço. Fica instalado dentro do *Control*

Collar em um local isolado da pressão ambiente. Possui um conjunto de acoplamentos mecânicos que controlam o funcionamento do *Bias Unit*.

Conforme é mostrado na Figura 2.2, o processo de manutenção das ferramentas *push-the-bit* se divide em três grandes áreas, uma para cada módulo.

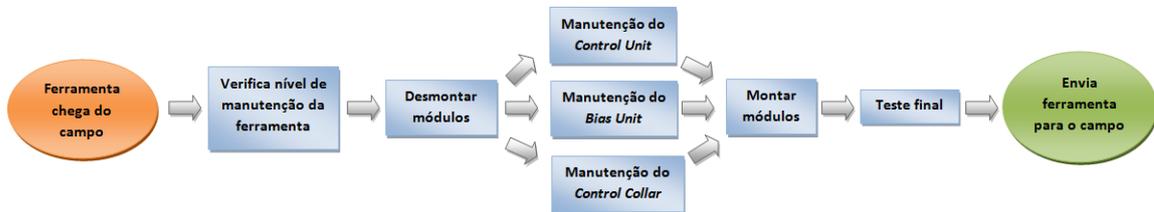


Figura 2.2: Fluxograma do processo de manutenção de ferramenta *push-the-bit*

O *Flow Loop Test* é a última etapa da manutenção do *Control Unit* e uma das mais importantes de todo o processo.

2.1: *Flow loop Test*

O desenvolvimento do projeto de melhorias do *Flow Loop Test* seguiu um conjunto de práticas originalmente desenvolvidas pela *Motorola* para melhorar sistematicamente os processos ao eliminar seus defeitos. Esse conjunto de práticas é conhecido como **Seis Sigma** ou **Six Sigma** [19]. Seis Sigma também é definido como uma estratégia gerencial para promover mudanças nas organizações, fazendo com que se chegue a melhorias nos processos, produtos e serviços para a satisfação dos clientes [18].

Projetos Six Sigma seguem duas metodologias inspiradas pelo *Plan-Do-Check-Act Cycle* de Walter A. Shewhart (amplamente difundidas por Edwards Deming, no Japão pós-guerra). Estas metodologias, compostas de cinco fases cada, são chamadas pelos acrônimos DMAIC e DMADV.

- **DMAIC** é usado para projetos focados em melhorar processos de negócios já existentes;
- **DMADV** é usado para projetos focados em criar novos desenhos de produtos e processos.

Para o *Flow Loop Test*, o método DMAIC foi escolhido para guiar a gestão do projeto. DMAIC significa *Define, Measure, Analyze, Improve e Control*.

- **Define:** é usado para definir o problema;
- **Measure:** coletar dados importantes e mensurá-los;
- **Analyze:** analisar as causas do problema e escolher a melhor solução;
- **Improve:** melhorar e otimizar o processo baseado na análise dos dados;
- **Control:** controlar o futuro estado de processo para se assegurar que quaisquer desvios do objetivo sejam corrigidos antes que se tornem em defeitos.

2.1.1: *Define*

A partir do DMAIC, a primeira etapa a ser seguida é definir o problema e delimitar o escopo do projeto. Para isso, foi feita uma análise junto ao time de engenheiros de manutenção de D&M sobre a atual situação do *Flow Loop Test* e então foi utilizada uma ferramenta chamada SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*) para delimitar o escopo do projeto. Os resultados foram:

- **Problema relacionado a custos:** durante toda a duração do teste, um dos dois técnicos responsáveis fica ocioso por mais da metade do tempo, o que significa uma subutilização de recursos humanos;
- **Problema relacionado a qualidade:** em média, de 10 a 20% dos testes apresentam retrabalho, e através de uma análise mais detalhada percebe-se que na maior parte das vezes esse retrabalho é resultado de erro humano.

O mapeamento da Figura 2.3 possibilita uma melhor visão sobre o escopo do processo bem como quais são seus fornecedores e clientes, mostrando os *inputs* necessários para o início do processo e quais são os *outputs* esperados depois do processo finalizado [20]. Para o *Flow Loop Test* é interessante notar que o time de *Directional Drilling* é, ao mesmo tempo, cliente e fornecedor do processo.

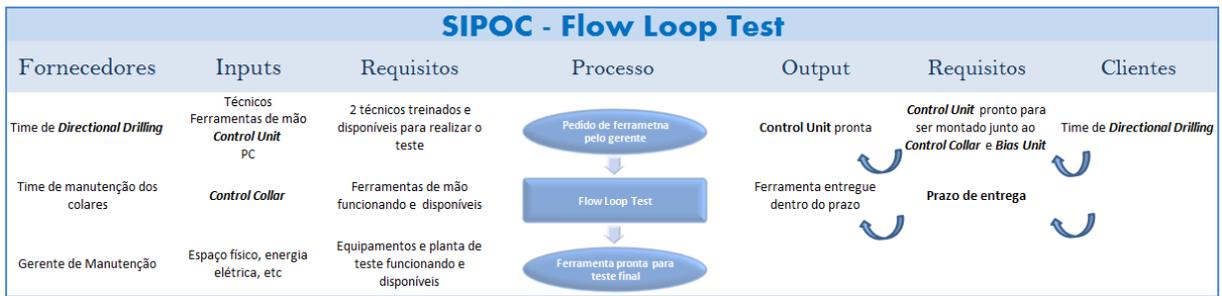


Figura 2.3: Análise SIPOC - *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*

2.1.2: Measure

Antes de mensurar os dados do *Flow Loop Test*, é preciso conhecê-lo. Para entender o processo e poder identificar os possíveis pontos de melhoria, o projeto mapeou todas as etapas do teste. A Figura 2.4 mostra uma visão geral do processo e a Figura 2.5 mostra cada uma das etapas em detalhes.



Figura 2.4: Visão geral do *Flow Loop Test*

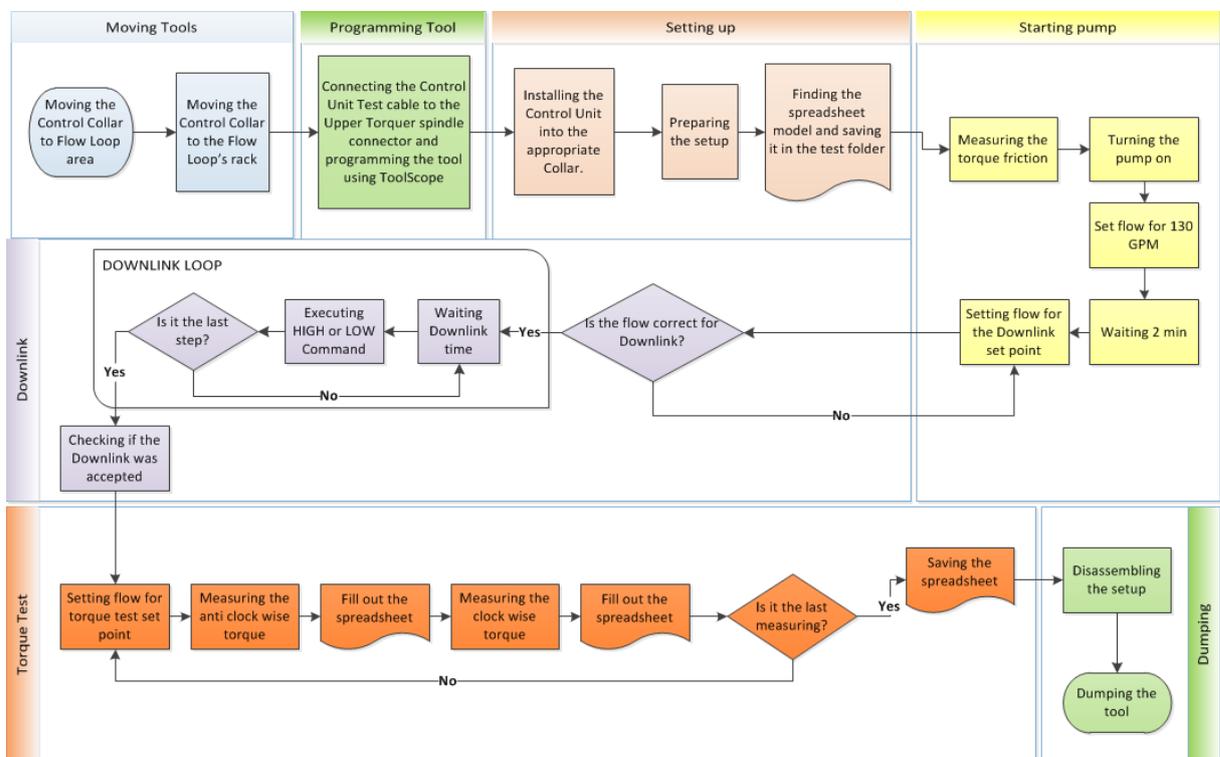


Figura 2.5: Fluxograma detalhado do *Flow Loop Test*

De forma resumida, o teste é constituído de 7 etapas. Primeiro é necessário

mover o *Control Collar* para o cavalete da planta. O tempo de movimentação da ferramenta varia bastante, pois depende da disponibilidade das talhas do chão de fábrica.

Logo em seguida, deve-se conectar um cabo entre o *Control Unit* e um computador para programar a ferramenta. Tendo a ferramenta programada, desconecta-se o cabo e inicia-se o procedimento de carregar o *Control Unit* para dentro do *Control Collar* e parafusá-lo. Em seguida, conectam-se as mangueiras no *Control Collare* abrem-se as válvulas da Figura 2.6.



Figura 2.6: Válvula do tipo esfera

A quarta etapa do teste é ligar o inversor de frequência, Figura 2.7, que controla a bomba d'água.



Figura 2.7: Inversor de Frequência

Na Figura 2.8, o número "3" aponta o motor, de potência superior a 40kW utilizado para bombear a água. O número "1" aponta o reservatório para cerca de nove mil litros de água e o número "2" mostra parte da linha que leva a água até a ferramenta.

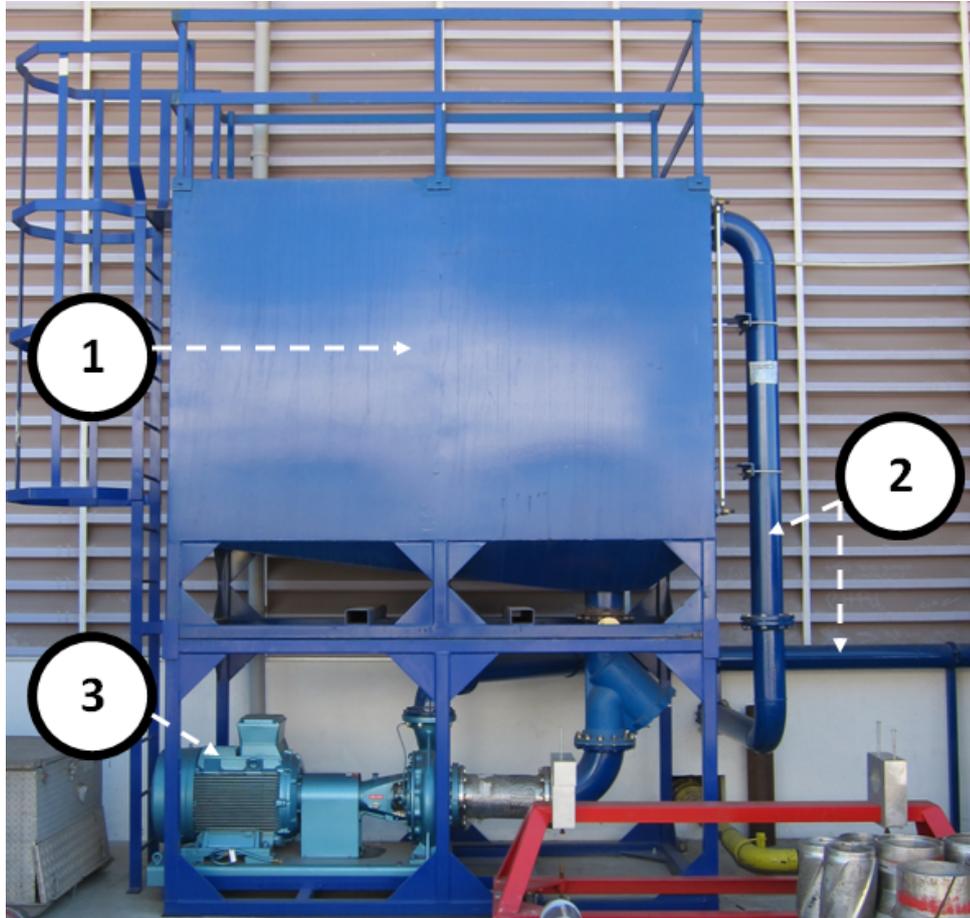


Figura 2.8: Motor de 400V utilizado para acionar bomba d'água e linha de vazão do teste.

Depois de ter a ferramenta montada e a bomba ligada, o próximo passo do teste é enviar um *downlink* para a ferramenta. *Downlink* é um procedimento que utiliza a mesma base teórica da telemetria do MWD, mas com objetivos diferentes. Algumas ferramentas de perfuração direcional, como as do tipo *push-the-bit* da SLB, podem ser reprogramadas para mudar a direção de perfuração no meio de uma operação, sem ter que trazer a ferramenta para superfície. Para isso, a pessoa responsável por realizar a perfuração (*directional driller*) pode enviar um *downlink* para a ferramenta.

Downlink nada mais é do que enviar um comando para a ferramenta utilizando uma sequência binária. Essa informação é enviada para dentro do poço através de pulsos de lama e interpretado pelo circuito eletrônico da ferramenta. Para identificar esses pulsos de lama, a ferramenta *push-the-bit* supervisiona, durante todo o tempo, a taxa de rotação de sua turbina e consegue inferir mudanças de vazão da lama. Para

enviar os pulsos de lama, o *directional driller* varia a taxa de bombeio de lama das bombas na superfície.

No *Flow Loop Test*, o downlink é simulado utilizando-se água no lugar da lama, e um inversor de frequência para controlar a vazão de fluido bombeado para a ferramenta.

O sexto e mais complexo passo do teste é o teste de torque. O teste de torque mede se o torque que o *Control Unit* está exercendo no *Bias Unit* é suficiente para o bom funcionamento da ferramenta. Para isso, um dos técnicos conecta um torquímetro no eixo da ferramenta e realiza as medidas de torque. Enquanto isso, o outro técnico confere no *display* do sensor de vazão, a vazão naquele exato instante. Após ter coletado o valor de torque e vazão no mesmo instante, os dados são inseridos em um software que calcula se a ferramenta está funcionando bem, ou não.

O teste de torque é feito para 7 diferentes *set-points* de vazão. Para cada *set-point* é realizada uma medida de torque no sentido horário e outra no sentido anti-horário.

O último passo do teste é desmontar todo o *set-up* e analisar os dados do teste que ficaram gravados na memória do *Control Unit*. Se todos os dados estiverem certos e os valores de torque estiverem dentro de faixas aceitáveis, a ferramenta está pronta para continuar seu ciclo de manutenção.

Identificando as Causas dos Problemas

Antes de projetar uma solução para os problemas de custo e qualidade relacionados com o *Flow Loop Test*, é preciso identificar as causas de cada um. Para identificar o problema de custo, foi realizado a modelagem do processo no decorrer do tempo, Figura 2.9. Analisando esse diagrama é possível ver que, após ajudar na movimentação da ferramenta, o técnico 2 fica ocioso por mais de 60% do teste. Esse tempo ocioso é a maior causa de desperdício no *Flow Loop Test* e será o foco das ações de redução de custo.

Para identificar a causa da alta taxa de retrabalho no teste, foi feito um estudo detalhado em cada bloco do fluxograma da Figura 2.5. Como resultado, foi identificado que na grande maioria das vezes em que o processo sofria retrabalho, a causa era erro humano. A Figura 2.10 mostra a fonte desses erros humanos: o *downlink*. Como *downlink* é uma forma de transmitir informação para a ferramenta por uma sequência

binária, os "zeros" e "uns" da sequência (que são pulsos positivos e negativos na vazão do fluido que passa pela ferramenta) devem ser enviados nos instantes corretos. Esse processo de *downlink* era feito de forma completamente manual pelos técnicos.

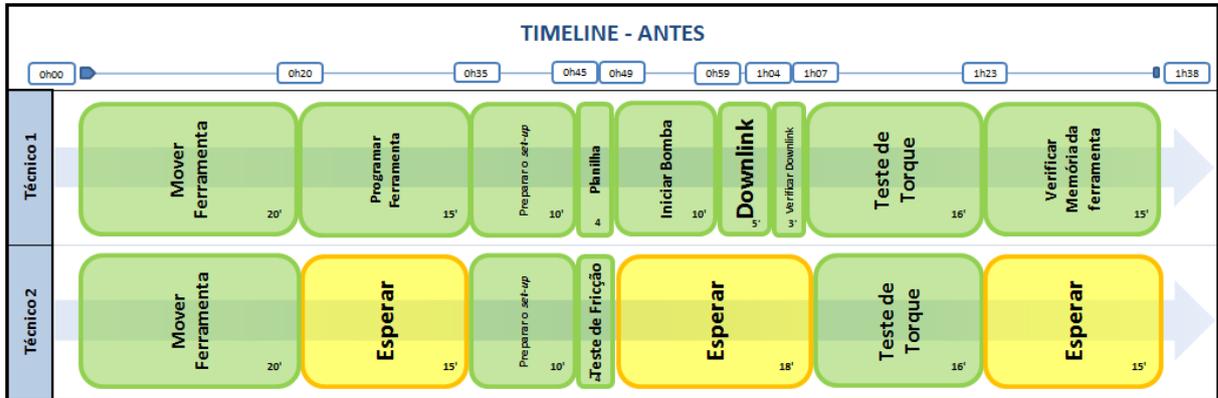


Figura 2.9: *Timeline* do processo antes do projeto.

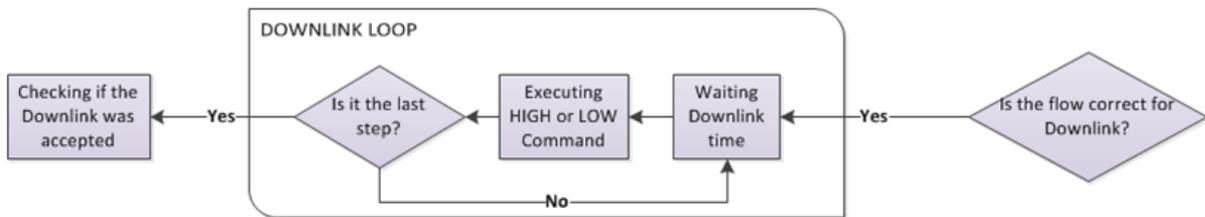


Figura 2.10: Processo feito manualmente pelos técnicos com alta taxa de erro humano

O técnico dispunha de um cronômetro, uma tabela com os tempos em que cada sinal binário deveria ser enviado para a ferramenta e um botão que envia os sinais "zeros" e "uns" para o inversor de frequência, Figura 2.11. Cada *downlink* dura em média 5 min e durante todo esse tempo o técnico deve enviar diversos "zeros" e "uns" para a ferramenta nos instantes exatos. Como essa atividade requer boa precisão e atenção total durante todo o tempo, é compreensível que a taxa de erro humano seja tão elevada.

2.1.3: *Analyze*

Para eliminar a necessidade do técnico 2 participar do teste, é necessário modificar 3 processos do *Flow Loop Test*, veja Figura 2.12.

1. O processo de **preparar o set-up** vinha sendo realizado por dois técnicos, uma vez que uma pessoa sozinha não conseguia movimentar e instalar o *Control Unit* no *Control Collar*. Entretanto, foi testado realizar esse mesmo processo



Figura 2.11: Controlador do inversor de frequência.

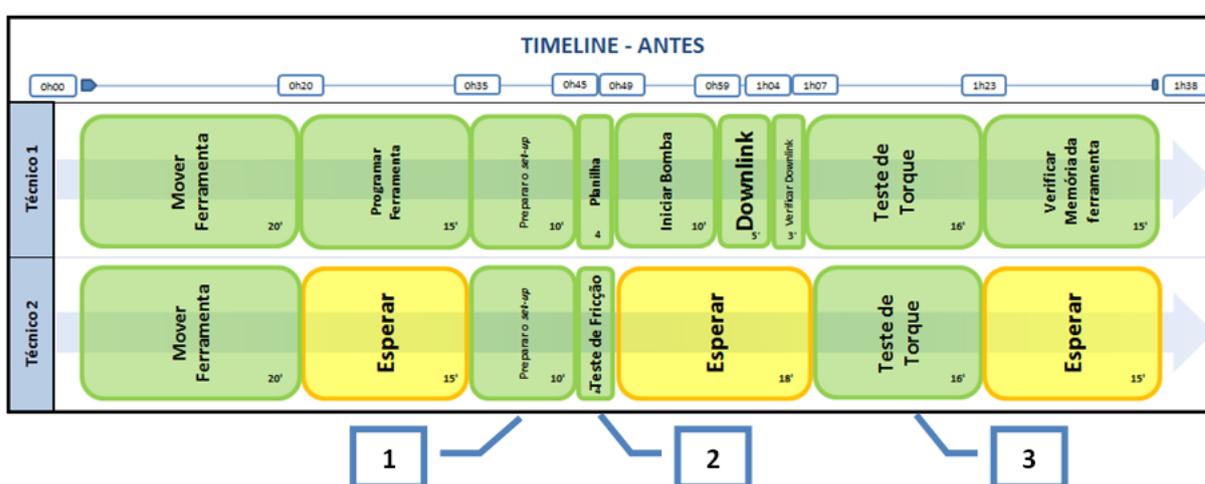


Figura 2.12: Processos do *Flow Loop Test* que devem ser alterados.

com apenas um técnico através de um *cart* (carrinho projetado para transporte de ferramentas) com regulagem de altura. Os resultados da utilização do *cart* foram muito bons e, com isso, o processo de "preparar o *set-up*" passou a ter sua realização factível por apenas um técnico.

2. O processo de realizar o **teste de fricção** pelo técnico 2 ao mesmo tempo que o técnico 1 prepara a planilha do *Flow Loop Test* poupava cerca de 5 min do tempo final do teste. Entretanto, o fato das duas atividades serem realizadas simultaneamente não era um requisito do processo, podendo então, ser realizado apenas por uma pessoa.
3. O **teste de torque** é o processo mais complexo de ser alterado. Como foi explicado anteriormente, o teste de torque envolve a medida do torque no eixo do *Control Unit* ao mesmo tempo que a deve-se medir a vazão do fluido que passa pela ferramenta. Para que esse processo seja factível por apenas um técnico, é

necessário que haja um software que receba em tempo real as medidas de torque e vazão e, ao comando do técnico, armazene os valores medidos naquele instante.

Para solucionar os problemas de erros humanos foi decidido automatizar o *downlink*. Para isso é necessário que haja um software em que o usuário possa escolher qual *downlink* ele deseja realizar. Esse software se comunicaria com uma placa de aquisição de dados que, por sua vez, controlaria o motor através do inversor de frequência.

Portanto, a solução a ser implementada deve ser capaz de ler em tempo real o valor da vazão na ferramenta, do torque no eixo do *Control Unit* e conseguir controlar o motor através de um software. Com isso, o processo de teste de torque e de *downlink* serão feitos de forma automática e coordenados por apenas um técnico.

2.1.4: Improve

Para o desenvolvimento da automação do teste foram impostas algumas restrições. A primeira é que o projeto deve ser de baixo custo e contar apenas com componentes locais (que podem ser comprados na cidade de Macaé ou com rápida entrega pela Internet). A segunda restrição é que o *set-up* do *Flow Loop Test* deve ter o mínimo de modificações possíveis. Por último, após a implementação do projeto, deverá ainda ser possível realizar todo o procedimento de forma manual, para eventuais falhas no projeto e/ou a realização de um teste fora das especificações do sistema.

A parte de desenvolvimento técnica do projeto está registrada nos capítulos posteriores.

2.1.5: Control

Após a finalização do projeto de estágio, o time de manutenção de ferramentas direcionais foi treinado para utilizar o sistema desenvolvido. A equipe de engenharia de manutenção de D&M ficou responsável por futuras melhorias no processo e divulgação dos resultados obtidos para outras bases da Schlumberger.

No capítulo de conclusão será abordado com maiores detalhes os resultados do projeto.

2.2: Cronograma

O desenvolvimento do projeto foi dividido em três estágios. O primeiro estágio contou com o desenvolvimento do hardware, representado pela placa de aquisição de dados. O segundo estágio contou com o desenvolvimento do software e da interface do sistema com a leitura de torque. Por último, foi feita uma pesquisa com o time de manutenção da ferramenta *push-the-bit* para realizar melhorias de projeto baseado na experiência dos usuários.

Tabela 2.1: Planejamento do estágio 1 do projeto

Estágio 1	
Tarefa	Duração (sem.)
Especificação/Projeto de placa de aquisição de dados	2
Comunicação entre a placa de aquisição de dados e o inversor	2
Leitura do sensor de vazão através da placa	2
Implementação de controlador PI	1

Tabela 2.2: Planejamento do estágio 2 do projeto

Estágio 2	
Tarefa	Duração (sem.)
Desenvolvimento da interface gráfica do software	2
Implementação de protocolo de comunicação com a placa	1
Implementação de protocolo de comunicação com torquímetro	1
Prototipagem do sistema	2

Tabela 2.3: Planejamento do estágio 3 do projeto

Estágio 3	
Tarefa	Duração (sem.)
Acompanhamento de uso do protótipo e levantamento de melhorias	1
Implementação de melhorias no projeto	1

Capítulo 3: *Hardware*

A parte de *hardware* necessária para automatizar o processo é composta, basicamente, de uma placa eletrônica capaz de controlar a bomba d'água, adquirir o sinal de saída do transmissor de vazão e trocar informações com um sistema supervisório instalado em um computador.

Para projetar a placa, primeiro é preciso conhecer o funcionamento do inversor de frequência que aciona a bomba e, em seguida, do medidor de vazão.

3.1: Inversor de Frequência

Inversor de Frequência é um dispositivo elétrico ou eletromecânico capaz de converter um sinal elétrico CC (corrente contínua) em um sinal elétrico CA (corrente alternada). Para converter um sinal de tensão ou corrente contínua em alternada, os inversores usam componentes eletrônicos como transistores, IGBTs ou MOSFETs para chavear o sinal de entrada [23]. Existem diversas aplicações para os inversores de frequência, entre elas está o acionamento de motores elétricos. No Apêndice A é explicado de forma mais detalhada como funciona um inversor de frequência e quais são as suas vantagens.

Para controlar a bomba d'água, a placa eletrônica a ser desenvolvida nesse projeto deve conseguir controlar a frequência do motor de indução que bombeia água para a ferramenta. Como o inversor já possui todo interfaceamento de controle do motor, o problema do projeto consiste em controlar o *set-point* da referência de frequência do inversor. Para que seja possível desenvolver um sistema capaz de enviar esse sinal de referência para o inversor, é necessário conhecer um pouco melhor como ele funciona. A Figura 3.1 mostra os principais blocos que compõem um inversor de frequência.

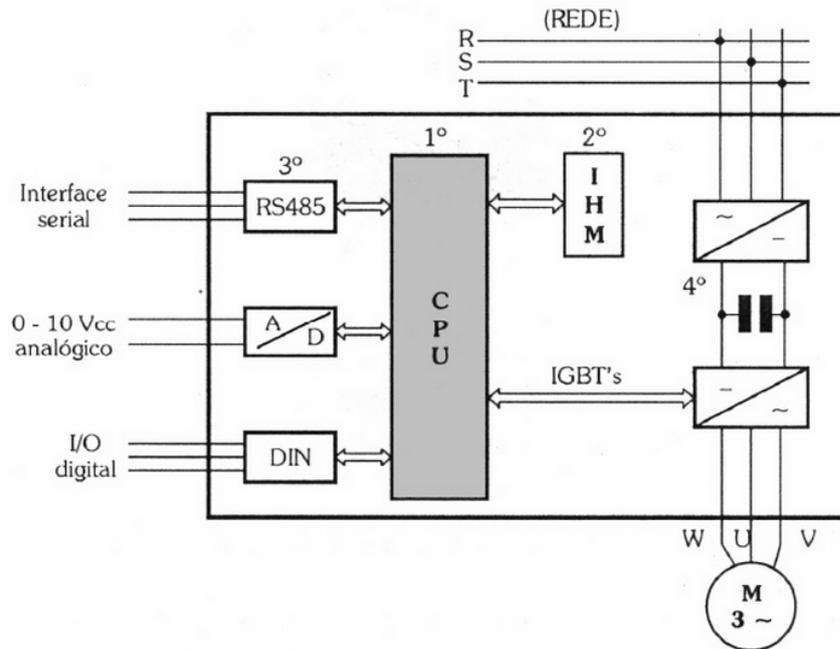


Figura 3.1: Blocos de um inversor de frequência [21].

3.1.1: 1º Bloco - CPU

A CPU (Unidade Central de Processamento) de um inversor de frequência pode ser formada por um microprocessador ou por um microcontrolador. Isso depende apenas do fabricante. De qualquer forma, é nesse bloco que todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenadas, visto que também uma memória está integrada a esse conjunto. A CPU não apenas armazena os dados e parâmetros relativos ao equipamento, como também executa a função mais vital para o funcionamento do inversor: geração dos pulsos de disparo, por meio de uma lógica de controle coerente para os IGBT's [21].

3.1.2: 2º Bloco - IHM

O segundo bloco é a IHM (Interface Homem Máquina). É através desse dispositivo que podemos visualizar o que está ocorrendo no inversor (*display*) e configurá-lo de acordo com as necessidades da aplicação. A Figura 3.2 mostra o IHM do inversor utilizado nesse projeto.



Figura 3.2: *Display* de controle do inversor modelo Varispeed E7 - Yaskawa

3.1.3: 3º Bloco - Interfaces

A maioria dos inversores pode ser comandada por dois tipos de sinais: analógicos ou digitais. Normalmente, quando deseja-se controlar a velocidade de rotação de um motor AC no inversor, utilizamos uma tensão analógica de comando. Essa tensão se situa entre 0 a 10 Vcc. A velocidade de rotação (RPM) é proporcional ao seu valor, por exemplo: 1 Vcc = 1000 RPM, 2 Vcc = 2000 RPM. Para inverter o sentido de rotação, basta inverter a polaridade do sinal analógico (de 0 a 10 Vcc sentido horário e -10 a 0 Vcc sentido anti-horário). Além da interface analógica, o inversor possui entradas digitais. Com um parâmetro de programação, podemos selecionar a entrada válida (analógica ou digital) [21]. A Figura 2.11 mostra como o usuário pode controlar as entradas analógicas do inversor.

3.1.4: 4º Bloco - Etapa de potência

A etapa de potência é constituída por um circuito retificador, que alimenta (através de um circuito intermediário denominado "barramento DC") o circuito de saída do inversor (módulo IGBT).

Antes da implementação do projeto, a referência de frequência do inversor era ajustada através do módulo manual de controle mostrado na Figura 2.11. Esse controlador manual enviava um sinal analógico de tensão para o inversor, que por sua vez controlava a frequência do motor. Como especificação do projeto, visando evitar alterações no *set-up* do teste, a placa eletrônica a ser desenvolvida deverá usar também um sinal analógico de tensão para controlar o inversor. A ideia é desenvolver um projeto em que não seja necessário modificar nenhuma configuração do inversor,

sendo possível que o usuário possa optar em realizar o teste de forma manual ou automática apenas mudando a posição de uma chave no módulo de controle. A Figura 3.3 mostra esse conceito.



Figura 3.3: Módulo de controle do inversor - Posição *automático* e *manual*

3.2: Transmissor de vazão

Atualmente, inúmeros instrumentos capazes de medir a vazão volumétrica de um fluido são utilizados na indústria. Esses instrumentos podem utilizar diversos princípios de funcionamento, como por exemplo, medidores por obstrução, mostrado na Figura 3.4, medidores por deslocamento positivo, Figura 3.5 e medidores eletromagnéticos, Figura 3.6. Em [26] é demonstrado a teoria por trás da maioria dos instrumentos de medição de vazão utilizados na indústria.

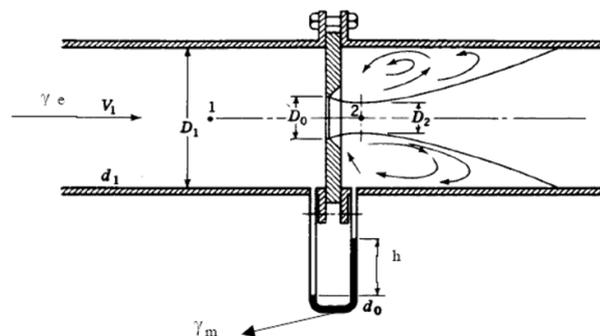


Figura 3.4: Medidor de vazão por placa de orifício

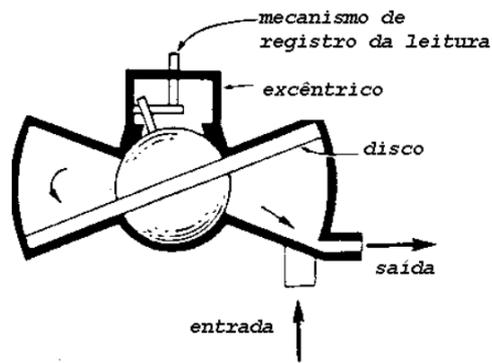


Figura 3.5: Medidor de vazão por deslocamento positivo

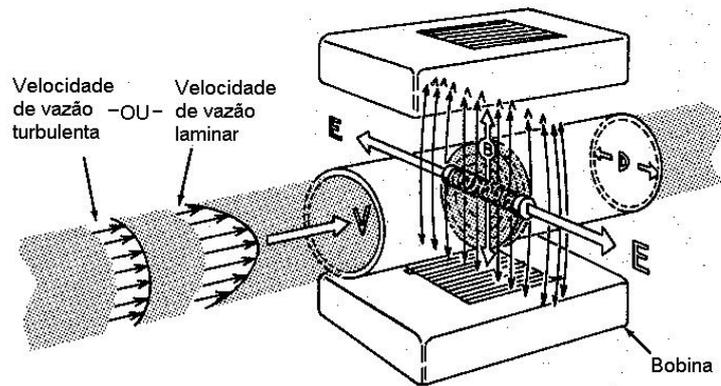


Figura 3.6: Medidor eletromagnético de vazão

Entre os três medidores de vazão mostrados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, o medidor eletromagnético se destaca por não interferir no escoamento do fluido, evitando perdas de cargas. Além disso, a sua utilização independe do conhecimento de propriedades do fluido, quer sejam termo-físicas (viscosidade) ou termodinâmicas (massa específica, temperatura, pressão) [26]. Contudo, os medidores eletromagnéticos exigem que o fluido tenha uma condutividade elétrica mínima. O Apêndice B detalha melhor o funcionamento de medidores eletromagnéticos de vazão.



Figura 3.7: Medidor *SITRANS F M MAGFLO Mag5000*, *Siemens*

O transmissor de vazão utilizado no *Flow Loop Test* é o modelo *SITRANS FM MAGFLO Mag5000* da *Siemens*, um tipo de medidor eletromagnético, Figura 3.7. O *Mag5000* possui circuitos eletrônicos que amplificam o sinal do sensor, o filtram, corrigem não-linearidades e o convertem para um sinal de saída, digital ou analógico. Em aplicações industriais, é comum que os transmissores de vazão utilizem sinais de saída do tipo analógico, através correntes elétricas na faixa de 4 a 20 mA.

3.3: Projeto da Placa de Aquisição de Dados

A placa eletrônica de aquisição de dados deve ser capaz de receber um sinal de corrente (4 a 20 mA) do sensor de vazão; controlar o inversor de frequência através de um sinal de tensão (0 a 10 V) e, ao mesmo tempo, se comunicar em tempo real com o software supervisor que estará sendo executado no computador. Para atender aos requisitos de projeto, foi definido o uso de uma placa microcontrolada chamada Arduino, Figura 3.8.

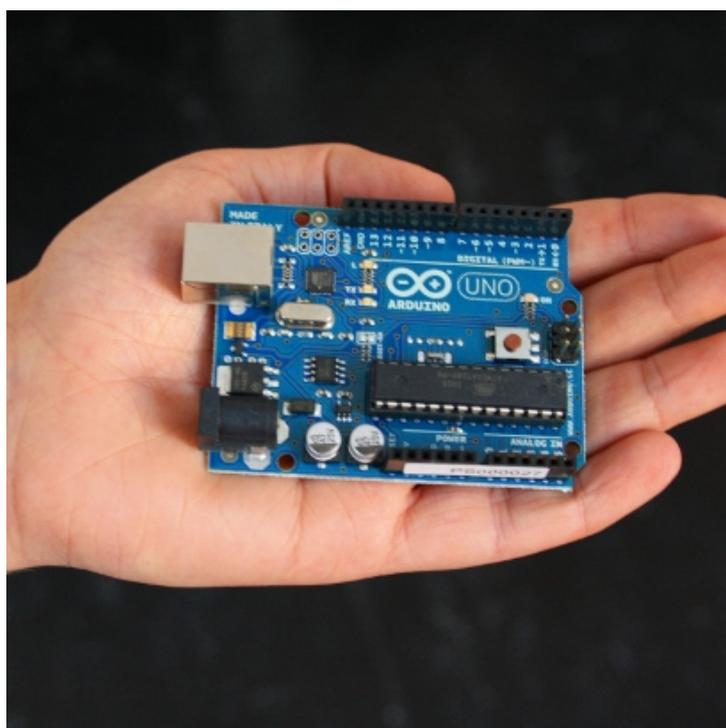


Figura 3.8: Placa *Arduino Uno*

Arduíno é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, ou também chamada de *open-hardware*, que significa que a placa pode ser adquirida em alguma loja ou montada pelo próprio usuário através de manuais disponibilizados na internet. A placa é projetada com um microcontrolador *Atmel AVR*, com suporte

de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão, na qual tem origem em *Wiring*, e é essencialmente C/C++. Arduino pode ser usado no desenvolvimento de sistemas *stand-alone*, que funcionam de forma independente, ou em sistemas controlados por softwares em execução em algum computador [27].

A plataforma Arduino vem ganhando bastante mercado nos últimos anos e, atualmente, conta uma grande variedade de placas projetadas com propósitos específicos para diferentes tipos de operação. Nesse projeto, a placa utilizada foi a *Arduino Duemilanove*, com processador *ATmega328*. Essa placa conta com 14 pinos de entrada/saída digitais, sendo que 6 deles podem ser configurados para fornecer saída com PWM. Também estão presentes 6 pinos de entrada analógica e um cristal oscilador de 16 MHz.

A escolha pela placa Arduino se deu por inúmeras razões, entre elas está a rápida curva de aprendizagem; baixo custo; alta flexibilidade e fácil suporte para desenvolvedores, pela Internet. A placa atende às especificações do projeto, uma vez que possui entradas analógicas para leitura da vazão e saída PWM para acionamento do inversor. No Apêndice A é demonstrado como funciona um sinal PWM.

Com o uso do Arduino, o projeto de *hardware* se torna muito mais simples, já que a placa *Duemilanove* possui funcionalidades intrínsecas de placas de aquisição de dados, sendo extremamente fácil programá-la para enviar valores de leitura para um software e receber *set-points* para as suas saídas digitais e PWM. Sendo assim, o problema do projeto de hardware se limita a desenvolver os circuitos de interfaceamento do Arduino com o inversor e com o transmissor de vazão. Nas próximas seções será relatado como foi o projeto desses circuitos e quais foram as dificuldades encontradas.

3.3.1: Projeto de Circuito para Controle do Inversor

O inversor *Varispeed E7* conta com um módulo de entrada analógica para controle da referência de frequência do motor. Essa entrada analógica pode ser um sinal de tensão de 0 a 10 V ou um sinal de corrente de 4 a 20 mA. Por padrão, o inversor utiliza o sinal de tensão como entrada.

O inversor possui uma fonte de tensão de 15 V, sinal $+V$, uma referência de 0 V, sinal *AC*, e um canal de entrada *A1*, veja a Figura 3.9. O módulo de controle manual da Figura 3.3 utiliza um potenciômetro de 2 k Ω para dividir a tensão da fonte e controlar

o valor do sinal *A1*.

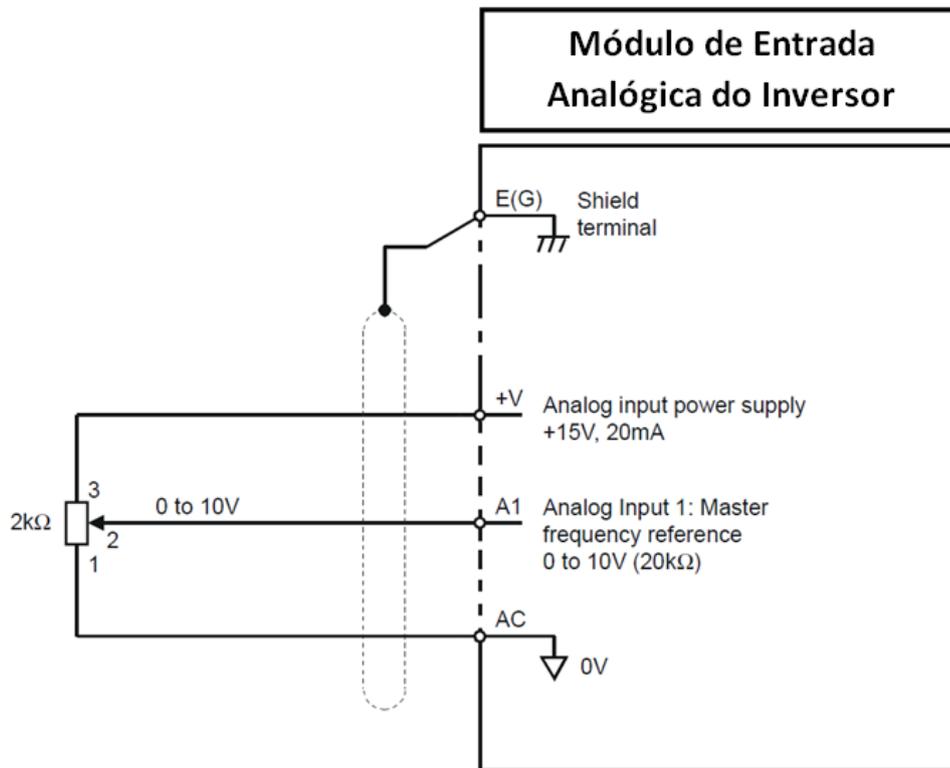


Figura 3.9: Módulo de entrada analógica do inversor de frequência - Sinais *+V*, *A1* e *AC*

Tabela 3.1: Sinais do módulo de entrada analógico do inversor

Sinal	Descrição
<i>+V</i>	sinal de 15 V vindo da fonte do inversor
<i>A1</i>	sinal de controle de 0 a 10 V para o inversor
<i>AC</i>	sinal de 0 V vindo da fonte do inversor

Para controlar o valor de tensão do sinal *A1*, veja Tabela 3.1, será utilizado o sinal de saída PWM do Arduino. Para isso, é preciso estar atento a alguns detalhes. Primeiro, o sinal PWM do Arduino opera na faixa de 0 a 5 V, enquanto o sinal *A1* opera entre 0 e 10 V. Além disso, como os circuitos são independentes pode haver problemas de aterramento, ou problemas de acoplamento. Isso significa, de forma grosseira, que a referência de 0 V para o Arduino pode não significar 0 V para o inversor, o que pode causar diversos problemas no funcionamento da placa.

É possível resolver o problema da faixa de operação do sinal PWM do Arduino através de transistores bipolares. O princípio do transistor é poder controlar a corrente que passa entre dois dos seus terminais. Ele é montado em uma estrutura de cristais semicondutores, formada por três camadas. Cada uma dessas camadas recebe

um nome em relação à sua função na operação do transistor. As extremidades são chamadas de emissor e coletor, e a camada central é chamada de base.

Os transistores funcionam de forma a liberar a passagem de corrente entre o coletor e emissor quando há uma determinada corrente na base. A corrente necessária na base do transistor pode ser de ordem muito inferior à corrente que passa entre os outros terminais. Os transistores bipolares podem ser do tipo PNP ou NPN, Figura 3.10.

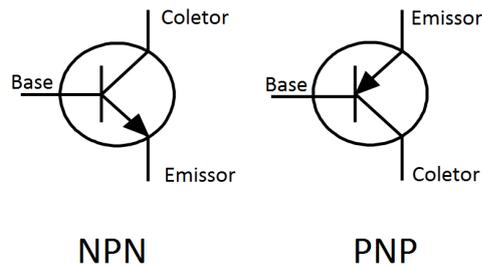


Figura 3.10: Transistores bipolares NPN e PNP

Existem centenas de formas diferentes para a utilização dos transistores. Nesse trabalho vamos utilizá-los como amplificadores e como chaves "liga-desliga", em inglês *switches*. Para amplificar a escala do sinal PWM de 0 a 5 V para 0 a 10 V, é necessário que haja um fonte que forneça uma tensão de, pelo menos, 10 V. Como o sinal PWM é uma onda quadrada, quando ele estiver em nível alto a saída do Arduino irá gerar um sinal de 5 V, quando ele estiver em nível baixo a saída será de 0. Assim, se o pino de saída do Arduino for conectado em um resistor de valor R , toda vez que o PWM estiver em nível alto será gerada uma corrente i que entrará na base de um transistor bipolar NPN. O transistor, por sua vez, chaveará o sinal da fonte e, com isso, amplificará a saída PWM. A Figura 3.11 mostra o esquemático desse circuito.

O uso do circuito da Figura 3.11 em teoria resolve o problema do controle do inversor, uma vez que é possível utilizar os sinais $+V$ e AC como uma fonte externa. Na prática, esse circuito não se mostrou uma boa opção. Todas as vezes que o circuito era montado e iniciava-se os testes para controlar a referência de frequência do inversor, a placa do Arduino reinicializava sozinha e cortava a comunicação com o computador. A razão desse comportamento instável é que, com esse tipo de acoplamento entre os circuitos, muitos ruídos e picos de corrente vinham do inversor de frequência até o Arduino, o que causava o mal funcionamento do mesmo.

Para desacoplar eletricamente os circuitos é necessário a utilização de optoacopladores. Optoacopladores, também conhecidos como optoisoladores ou fotoisola-

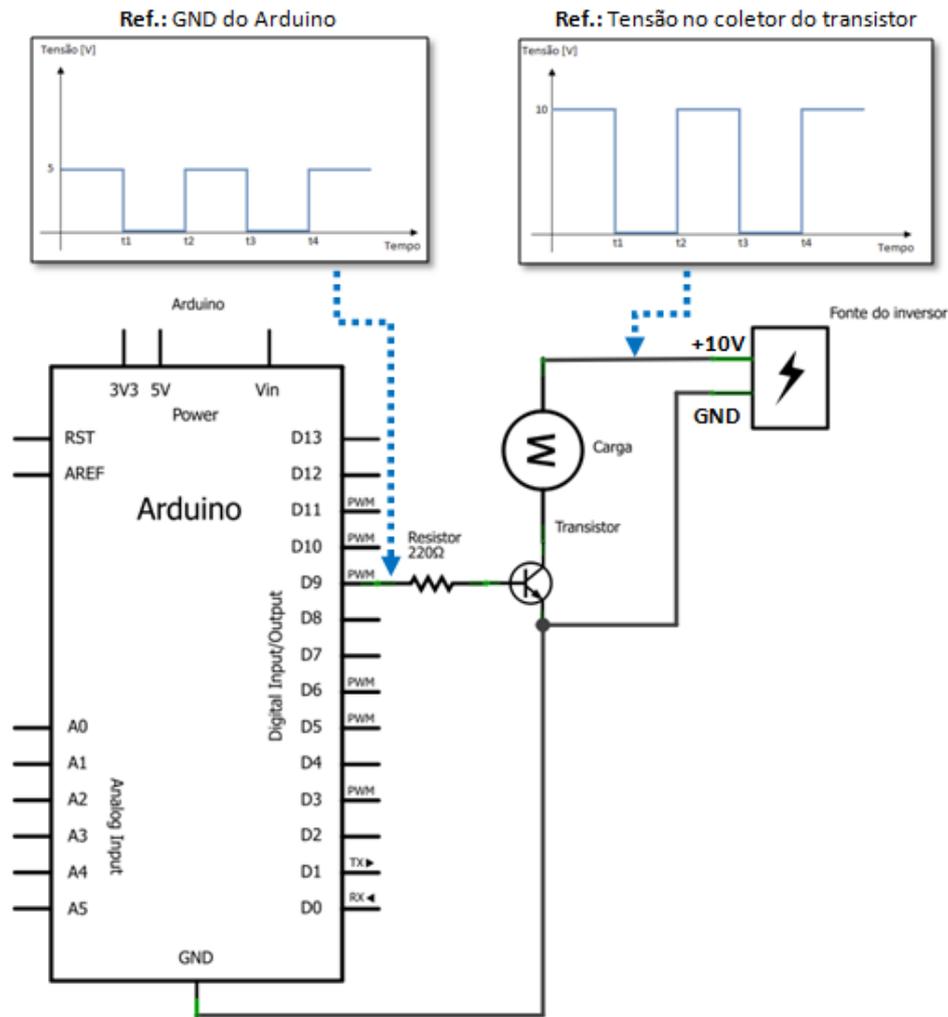


Figura 3.11: Utilizando transistor para amplificar sinal PWM do Arduino

dores, são componentes eletrônicos projetados para transferir sinais elétricos através de ondas de luz, isolando eletricamente dois circuitos diferentes. A ideia principal do uso de optoacopladores é "evitar que altas tensões, ou variações rápidas de tensão, de um lado do circuito cause danos no circuito do outro lado" [29].

A ligação ótica utilizada pelos optoacopladores se dá entre um diodo emissor de luz e um outro componente sensível a luz, como por exemplo um foto transistor. No caso do foto transistor, o feixe de luz emitido pelo diodo age como uma corrente na base de um transistor bipolar, chaveando os terminais do coletor e emissor. Os optoacopladores são projetados para resistir a altas voltagens (500 V a 10 kV) entre sua entrada e saída. Esse é o principal parâmetro que indica a sua função de isolador elétrico. A Figura 3.12 mostra o esquema do circuito integrado (CI) de um optoacoplador.

Como o optoacoplador já utiliza um foto transistor, ele pode ser utilizado para

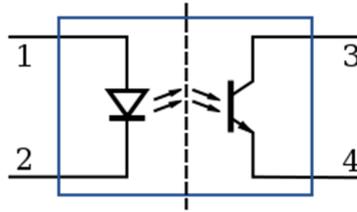


Figura 3.12: Princípio de funcionamento dos optoacopladores

resolver o problema da ampliação do sinal PWM discutido anteriormente, sem a necessidade do uso de outro transistor. A Figura 3.13 mostra o circuito final para controle do inversor. O funcionamento básico do circuito é o mesmo da Figura 3.11, com a diferença de que o terra do Arduino não está conectado junto à referência de 0 V do inversor.

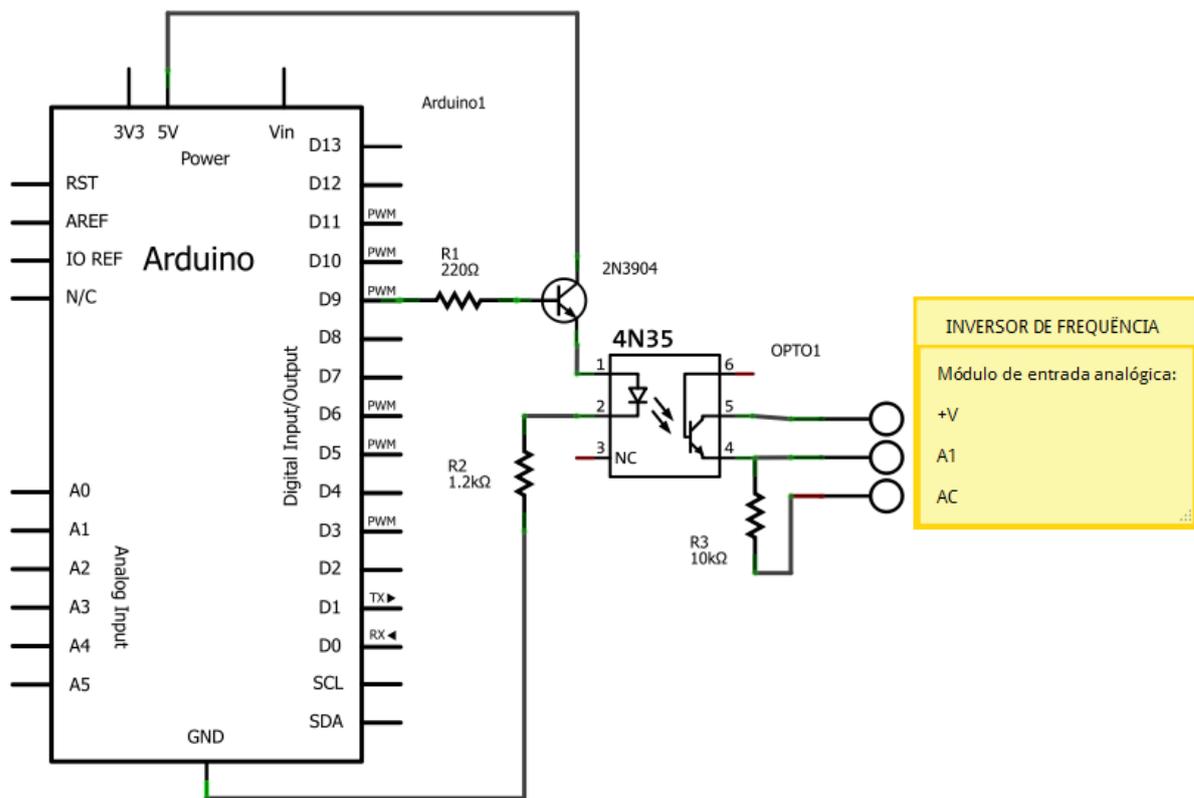


Figura 3.13: Circuito para controle da entrada analógica do inversor de frequência

3.3.2: Projeto de Circuito para Leitura da Vazão

O circuito projetado para ler o sinal de corrente vindo do transmissor de vazão é bastante simples. Através da Figura 3.14 é possível notar que o transmissor utiliza dois cabos para transmitir o sinal. Um cabo é conectado no pino 31 (daqui pra

frente chamado de S+), de onde parte a corrente, e outro no pino 32 (daqui pra frente chamado de S-), por onde a corrente retorna ao transmissor fechando o *loop*.

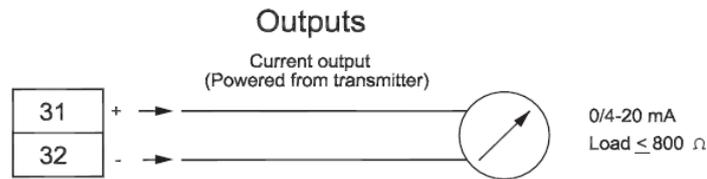


Figura 3.14: Módulo de saída analógica do transmissor de vazão *Mag5000*

A entrada analógica do Arduino consegue ler um sinal de tensão de 0 a 5 V, drenando uma corrente máxima de 40 mA por pino. A leitura de tensão nessa faixa de operação é feita com uma resolução de 10 bits, o que significa que um sinal de 5 V é dividido em 1024 (2^{10}) partes, sendo, portanto, a placa capaz de identificar um alteração de aproximadamente 0,5 mV ($\frac{5V}{1024}$) no sinal.

Como o sinal analógico que vem do transmissor é um sinal de corrente, é preciso utilizar um valor de resistência conhecido para que a tensão sobre ele seja medida pela placa e o valor da vazão seja inferido. Partindo da Lei de Ohm, em que $U = R \cdot i$, onde U é o sinal de tensão, R a resistência e i a corrente, se temos uma corrente máxima de 20 mA, e para esse valor devemos ter uma tensão máxima de 5 V, a resistência a ser utilizada no circuito deve ser de, no máximo, 250Ω , $R = \frac{U}{i}$. A Figura 3.15 esquematiza esse circuito.

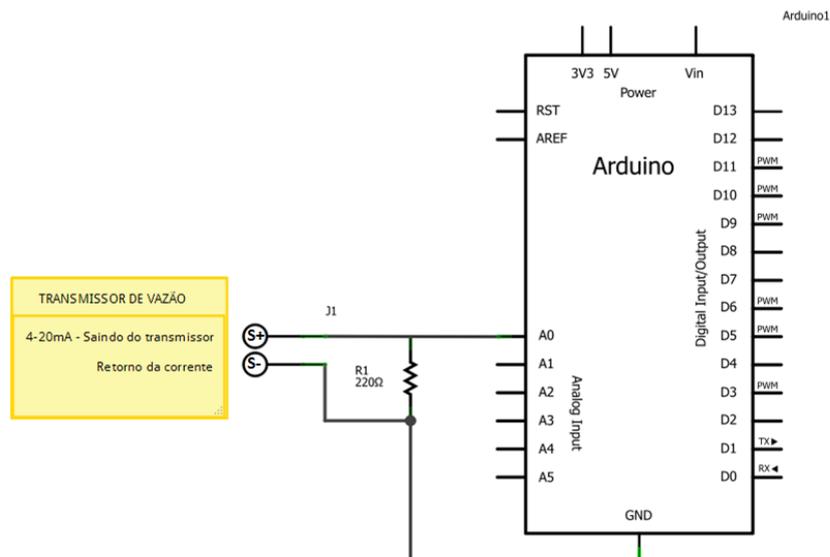


Figura 3.15: Princípio de funcionamento do circuito utilizado para ler sinal de corrente

Entretanto, o circuito mostrado na Figura 3.15 não funcionou na prática. Da mesma forma que no circuito utilizado para controlar o inversor não foi possível aterrar

o Arduino em comum com o sinal de 0V da fonte, não foi possível fazer o mesmo com o circuito de leitura da vazão. Sendo assim, foi necessário mais uma vez o uso de optoacopladores para isolar eletricamente os circuitos.

Antes de projetar um circuito utilizando optoacopladores, foi necessário estudar a relação entrada/saída desse componente para diferentes valores de corrente. Para realizar o estudo foi feito um teste com o componente *4N35*, conectando uma fonte de corrente na entrada do diodo, alimentando o coletor do transistor com uma fonte de 5V e conectando o emissor em uma das entradas analógicas do Arduino. A Figura 3.16 mostra o circuito montado para o teste.

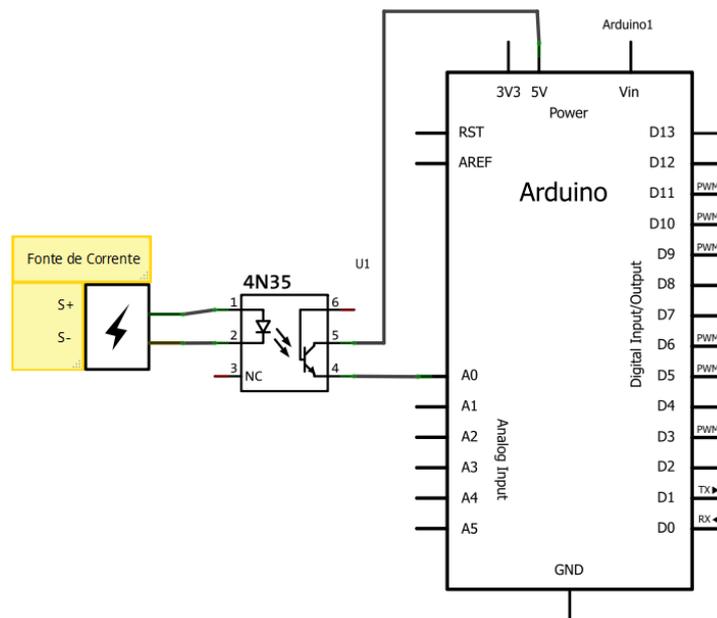


Figura 3.16: Teste da relação entrada-saída do optoacoplador *4N35*

O teste foi realizado variando a corrente na entrada do optoacoplador de 4 a 40mA e medindo a leitura da porta analógica do Arduino (valores de 0 a 1024). A Figura 3.17 mostra os resultados desse teste, em que foi possível notar um forte comportamento não linear do optoacoplador. Entretanto, o optoacoplador apresentou um comportamento razoavelmente linear para valores de até 14mA. Veja a Figura 3.18.

Para contornar o problema da não-linearidade, foi projetado um divisor de corrente para fazer com que a corrente que entra no optoacoplador esteja dentro da faixa de operação desejada.

Como pode haver variações no comportamento de cada componente, foi incluído um *trimpot* no circuito. *Trimpot* nada mais é do que um resistor variável, em que o usuário pode alterar seu valor dentro de uma determinada faixa. A Figura 3.19

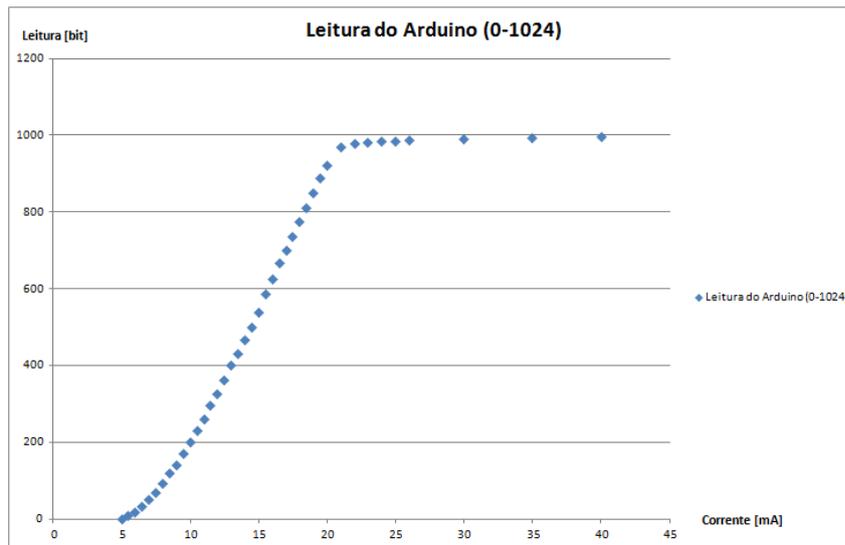


Figura 3.17: Resultados do teste da relação entrada-saída do optoacoplador 4N35



Figura 3.18: Faixa de operação aproximadamente linear do optoacoplador 4N35

mostra o circuito completo de leitura do sinal de corrente.

É possível notar no circuito da Figura 3.19 um resistor e um capacitor entre o optoacoplador e a porta de entrada analógica do Arduino. Esses dois componentes formam um filtro passa-baixa que foi projetado para filtrar ruídos de alta frequência. A frequência de corte do filtro (f_c) deve ser próxima a 2 Hz, portanto a constante de tempo RC , que é calculada por $RC = \frac{1}{2\pi f_c}$, deve ser aproximadamente 10^{-1} s. Em [30] são demonstradas maiores informações sobre filtros passa-baixa.

A Figura 3.20 mostra o sinal lido pela placa sem a utilização do filtro e a Figura 3.21 mostra o sinal filtrado.

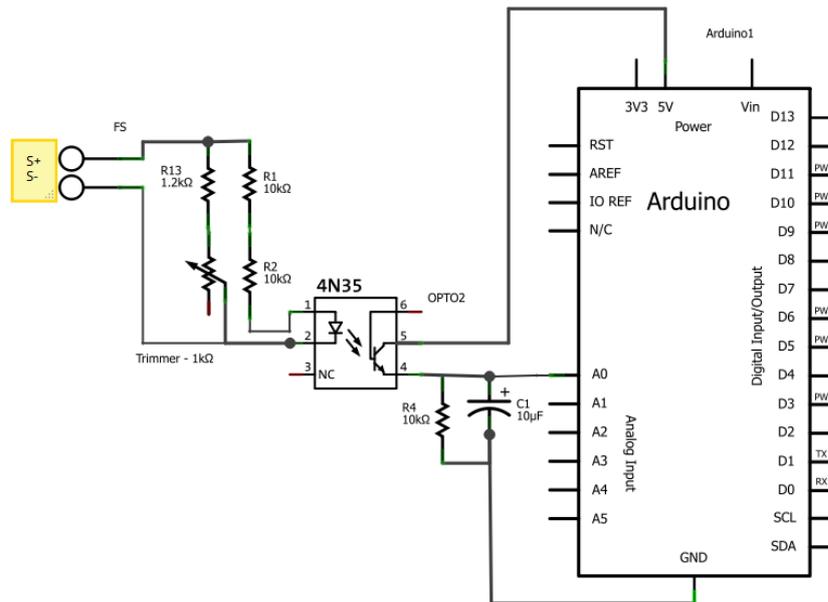


Figura 3.19: Circuito para leitura do sensor de vazão

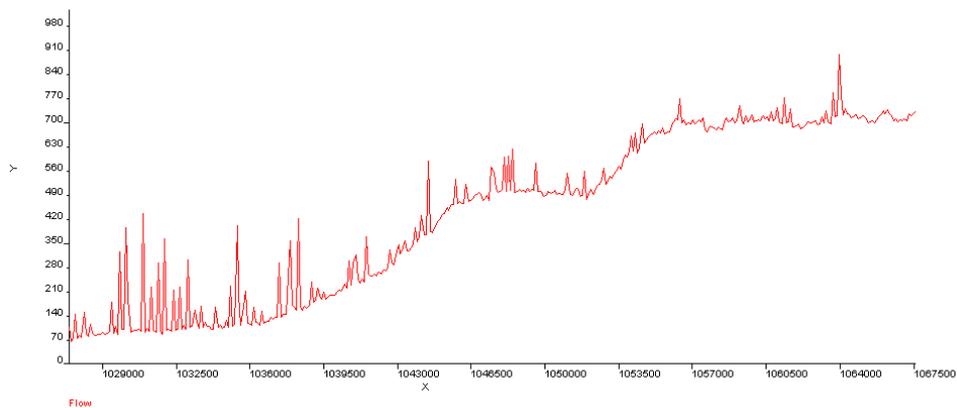


Figura 3.20: Sinal de corrente com ruído

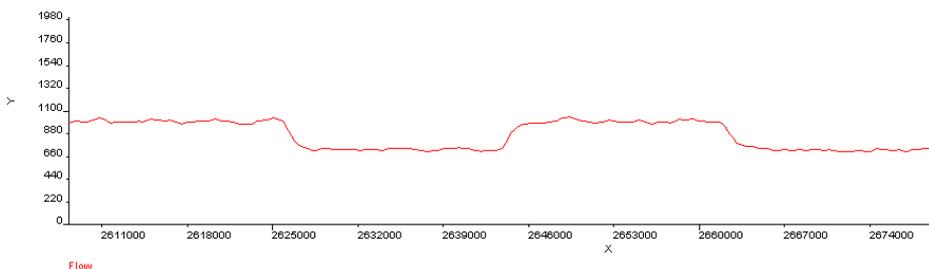


Figura 3.21: Sinal de corrente filtrado

3.4: Prototipagem

O circuito completo do projeto envolveu a junção dos circuitos das Figuras 3.19 e 3.13. A Figura 3.22 mostra o circuito final. Nesse circuito foi acoplado também um

buzzer para que o sistema seja capaz de enviar sinais sonoros de sinalização para os usuários. O Anexo B apresenta a lista completa de componentes utilizados no protótipo.

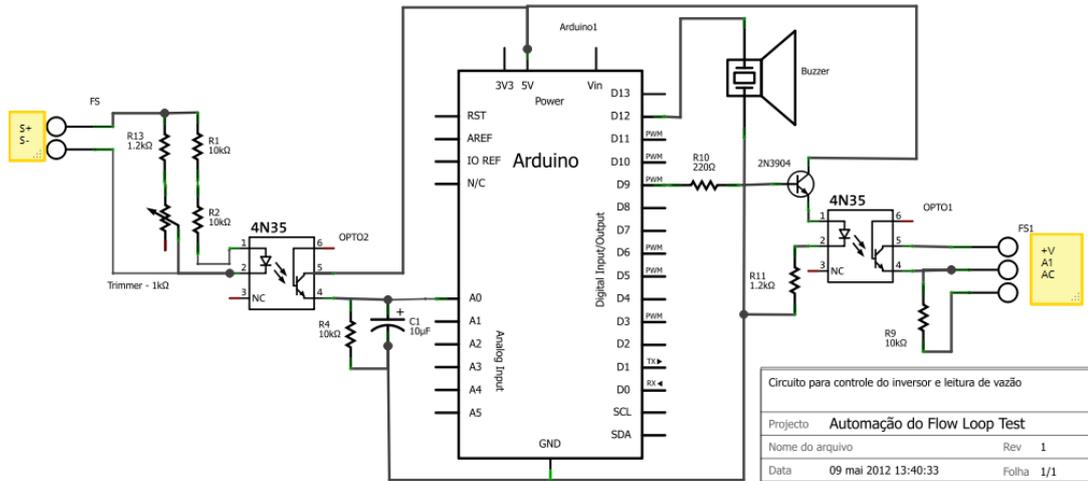


Figura 3.22: Circuito final do projeto

Após ter o esquema do circuito pronto e ter feito vários testes em uma *protoboard*, foi desenvolvido um protótipo. A primeira etapa para a construção do protótipo foi a fabricação de uma placa de circuito impressa (PCB) com o esquema da Figura 3.22.

Para a criação da PCB foi utilizada uma versão de testes do software *EAGLE PCB Software*. O software se mostrou bastante intuitivo e prático. A Figura 3.23 mostra o circuito da PCB.

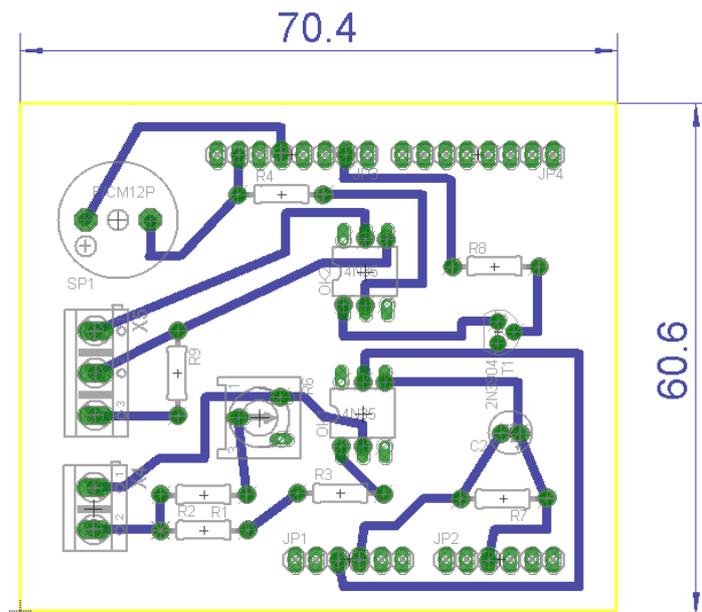


Figura 3.23: Placa de circuito impressa com escala em mm

A Fabricação da PCB foi feita de forma completamente manual. De forma resumida, o circuito da Figura 3.23 foi impresso em papel fotográfico em uma impressora a laser; em seguida o desenho foi transferido para uma placa de fenolite utilizando um ferro de passar roupas. Após ter o desenho do circuito estampado na placa, foi utilizado perclorato de ferro para corroê-la. O procedimento completo pode ser encontrado em [31]. Por fim, a placa foi furada e os componentes eletrônicos soldados, como pode ser visto na Figura 3.24.



Figura 3.24: Soldagem de componentes eletrônicos

A Figura 3.25 mostra como ficou o protótipo do *hardware* do projeto de automação do *Flow Loop Test*.

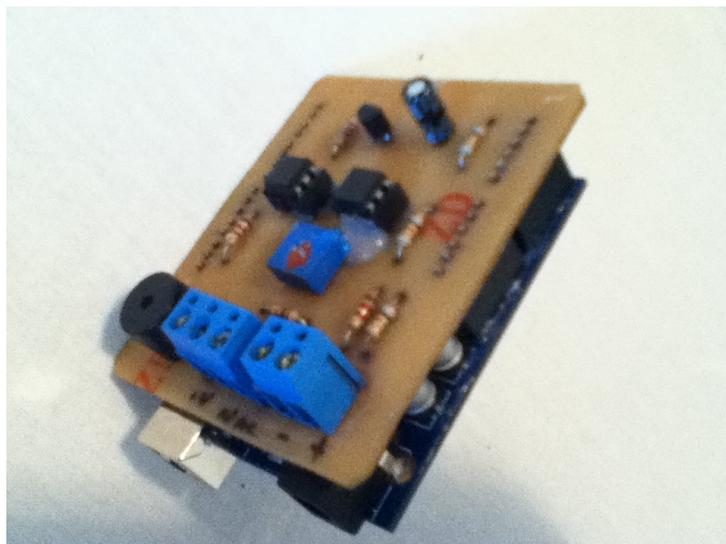


Figura 3.25: *Hardware*

Capítulo 4: Modelagem e Controle

Em uma das etapas do *Flow Loop Test*, conforme foi detalhado no Capítulo 2, é necessário realizar sucessivos testes de torque no *Control Unit* das ferramentas do tipo *push-the-bit*. O teste de torque da ferramenta se divide em sete etapas. Para cada etapa existe uma referência de vazão para a linha de teste da ferramenta. Por exemplo, o primeiro teste de torque deve ser feito com uma vazão de 300 GPM enquanto o segundo com uma de 350 GPM, e assim por diante. Sendo assim, faz-se necessário ter um sistema de controle automático da vazão.

4.1: Conceitos Básicos de Controle

Define-se como um *sistema monovariável* todo sistema com uma única entrada e uma única saída. O sistema de controle da vazão é um desses sistemas monovariáveis, uma vez que a entrada do processo é a frequência do motor e a saída é a medida de vazão que passa pela ferramenta, Figura 4.1.

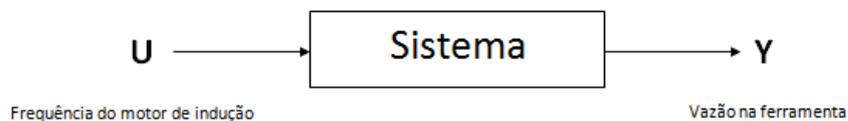


Figura 4.1: Sistema de controle de vazão em malha aberta.

Anteriormente ao desenvolvimento desse trabalho, o controle da vazão no *Flow Loop Test* era realizado em malha aberta. Um sistema de controle em malha aberta, Figura 4.1, é um sistema em que a saída não é medida e nem realimentada para comparação com a entrada. Assim, para cada entrada de referência há uma condição de operação fixa, ou seja, que não se altera com a evolução da saída. O controle por malha aberta possui vários pontos negativos, como por exemplo, na presença de perturbações o sistema sai do seu ponto de operação e pode não desempenhar a função desejada, sendo então necessário haver monitoramento do sistema durante todo o tempo por um operador.

Em geral, a operação de um dado sistema em malha aberta (MA) não é satisfatória. Por isso, a aplicação de um dispositivo (ou elemento) de controle em malha fechada (MF) tem por objetivo melhorar o desempenho do sistema tanto em regime

transitório como em regime permanente. Este dispositivo de controle é comumente chamado de controlador, ou também de compensador. O controle de sistemas em malha fechada consiste, basicamente, em analisar o sinal de erro (diferença entre "valor da saída" e a referência) e aplicar uma correção no sinal de entrada da planta (ou sistema a ser controlado).

Na prática, normalmente deseja-se que o sistema em malha fechada tenha um desempenho satisfatório tanto para a rejeição de perturbações como para o seguimento de referências. A Figura 4.2 mostra o esquema de um controlador em MF.

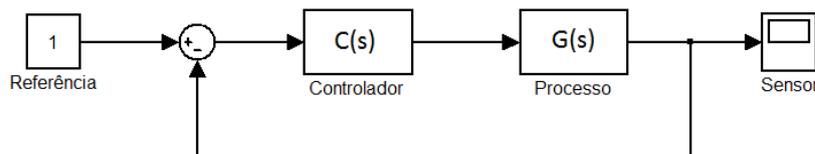


Figura 4.2: Sistema de controle em malha fechada.

4.2: Objetivos de Controle

Os objetivos de controle, ou especificações de controle, são um conjunto de características de comportamento que deseja-se impor no sistema a ser controlado. Tipicamente, as especificações de controle se dividem em regime transitório e especificações de regime permanente [32].

As especificações de regime transitório estabelecem, para um determinado tipo de excitação, as diferenças máximas aceitáveis entre a saída e um determinado padrão de resposta. Em geral os padrões de resposta estão definidos através de parâmetros como picos máximos, tempos para atingir um certo percentual do valor de regime permanente, etc. Já as especificações de regime permanente estabelecem condições de seguimento ou rejeição de determinados sinais que atuam sobre o sistema considerado e que devem ser mantidas quando o sistema encontra-se no ponto de operação [32].

As especificações para o controlador de vazão desse projeto foram bastante conservadoras, uma vez que o tempo de resposta do sistema não é o ponto crítico do *Flow Loop Test*. São elas:

- O sistema deve ter erro nulo em regime permanente;
- O sistema não deve apresentar sobressinal;

- O tempo de resposta do sistema (5%) deve ser menor que 30 s;
- O sistema deve rejeitar perturbações do tipo degrau.

Para que essas especificações temporais possam ser consideradas na análise e projeto de controladores lineares, é necessário recorrer ao uso de modelos matemáticos para representação do modelo da planta. Neste caso, será considerado que o comportamento dinâmico do processo em malha aberta e fechado pode ser modelado por uma função de transferência. Assim, a resposta do sistema a determinados sinais de entrada poderá ser relacionada às características da função de transferência, seja utilizando diagramas pólo-zero ou diagramas de resposta em frequência do sistema.

4.3: Levantamento do Modelo

A aproximação de sistemas reais por modelos matemáticos deve ser fiel suficiente para conseguir representar os seus aspectos essenciais de forma adequada para uma utilização particular [34]. A forma com que esses modelos matemáticos são determinados pode ser dividida em duas categorias de procedimentos, a análise físico-matemática e a análise experimental [35].

A análise físico-matemática, ou fenomenológica, baseia-se na caracterização pelas leis da física. O ideal seria identificar todos os sistemas baseados nessas leis já que as leis da física são universais, mas na prática existem processos industriais tão complexos que inviabilizam essa análise. Já a análise experimental baseia-se em observações de dados do sistema e pode aplicar algoritmos computacionais para automatizar o processo de determinação do modelo. Pela facilidade no uso e falta de necessidade de ter conhecimento prévio do sistema, a análise experimental é a mais usada em ambiente industrial [35].

Nesse trabalho o modelo foi levantado a partir de uma análise experimental. Foram aplicados degraus em diversos pontos de operação e, em seguida, foram analisadas as respostas do sistema. A Figura 4.3 mostra o resultado do ensaio.

Analisando a Figura 4.3 é possível notar que o sistema possui um comportamento diferente para cada ponto de operação, variando por exemplo, o ganho do modelo. Além disso, também é possível afirmar que, para qualquer ponto de operação, o modelo pode ser bem aproximado por uma função de transferência de primeira ordem.

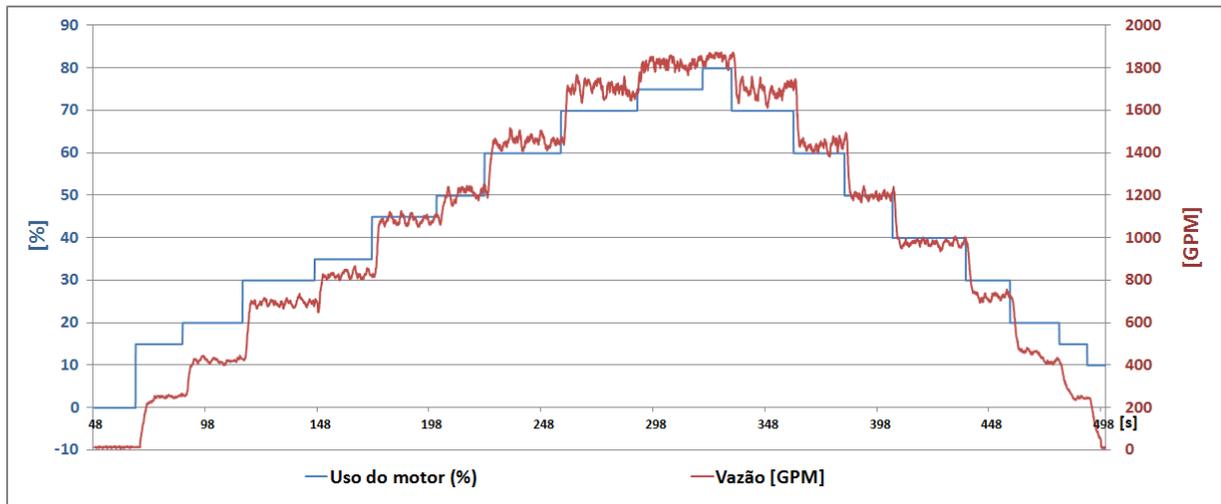


Figura 4.3: Ensaios ao degrau

4.3.1: Sistemas de Primeira Ordem

Sistemas de primeira ordem são representados pela função de transferência da Equação 4.1. Entretanto, sistemas de primeira ordem com zero, como mostra a Equação 4.1, apresentam acoplamento direto entre a entrada e a saída. Ou seja, esse tipo de sistema apresenta resposta instantânea e, por esse motivo, não é comum ser usado para modelar sistemas físicos reais.

$$G(s) = e^{-t_a s} \frac{K_e(1 + Ts)}{1 + \tau s} \quad (4.1)$$

Nesse trabalho, iremos estudar o comportamento de sistemas de primeira ordem representados pela Equação 4.2.

$$G(s) = e^{-t_a s} \frac{K_e}{1 + \tau s} \quad (4.2)$$

É possível relacionar os parâmetros k_e , T e τ com as formas de onda da resposta ao degrau do sistema. O termo $e^{-t_a s}$ representa um atraso de transporte de t_a segundos. Para o caso de sistemas estáveis, que é o caso do sistema em estudo, o valor de k_e fornece a relação estática entrada-saída (ganho estático) para uma entrada que tende a uma constante [32], Equação 4.3.

$$K_e = \frac{y_f - y_i}{u_f - u_i} \quad (4.3)$$

O parâmetro τ é definido como constante de tempo do sistema e dele depende

a forma da resposta da Figura 4.4. Além disso, τ se relaciona com a resposta através da Equação 4.4.

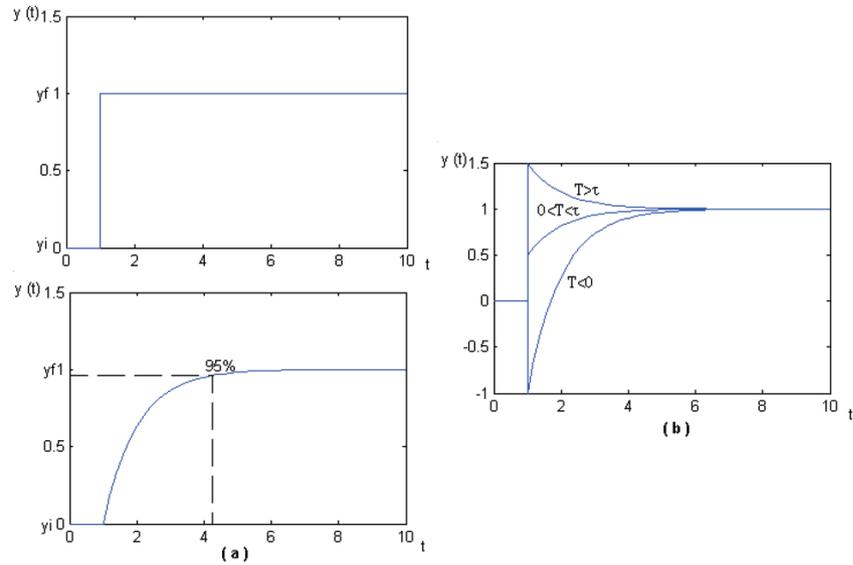


Figura 4.4: Resposta de sistema de primeira ordem para entrada degrau, (a) sem zero, (b) com zero [32]

$$t_{5\%} \approx 3\tau \quad (4.4)$$

Através do ensaio representado pela Figura 4.3 foi possível confirmar que o modelo do sistema pode ser aproximado por uma função de transferência de primeira ordem do tipo "a", representado pela Figura 4.4. Ou seja, é um sistema sem zero e sem resposta instantânea.

A partir das equações 4.3, 4.4 e da análise do atraso de transporte na Figura 4.3, foram levantados 17 modelos para a equação 4.2. Veja a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Modelos experimentais

ID	u_i [%]	u_f [%]	y_i [GPM]	y_f [GPM]	K_e	t_a [s]	τ [s]
1	10	15	12	250	47,6	2,01	1,99
2	15	20	255	421	33,2	1,52	1,16
3	20	30	421	694	27,3	1,62	0,72
4	30	35	694	826	26,4	1,56	0,62
5	35	45	826	1084	25,8	1,07	0,89
6	45	50	1084	1210	25,2	2,36	0,84
7	50	60	1210	1459	24,9	1,60	0,95
8	60	70	1459	1702	24,3	1,57	0,84
9	70	75	1702	1819	23,4	0,39	0,53
10	75	80	1819	1858	7,8	1,37	0,22
11	80	70	1858	1693	16,5	1,45	0,24
12	70	60	1693	1431	26,2	1,34	0,47
13	60	50	1431	1198	23,3	1,26	0,51
14	50	40	1198	976	22,2	0,98	0,79
15	40	30	997	721	27,6	1,02	1,28
16	30	20	721	458	26,3	0,78	1,46
17	20	15	430	246	36,8	0,73	1,67
Média					25,8	1,4	0,8

4.4: Projeto do Controlador

Pelos objetivos de controle levantados anteriormente, um simples controlador PI (Proporcional-Integral) consegue atender às especificações. Em [33] é demonstrado as relações entradas/saídas para degraus na referência e degraus na perturbação e é comprovado que, para sistemas de primeira ordem controlados por controladores com ação integral, há garantia de erro nulo em regime permanente. Como a planta a planta do *Flow Loop Test* é representada por um modelo de primeira ordem, o projeto do controlador se torna uma tarefa bastante simples.

O método de projeto de controladores pelo lugar das raízes foi utilizado para alocar os pólos e zeros do controlador de forma a atender às especificações de regime transitório e permanente, mantendo a estabilidade do sistema. Em relação à robustez, é necessário atentar-se ao valor do ganho do controlador, pois como há atraso de transporte no modelo, um valor de ganho alto pode instabilizar a planta.

Dentre todos os modelos levantados no ensaio, o modelo utilizado para o projeto foi definido com o valor médio de cada variável (τ , K_e e t_a) e é mostrado na Equação 4.5. A saída do modelo é o valor de vazão em GPM e a entrada é o sinal de

controle para o inversor de 0 a 100% (o que significa o mesmo que 0 a 60Hz).

$$G(s) = e^{-1,4s} \frac{25,8}{1 + 0,8s} \quad (4.5)$$

Dependendo da faixa de frequência em análise, o atraso de transporte presente na equação 4.5 pode ser aproximado por um polinômio através da Equação 4.6.

$$e^{-tas} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} (1 - \frac{tas}{2})^i (\frac{1}{i!})}{\sum_{i=1}^{\infty} (1 + \frac{tas}{2})^i (\frac{1}{i!})} \quad (4.6)$$

Esta fórmula de cálculo é conhecida como de *Padée*. Uma aproximação de *Padée* de primeira ordem é representada pela Equação 4.7.

$$e^{-tas} = \frac{1 - \frac{tas}{2}}{1 + \frac{tas}{2}} \quad (4.7)$$

Para o projeto do controlador, o atraso de transporte do modelo foi aproximado para 2s, diferentemente do modelo da Equação 4.5. Essa consideração foi feita pois na planta real esse seria um valor bem próximo ao maior atraso de transporte encontrado e que deve ser considerado para projetar um controlador robusto. A Equação 4.8 mostra o modelo utilizado para o projeto do controlador, substituindo o valor de 2s do atraso de transporte pela aproximação de *Padée* de primeira ordem, mostrada na Equação 4.7.

$$G(s) = \frac{25,8(1 - s)}{(1 + 0,8s)(1 + s)} \quad (4.8)$$

O controlador PI a ser ajustado para esse problema tem sua fórmula mostrada na Equação 4.9.

$$C(s) = Kc \frac{(T_i s + 1)}{s} \quad (4.9)$$

O problema de projeto do controlador PI se resume ao ajuste de T_i e de Kc , que significa o posicionamento do zero do controlador no diagrama do lugar das raízes e o ajuste do ganho. Para que o zero não seja dominante no sistema, ele deve ficar à esquerda do "p2" no diagrama da Figura 4.5 e o ganho deve ser pequeno o suficiente para que os pólos de malha fechada sejam posicionados de forma a atender às especificações de projeto.

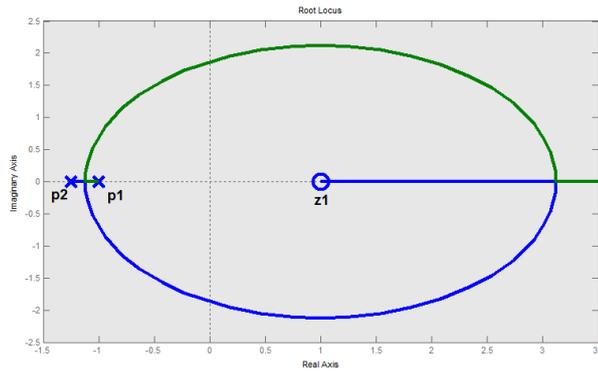


Figura 4.5: Diagrama pólo-zero da Equação 4.8 com realimentação negativa

Os pólos de malha fechada devem permanecer sobre o eixo real negativo para que o sistema seja estável e não tenha sobressinal. A Ferramenta SISOTOOL do Matlab foi utilizada para fazer os ajustes de ganho e da posição do zero. A Figura 4.6 mostra a tela de ajustes do SISOTOOL.

O controlador PI projetado tem a função de transferência mostrada na Equação 4.10 e, para uma mudança na sua referência do tipo degrau, apresenta a resposta temporal mostrada na Figura 4.7.

$$C(s) = 0.006 \frac{(0.67 * s + 1)}{s} \quad (4.10)$$

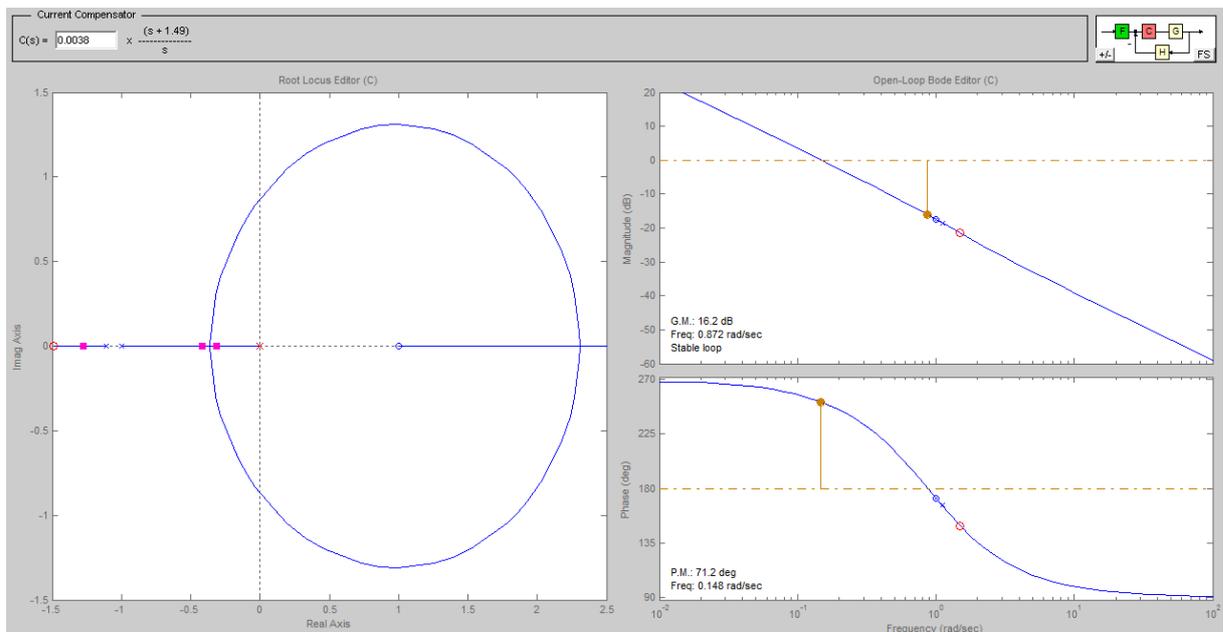


Figura 4.6: SISOTOOL - Ferramenta do Matlab que auxilia o projeto de controladores

Para testar a robustez do controlador em relação à variação paramétrica dos

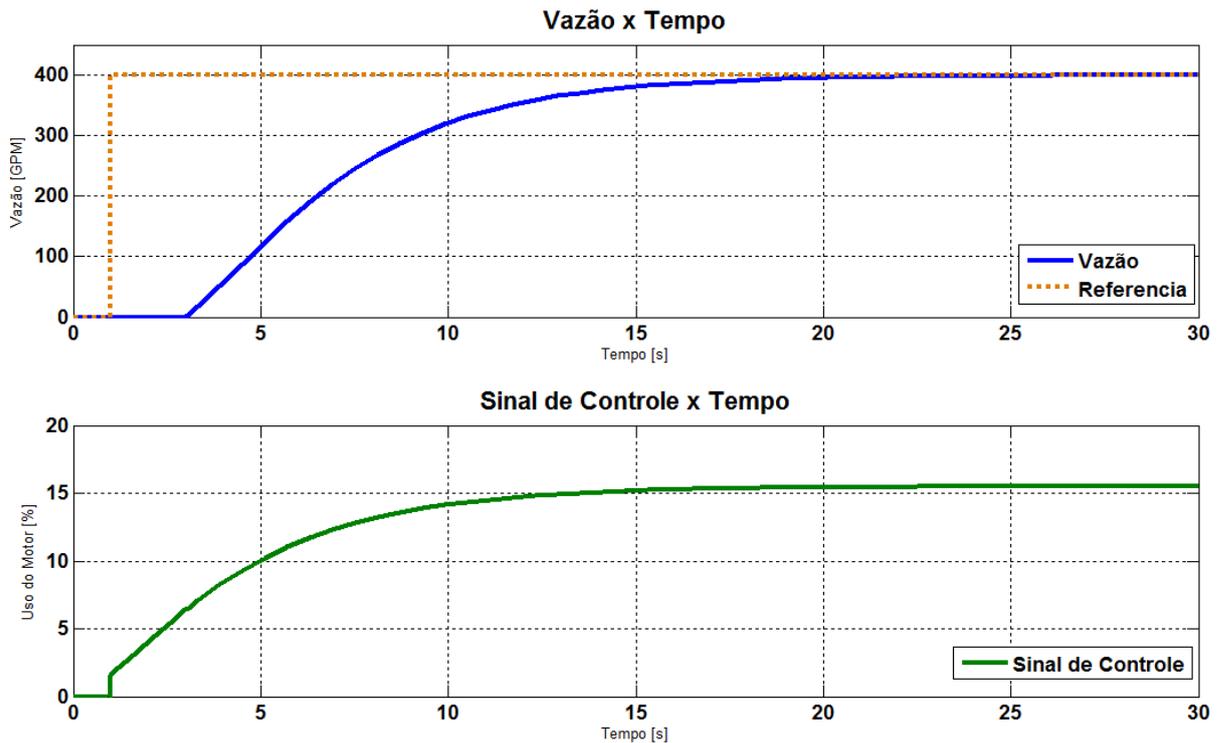


Figura 4.7: Resposta a um degrau de amplitude unitária

modelos da planta, foi realizada uma simulação no *Simulink* com 8 modelos de planta diferentes e o mesmo controlador da Equação 4.10. *Simulink* é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos da empresa *The MathWorks*. O diagrama montado para o teste é mostrado na Figura 4.8 e a resposta temporal dos modelos para o controlador projetado é mostrado na Figura 4.9.

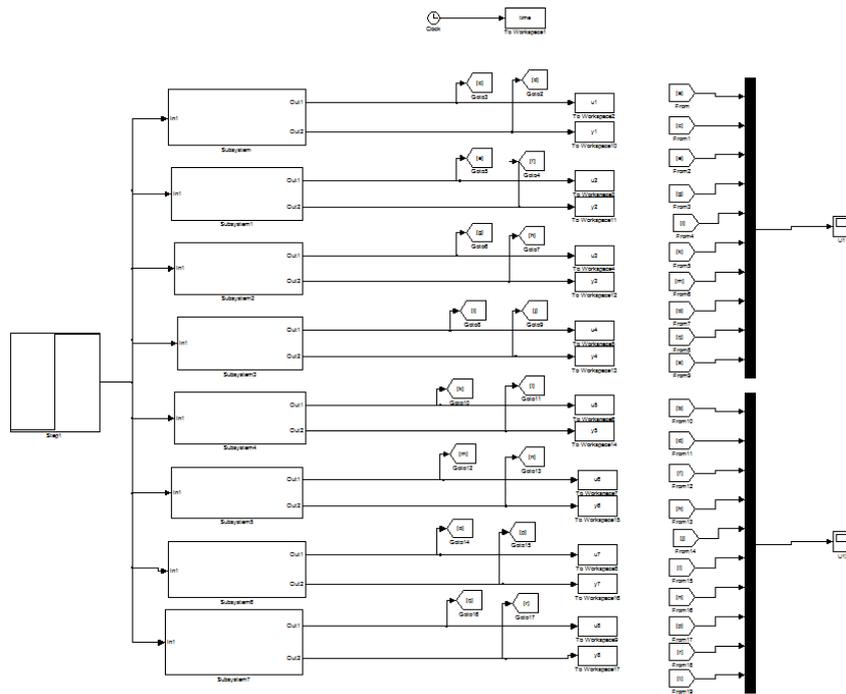


Figura 4.8: Diagrama *Simulink* para teste de robustez

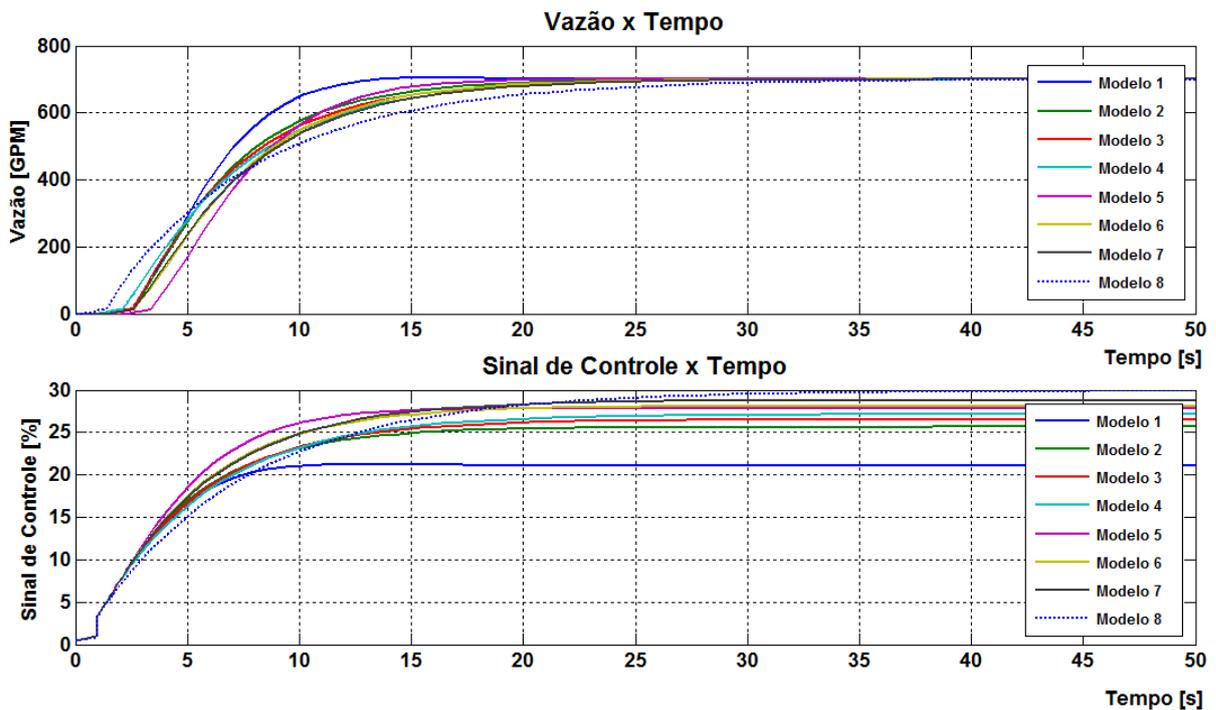


Figura 4.9: Resposta ao degrau para teste de robustez

A Figura 4.9 mostra que o controlador consegue ter uma resposta estável e dentro das especificações do projeto mesmo com as variações paramétricas encontradas no modelo real. Com isso, o projeto mostrou-se robusto o suficiente para ser implementado e testado na planta.

4.5: Algoritmo de Controle

Praticamente todos os sistemas de controle implementados atualmente são baseados em sistemas controlados por computador. Esse tipo de sistema de controle é conhecido como controle digital e é basicamente composto de um processo real (planta analógica), um sistema digital processado e conversores A/D (analógico-digital) e D/A (digital-analógico) [36]. A Figura 4.10 mostra o diagrama de blocos de um controlador digital. Como o desenvolvimento desse projeto baseia-se em um microcontrolador e um software, o controlador da vazão deverá ser do tipo digital, sendo implementado por um algoritmo de controle.

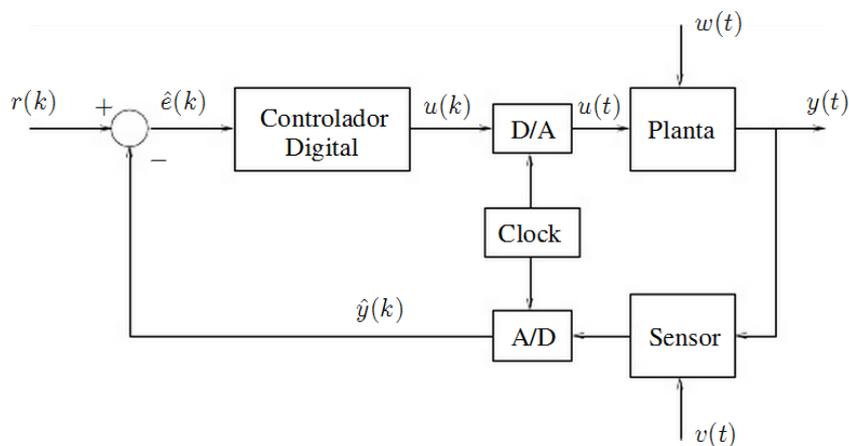


Figura 4.10: Sistema de controle digital

O projeto do controlador digital pode ser feito de duas maneiras básicas: utilizando a teoria de controle analógico ou a teoria de controle digital. A primeira maneira consiste em projetar o controlador analógico e, em seguida, discretizá-lo para um controlador digital utilizando algum método de integração numérica de equações diferenciais. A segunda maneira de se projetar um controlador digital é utilizando métodos discretos. Como foi visto nas seções anteriores, esse trabalho utilizou o projeto de um controlador analógico para, em seguida, ser discretizado na forma de um controlador digital.

Antes de discretizar o controlador analógico, é necessário conhecer algumas características do *hardware* em que o sistema de controle será implementado. No contexto desse trabalho, é necessário saber, por exemplo, como são os conversores A/D e D/A da placa eletrônica. Como foi discutido no Capítulo 3, o *hardware* projetado para o projeto utiliza uma placa de aquisição de dados baseada no Arduino. Através de testes de comunicação entre o Arduino e o computador, pelo protocolo de

comunicação serial RS-232, foi constatado que o Arduino consegue enviar os dados de suas portas de entrada analógica para o software a cada 100 ms. Portanto, o período de amostragem do sistema de controle deve ser de, no mínimo, 100 ms. Além disso, o Arduino utiliza um conversor D/A do tipo sustentador de ordem zero.

4.5.1: Discretização de Controlador Contínuo

Considere-se um sinal $e(t)$, e sua transformada de Laplace $E(s)$. Se aplicarmos esse sinal a um A/D, obteremos na saída, o sinal $e(t)$ amostrado, que é representado por $e^*(t)$. A este sinal corresponderá a transformada de Laplace $E^*(s)$, conforme é mostrado na Figura 4.11 [37].



Figura 4.11: Relação entre os sinais de entrada e saída de um conversor A/D.

Pode-se representar $E^*(s)$ como mostra a Equação 4.11, em que T é o período de amostragem.

$$E^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} e(kT)e^{-kTs} \quad (4.11)$$

Efetuada a mudança de variável $z = e^{Ts}$, pode-se afirmar que:

$$E(z) = \sum_{k=0}^{\infty} e(kT)z^{-k} \quad (4.12)$$

A Equação 4.12 corresponde à definição de **Transformada Z**. O conceito de Transformada Z é necessário na solução do problema de conectar um sistema discreto com um sistema contínuo através de um interpolador.

O interpolador utilizado no projeto foi do tipo *ZOH* (*Zero-Order Holder*), ou interpolador de ordem zero, Figura 4.12.

A função de transferência do *ZOH* é dada pela Equação 4.13.

$$Bo(s) = \frac{1}{s}(1 - e^{-sT}) \quad (4.13)$$

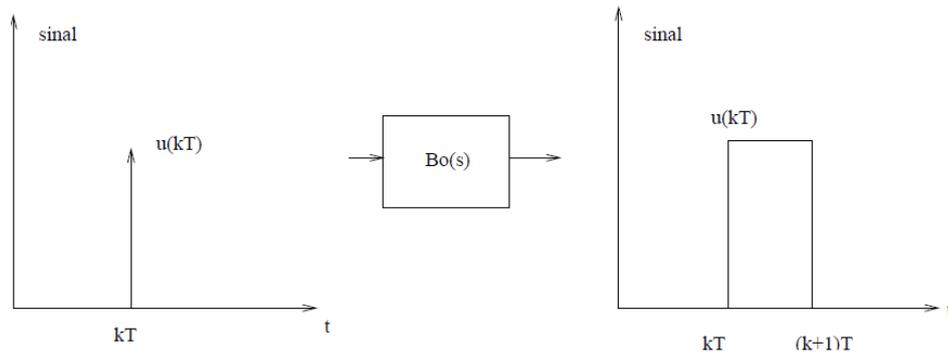


Figura 4.12: Transformação de pulsos em degraus através de um *ZOH*.

Para discretizar o controlador $C(s) = 0.006 \frac{(0.67s+1)}{s}$, deve-se aplicar a fórmula da Equação 4.14, conforme é discutido em [38].

$$\begin{aligned}
 BoG(z) &= (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{C(s)}{s} \right\} \\
 BoG(z) &= (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ 0.006 \frac{0.67s + 1}{s^2} \right\} \\
 BoG(z) &= 0.006(1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{0.67}{s} + \frac{1}{s^2} \right\} \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

Como nesse caso o tempo de resposta do sistema em malha aberta é mais rápido que o tempo em malha fechada, o tempo de amostragem foi calculado baseado no tempo de acomodação do sistema em MA. O valor de T foi calculado por $\frac{t_{5\%}}{15}$, aproximadamente 200 ms. A partir da tabela de transformada do Anexo C, é possível chegar à equação 4.15.

$$\begin{aligned}
 C(z) &= 0.006(1 - z^{-1}) \left[\frac{0.67}{(1 - z^{-1})} + \frac{0.2z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2} \right] \\
 C(z) &= 0.006 \left[0.67 + \frac{0.2z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right] \\
 C(z) &= 0.006 \left[\frac{0.67 - 0.47z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right] \\
 C(z) &= \frac{0.00402 - 0.00282z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

Multiplicando os termos da Equação 4.15 por z , é encontrada a equação do controlador discretizado $C(z)$ 4.16.

$$C(z) = \frac{0.00402z - 0.00282}{z - 1} \quad (4.16)$$

4.5.2: Obtenção da Equação de Diferenças a partir da Transformada Z

Neste item é apresentado como obter a equação de diferenças correspondente à função de transferência do controlador em tempo discreto, $C(z)$, que será implementada em computador.

Para se obter a equação de diferenças equivalente a uma função de transferência em z , primeiro é preciso colocar a função $C(z)$, da Equação 4.16, em função de potências negativas de z . Para isso, divide-se o numerador e denominador por z chegando-se à Equação 4.17.

$$C(z) = \frac{0.00402 - 0.00282z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.17)$$

Como a função de transferência de $C(z)$ representa a relação entrada-saída entre o sinal de controle $U(z)$ e o sinal do erro $E(z)$, a Equação 4.17 pode ser reescrita na forma da Equação 4.18.

$$U(z) - z^{-1}U(z) = 0.00402E(z) - 0.00282z^{-1}E(z) \quad (4.18)$$

Calculando-se a Transformada Z Inversa da equação 4.18, obtém-se a equação de diferenças 4.19, que foi utilizada na implementação da lei de controle no software [38].

$$u(k) = 0.00402e(k) - 0.00282e(k - 1) + u(k - 1) \quad (4.19)$$

4.6: Resultados

O controlador projetado se portou de forma satisfatória nos testes realizados na planta. As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os gráficos do valor da vazão e do sinal de controle no software supervisorio.

O projeto de um controlador conservador, com tempos de resposta moderados, fez com que o sistema de controle mantivesse o nível de robustez desejado. O algo-

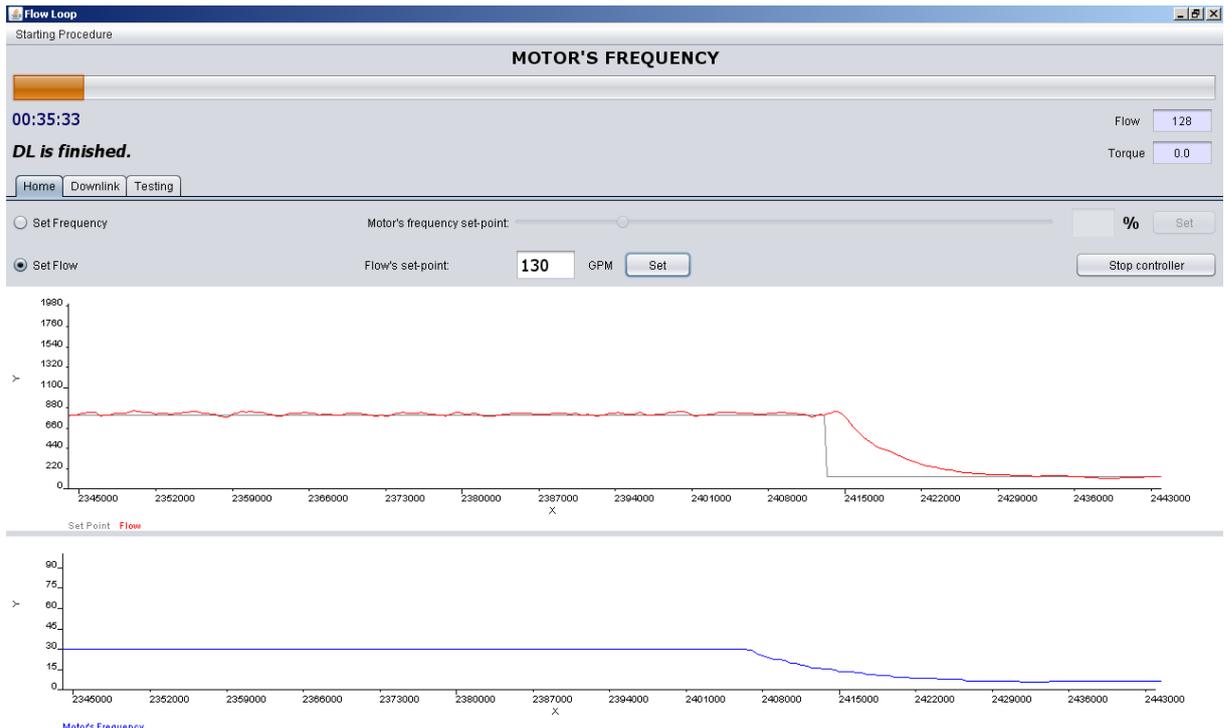


Figura 4.13: Mudança de *set-point* da referência de vazão para 130 GPM.

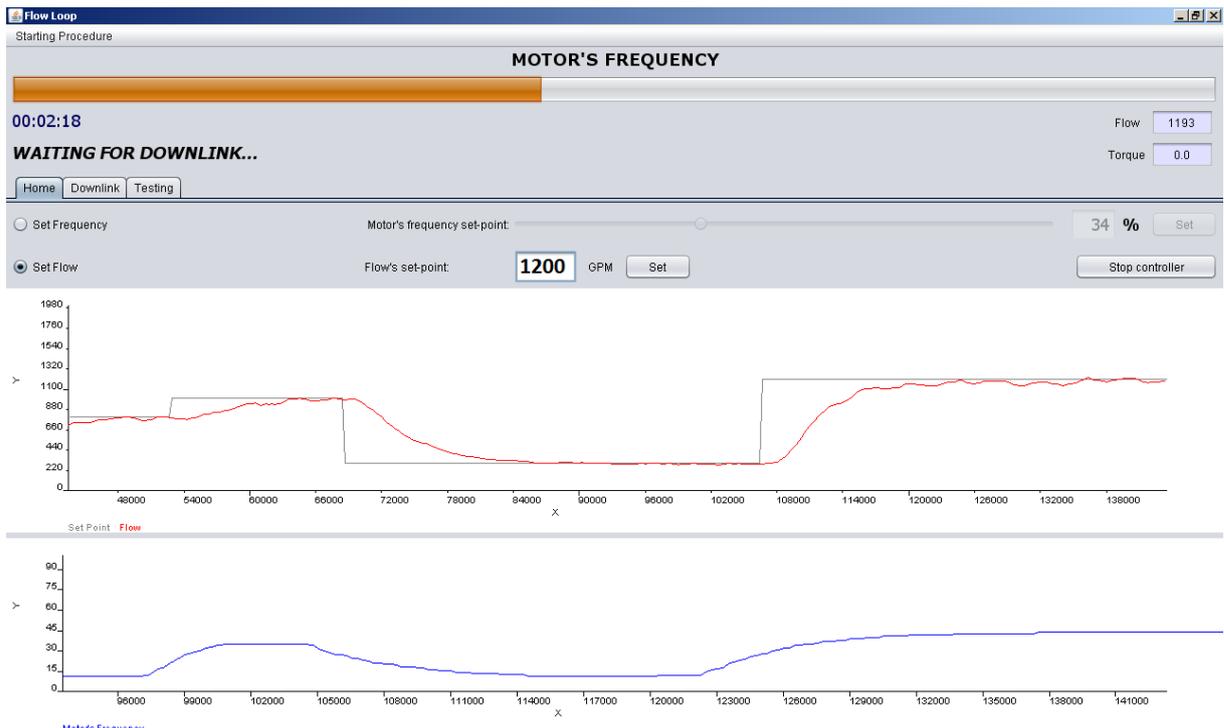


Figura 4.14: Comportamento do controlador para diferentes *set-points*.

ritmo conseguiu atingir os objetivos de controle para todas as faixas de operação de forma satisfatória.

Pelo desenho da planta, não havia uma maneira trivial de inserir perturbação

no sistema e analisar a ação de controle. Com isso, como não se tratava de um ponto crítico para o sistema, não foi relatado resultados referentes à rejeição de perturbações do tipo degrau.

Capítulo 5: *Software* Supervisorio

5.1: Visão Geral do Sistema

Para que o processo do *Flow Loop Test* seja automatizado e se torne factível por apenas uma pessoa, é necessário que se tenha um sistema de controle supervisorio. A partir desse sistema, o técnico poderá monitorar e controlar as variáveis relacionadas ao processo de teste das ferramentas do tipo *push-the-bit*.

5.2: Levantamento de Requisitos

Antes de desenvolver o software, é preciso ter bem definido quais são as especificações do sistema. Para isso, foram levantados quais são os requisitos funcionais e não funcionais do sistema supervisorio. Requisitos funcionais representam as funções básicas do sistema, enquanto os requisitos não funcionais estão vinculados às restrições dos requisitos funcionais.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram quais são esses requisitos.

F1	Controlar vazão	Oculto ()	
Descrição: O sistema deve ser capaz de receber de controlar a vazão do teste em malha aberta e malha fechada. Para controlar a vazão em malha aberta o usuário deve ser capaz de escolher a porcentagem de uso do motor. Para o controle em malha fechada o usuário deve selecionar a vazão desejada.			
Requisitos Não – Funcionais			
Nome	Restrição	Categoria	Permanente
NF1.1 – Escolha do modo de operação	O sistema deve apresentar ao usuário as opções de modo de controle da vazão por malha aberta ou fechada.	Usabilidade	(X)
NF1.2 – Controle da vazão em malha aberta	O sistema deve ser capaz de receber qualquer valor entre 0 e 100% e convertê-lo em um sinal de referência de 0 a 60Hz para o inversor de frequência.	Tempo	(X)
NF1.3 – Controle da vazão em malha fechada	O sistema deve ser capaz de receber qualquer <i>set-point</i> de vazão dentro da faixa de operação da planta e ajustar automaticamente o valor do sinal de controle para alcançar a vazão desejada.	Tempo	(X)
NF1.4 – Monitoramento das variáveis	O sistema deve apresentar de forma visual e em tempo real o valor de leitura da vazão e do sinal de controle.	Interface	(X)

Figura 5.1: Requisitos funcionais do modo de controle do motor.

F2	Realizar <i>Downlink</i> automático	Oculto ()	
Descrição: O sistema deve ser capaz de realizar de forma automática todos os as sequências de <i>Downlink</i> utilizadas nas ferramentas do tipo <i>push-the-bit</i> .			
Requisitos Não – Funcionais			
Nome	Restrição	Categoria	Permanente
NF2.1 – Escolha do Downlink	O sistema deve apresentar ao usuário todas as opções de Downlink de forma prática e intuitiva.	Interface	(X)
NF2.2 – Monitoramento do Downlink	O sistema deve apresentar de forma visual e em tempo real o andamento do Downlink automático.	Tempo	(X)

Figura 5.2: Requisitos funcionais sobre o *Downlink*.

F3	Teste de Torque automático	Oculto ()	
Descrição: O sistema deve ser automatizar alguns passos do teste de torque de forma que o processo possa ser feito por apenas uma pessoa.			
Requisitos Não – Funcionais			
Nome	Restrição	Categoria	Permanente
NF3.1 – Carregar teste	O sistema deve apresentar ao usuário a opção de escolher o tipo de ferramenta que será testada e carregar as informações de teste da mesma. As informações sobre o teste são constadas no manual de manutenção.	Especificação	(X)
NF3.2 – Ajustar set-point de vazão para teste	O sistema deve ser capaz de ajustar a vazão correta para cada deste.	Especificação	(X)
NF3.3 – Adquirir dados	O sistema deve ser capaz de receber dados do leitor de torque e do sensor de vazão em tempo real.	Usabilidade	(X)
NF3.4 – Armazenar e processar dados	O sistema deve ser capaz de armazenar os dados durante o teste de torque e processá-los de forma a atender o manual de manutenção da ferramenta.	Especificação	(X)
NF3.5 – Visualizar teste	O sistema deve apresentar de forma visual e em tempo real o andamento do teste de torque.	Interface	(X)
NF3.6 – Gerar relatório	O sistema deve ser capaz de gera relatório com os dados do teste de torque	Especificação	(X)

Figura 5.3: Requisitos funcionais sobre teste de torque.

5.3: Plataforma de Desenvolvimento

A linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento do software foi Java. Java é uma linguagem de programação orientada a objeto desenvolvida na década de 90 por uma equipe de programadores na empresa *Sun Microsystems*. Diferentemente das linguagens convencionais, que são compiladas para código nativo, a linguagem Java é compilada para um *bytecode* que é executado por uma máquina virtual. A linguagem de programação Java é a linguagem convencional da Plataforma Java, mas não sua única linguagem [39].

A utilização de Java nesse projeto deu-se, primeiramente, por questões de custo, uma vez que um sistema desenvolvido em Java pode utilizar apenas tecno-

logia *open-source*, ou seja gratuita. Além disso, Java apresenta características muito importantes no contexto desse projeto, como portabilidade, suporte e flexibilidade.

No contexto do desenvolvimento de *softwares*, **portabilidade** significa que programas escritos em Java possuem independência de plataformas computacionais, ou seja, um programa escrito em Java deve funcionar em qualquer computador, em qualquer sistema operacional. **Suporte** se refere a outra característica importante do Java que é a sua grande comunidade de desenvolvedores. É possível encontrar bibliotecas gratuitas na Internet que implementam uma infinidade de funcionalidades e facilitam muito o trabalho do programador e possibilita alto grau de **flexibilidade** para o desenvolvimento de soluções customizadas. Nesse trabalho, por exemplo, foram utilizadas bibliotecas que implementam gráficos em tempo real, API para comunicação serial e para interface gráfica, entre outros.

Foram utilizadas duas diferentes IDE (Integrated Development Environment) para o desenvolvimento do software:

- Eclipse Indigo: onde foi realizado a maior parte do software.



Figura 5.4: IDE: Eclipse.

- Netbeans 7.1.1: onde foi programada toda a interface gráfica.



Figura 5.5: IDE: NetBeans.

5.4: Comunicação com o *Hardware*

Para que o programa escrito em Java se comunique com a placa eletrônica desenvolvida, é necessário que haja um meio e um protocolo de comunicação. A placa Arduino utilizada nesse projeto possui uma porta serial (também conhecida como UART ou USART) que utiliza os pinos digitais 0 (RX) e 1 (TX) para implementar o

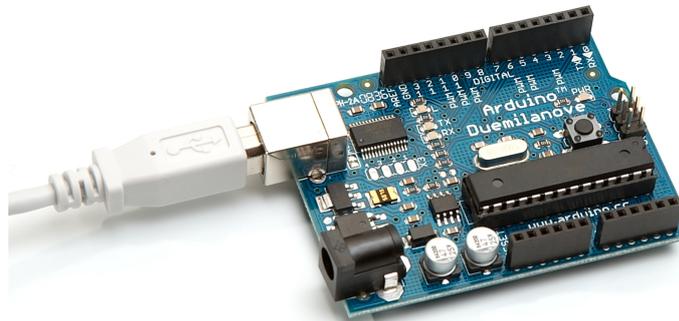


Figura 5.6: Comunicação serial do Arduino através de conexão USB

protocolo RS-232. O meio de comunicação com o computador dá-se através de uma conexão USB, como mostra a Figura 5.6.

Em telecomunicações e ciência da computação, comunicação serial é o processo de enviar dados um bit de cada vez, sequencialmente, num canal de comunicação ou barramento. É diferente da comunicação paralela, em que todos os bits de cada símbolo são enviados juntos. A comunicação serial é usada em toda comunicação de longo alcance e na maioria das redes de computadores, onde o custo de cabos e as dificuldades de sincronização tornam a comunicação paralela impraticável. Para curtas distâncias, barramentos seriais estão se tornando cada vez mais comuns devido ao ponto em que as desvantagens dos barramentos paralelos (densidade de interconexão) superam suas vantagens de simplicidade [40].

Existem vários protocolos de comunicação serial, como por exemplo RS-232, RS-423, RS-485 e Ethernet. No protocolo de comunicação RS-232, caracteres são enviados um a um como um conjunto de bits entre um DTE (terminal de dados - *Data Terminal Equipment*) e um DCE (comunicador de dados - *Data Communication Equipment*). Hoje, o protocolo de comunicação RS-232 vem sendo, gradualmente, suprimido pelo USB para comunicação local. O protocolo USB é mais rápido, possui conectores mais simples de usar e tem um melhor suporte por software.

5.4.1: Protocolo de comunicação

A implementação de um protocolo de comunicação serial entre a placa de aquisição de dados e o software está diretamente relacionado com a camada de en-

lace do modelo OSI (Open Systems Interconnection). OSI é um modelo de arquitetura para sistemas abertos, visando permitir a comunicação entre máquinas heterogêneas e definindo diretivas genéricas para a construção de redes de computadores independente da tecnologia de implementação.

A camada de enlace é responsável por detectar e, opcionalmente, corrigir erros que possam acontecer no nível físico da comunicação. A camada física diz respeito aos meios de conexão através dos quais irão trafegar os dados, tais como interfaces seriais, LPTs, hubs ou cabos coaxiais. A camada de enlace representa, portanto, um protocolo de transmissão e recepção (delimitação) de dados e pelo controle de fluxo da comunicação entre sistemas diretamente conectados.

Existe uma iniciativa *open-source* de criação de um protocolo genérico para comunicação entre microcontroladores e softwares chamada *FIRMATA*, Figura 5.7. Esse protocolo estabelece uma comunicação ente o Arduino e um software através de uma comunicação serial e implementa todas as funções da camada de enlace. O objetivo do protocolo é oferecer um controle total sobre o Arduino pelo software que está sendo executado em um computador.

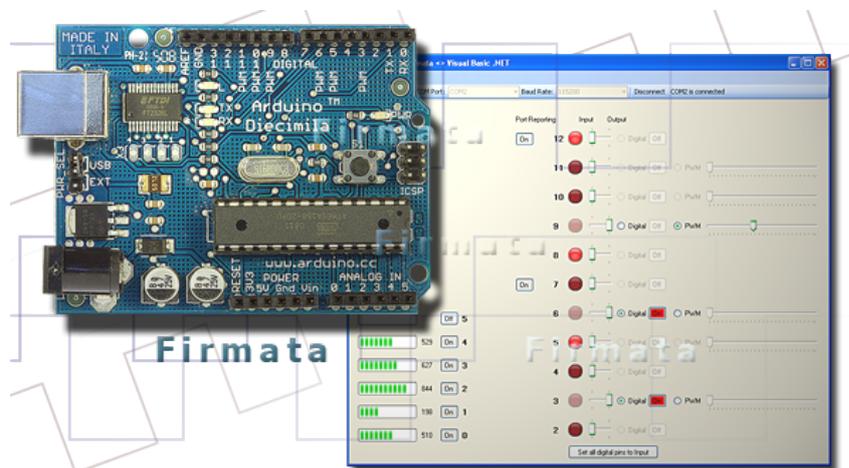


Figura 5.7: FIRMATA: protocolo de comunicação entre o Arduino e o software.

Apesar dessa iniciativa estar em fase de testes e não ter todas as funcionalidades do Arduino implementadas no protocolo, ela consegue suprir todos os requisitos desse projeto que são: ler entrada analógica e escrever nas portas digitais da placa. O uso desse protocolo poupou muito tempo de desenvolvimento, uma vez que não foi necessário implementar algoritmos de controle de fluxo de dados, controle de erros etc.

5.5: Implementação

O desenvolvimento do *software* foi baseado na solução dos requisitos de projeto das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. A interface gráfica do programa é dividida basicamente em duas seções principais, conforme é mostrado na Figura 5.8. A primeira é uma tela de monitoramento geral, que permanece ativa durante qualquer operação do usuário, apresentando resumidamente o *status* do sistema. A segunda tela é específica para as operações de cada etapa do teste.



Figura 5.8: Seções principais do software.

A Figura 5.9, mostra a seção 1 em detalhes e tem as suas funcionalidades apresentadas na Tabela 5.1.

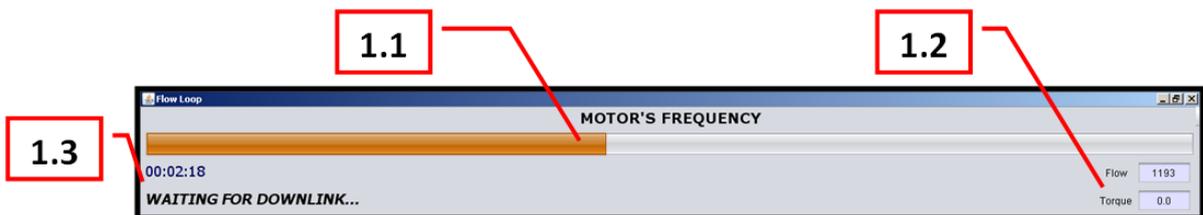


Figura 5.9: Painel de monitoramento principal.

Tabela 5.1: Funcionalidades da tela de monitoramento geral do sistema

ID	Descrição	Relação com os requisitos
1.1	percentual de uso do motor	
1.2	valores de leitura em tempo real da vazão e torque	
1.3	tempo de duração do teste e um quadro com informações sobre o <i>status</i> do <i>downlink</i>	NF2.2

A seção identificada pelo número 2 na Figura 5.8 é composta por um conjunto de 3 abas. A primeira é chamada de "Home", a segunda de "Downlink" e a terceira de "Testing". Cada uma delas será detalhada a seguir.

A aba *Home*, apresenta as informações principais do controle de vazão do teste. Suas funcionalidades visam o atendimento do requisito **F1** e seus requisitos não funcionais. A Figura 5.10 mostra os principais componentes dessa aba.



Figura 5.10: Aba *Home*.

Tabela 5.2: Funcionalidades da aba *Home*

ID	Descrição	Relação com os requisitos
2.1.1	seletor de modo de controle, automático (<i>Set Flow</i>) ou manual (<i>Set Frequency</i>)	NF1.1
2.1.2	inicializa o controlador automático para o <i>set-point</i> desejado	NF1.3
2.1.3	ajusta a entrada do sistema de controle em malha aberta (percentual de uso do motor)	NF1.2
2.1.4	envia <i>set-point</i> do controlador em malha aberta	NF1.2
2.1.5	interrompe a ação do sistema de controle em malha fechada	NF1.3
2.1.6	gráfico em tempo real com o valor da vazão em galões por minuto	NF1.4
2.1.7	gráfico em tempo real com o valor da ação de controle (%)	NF1.4

A aba *Downlink*, como o próprio nome diz, apresenta todas as informações necessárias para realizar um *downlink* automático. Há uma tabela onde constam todos os *downlinks* existentes e algumas informações sobre eles. É importante destacar que existe um *downlink* que é utilizado apenas para o *Flow Loop Test* e que, por essa razão, a sua frequência de utilização é muito maior que as demais em testes de manutenção, havendo uma funcionalidade exclusiva para ele no software. A Figura 5.11 mostra essa aba e seus componentes.

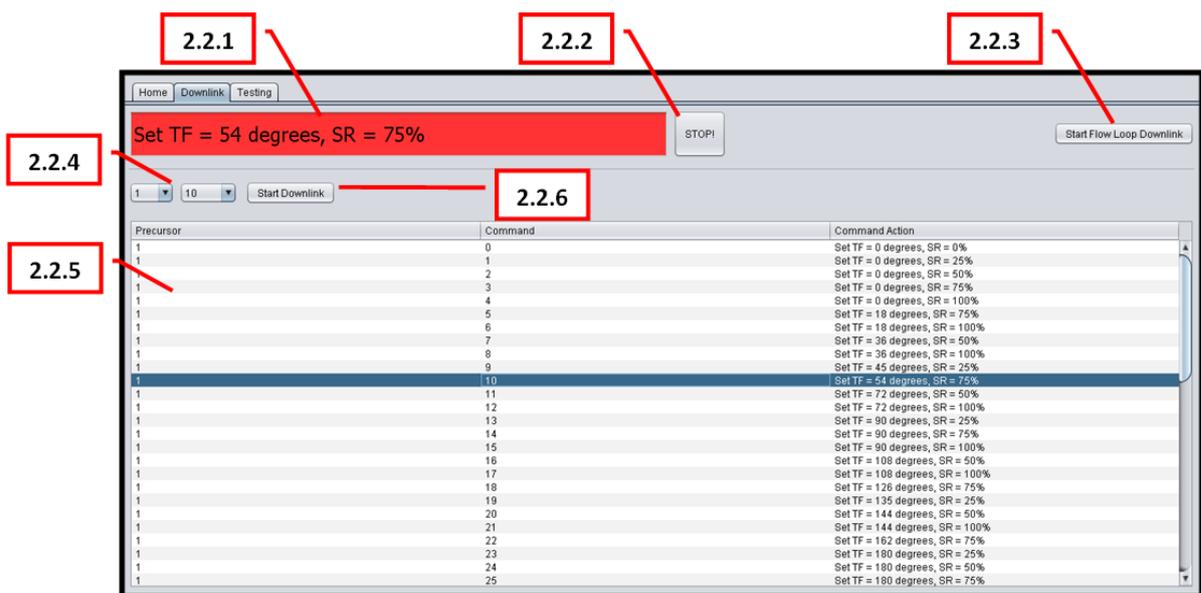


Figura 5.11: Aba *Downlink*.

Tabela 5.3: Funcionalidades da aba *Downlink*

ID	Descrição	Relação com os requisitos
2.2.1	quadro com a descrição do programa de <i>downlink</i> selecionado	N2
2.2.2	interrompe o <i>downlink</i> em andamento	N2
2.2.3	iniciar o <i>downlink</i> do <i>Flow Loop Test</i>	NF2.1
2.2.4	seleciona <i>downlink</i> através de uma caixa suspensa de opções	NF2.1
2.2.5	tabela com todos os <i>downlinks</i> existentes. É possível selecionar o <i>downlink</i> desejado clicando sobre a linha desejada na tabela	NF2.1
2.2.6	inicia <i>downlink</i> selecionado	N2

O requisito NF2.2 é atendido pela funcionalidade **1.3**.

A aba *Testing* é apresentada na Figura 5.12 e é possível perceber que o número de funcionalidades relacionadas ao teste de torque são maiores que as demais. A Tabela 5.4 mostra quais são essas funcionalidades.

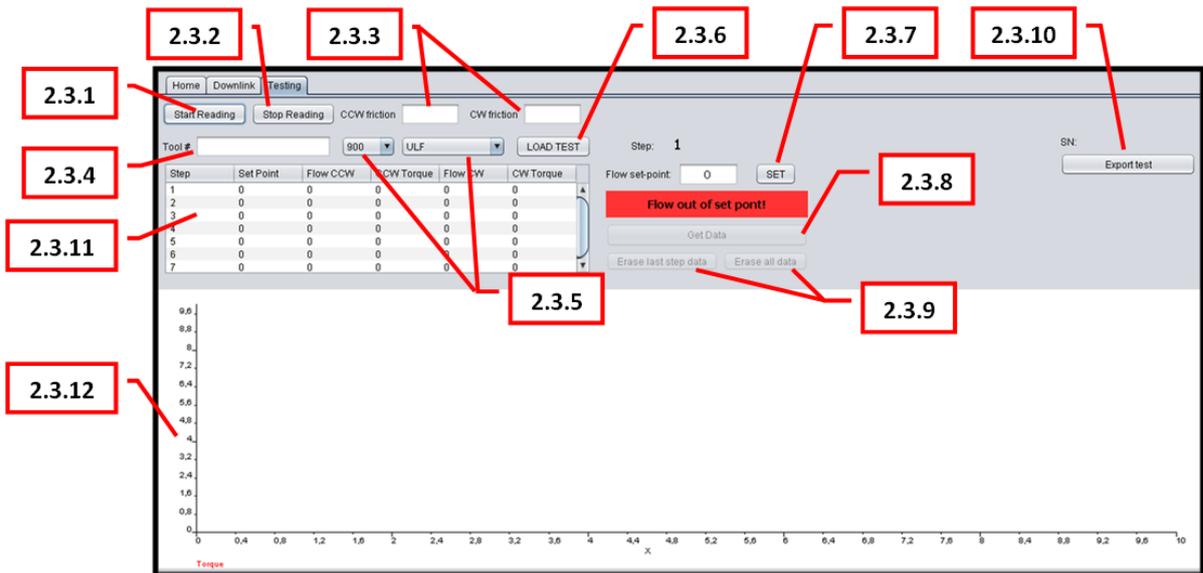


Figura 5.12: Aba *Testing*.

Tabela 5.4: Funcionalidades da aba *Testing*

ID	Descrição	Relação com os requisitos
2.3.1	inicializa a comunicação serial com o leitor de torque	NF3.3
2.3.2	interrompe a comunicação serial com o leitor de torque	NF3.3
2.3.3	preenche no software os valores do teste de fricção da ferramenta	
2.3.4	preenche o número serial da ferramenta que está sendo testada	NF3.1
2.3.5	seleciona o tipo de teste a ser realizado. O tipo de teste escolhido irá afetar os <i>set-points</i> da vazão para o teste de torque.	NF3.1
2.3.6	carrega set-points de vazão para o teste de torque de acordo com o teste selecionado pela funcionalidade 2.3.5	NF3.1
2.3.7	inicializa controlador de vazão para o <i>set-point</i> atual	NF3.2
2.3.8	inicializa processamento dos dados de leitura de torque e autoriza o preenchimento automático da tabela	NF3.4
2.3.9	apaga dados anteriores de teste	
2.3.10	exporta os dados de testes presentes na tabela para uma planilha do Excel	NF3.6
2.3.11	armazena os dados atuais do teste	NF3.4
2.3.12	monitora os valores de torque em função do tempo	NF3.5

Por ser um procedimento chave no projeto, é interessante detalhar um pouco mais como é realizado o teste de torque através do procedimento automatizado. A Figura 5.13 mostra o fluxograma do teste de torque. A partir do momento que o técnico verifica visualmente que a ferramenta aceitou o *downlink*, o teste de torque é iniciado. É importante lembrar que a medição de torque acontece em 7 etapas e que cada uma dessas etapas tem um *set-point* de vazão diferente.

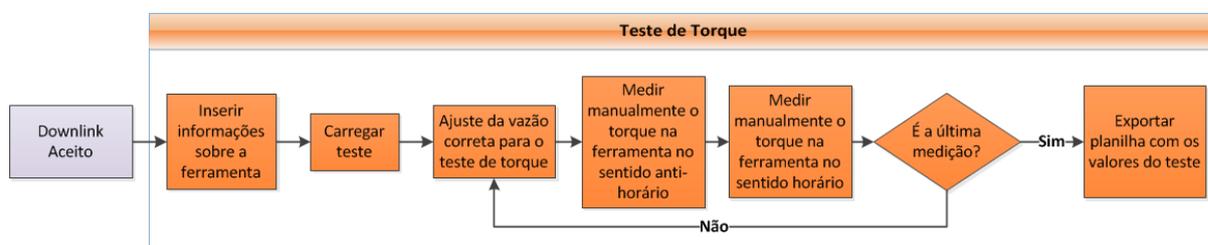


Figura 5.13: Fluxograma do teste de torque.

O primeiro passo na realização do teste de torque, conforme é mostrado na Figura 5.13, é a inserção dos dados da ferramenta no software. Esse procedimento é realizado através das funcionalidades 2.3.3, 2.3.4 e, 2.3.5. Em seguida, deve-se

carregar os dados do teste de acordo com as informações inseridas no passo anterior. Essa etapa, por sua vez, relaciona-se com a funcionalidade 2.3.6.

Após ter carregado as informações, o software gerencia automaticamente as 7 etapas do teste de torque. Antes de cada uma dessas etapas é necessário, entretanto, ajustar a vazão correta, o que é mostrado no quarto bloco do fluxograma da Figura 5.13 e é relacionado com a funcionalidade 2.3.7.

O quinto e sexto blocos do fluxograma são relacionados com a funcionalidade 2.3.8 do software, que é a leitura de torque na ferramenta. Para que o software receba os dados de leitura de torque, antes de mais nada é preciso ter um torquímetro digital conectado ao computador. Para estabelecer e/ou interromper a comunicação entre o torquímetro e o software, existem as funcionalidades 2.3.1 e 2.3.2.

Nesse trabalho, um torquímetro modelo CEDAR - DIW 15, Figura 5.14, foi utilizado para a medição do torque em tempo real. Esse modelo de torquímetro transfere dados no formato ASCII através de comunicação serial com o PC com um *baud-rate* de 19200 bps utilizando um cabo mini-USB. Para implementar a comunicação serial RS-232 entre o torquímetro e o software, foi utilizada uma API chamada *RXTX*.



Figura 5.14: Torquímetro digital *CEDAR - DIW 15*.

Após ter realizado o *loop* de leitura de torque (quarto, quinto, sexto e sétimos blocos da Figura 5.13) sete vezes, o usuário finalmente pode utilizar a funcionalidade 2.3.10 do software, que é a geração de relatórios. Para a geração desses relatórios, foi utilizada uma API chamada *jexcel*. Essa API possibilita que programas escritos em Java possam manipular planilhas do *Microsoft Excel*. Para a automação do *Flow Loop Test*, foi programada uma rotina de exportação dos dados de testes no modelo da Figura 5.15.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Date	18/6/2012 11:38					
2	Tool Number	1002732					
3	Diameter	900					
4	Test	MF 8 blades					
5	ACW Friction	2,3					
6	CW Friction	1,7					
7							
8	Flow 1	Torque ACW	ACW corrected	Flow 2	Torque CW	CW corrected	
9	421	3,1	0,8	412	2,9	1,2	
10	542	3,8	1,5	522	3,2	1,5	
11	701	4,1	1,8	715	3,8	2,1	
12	891	4,7	2,4	880	4,2	2,5	
13	1044	5,3	3	1020	4,8	3,1	
14	1197	5,7	3,4	1187	5	3,3	
15	1500	6	3,7	1425	5,2	3,5	
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							

Figura 5.15: Relatórios gerados na forma de planilhas do *Microsoft Excel*.

5.6: Telas do Sistema Supervisório

As telas das figuras 5.16, 5.17 e 5.18 mostram as telas finais da interface gráfica do sistema supervisorio.

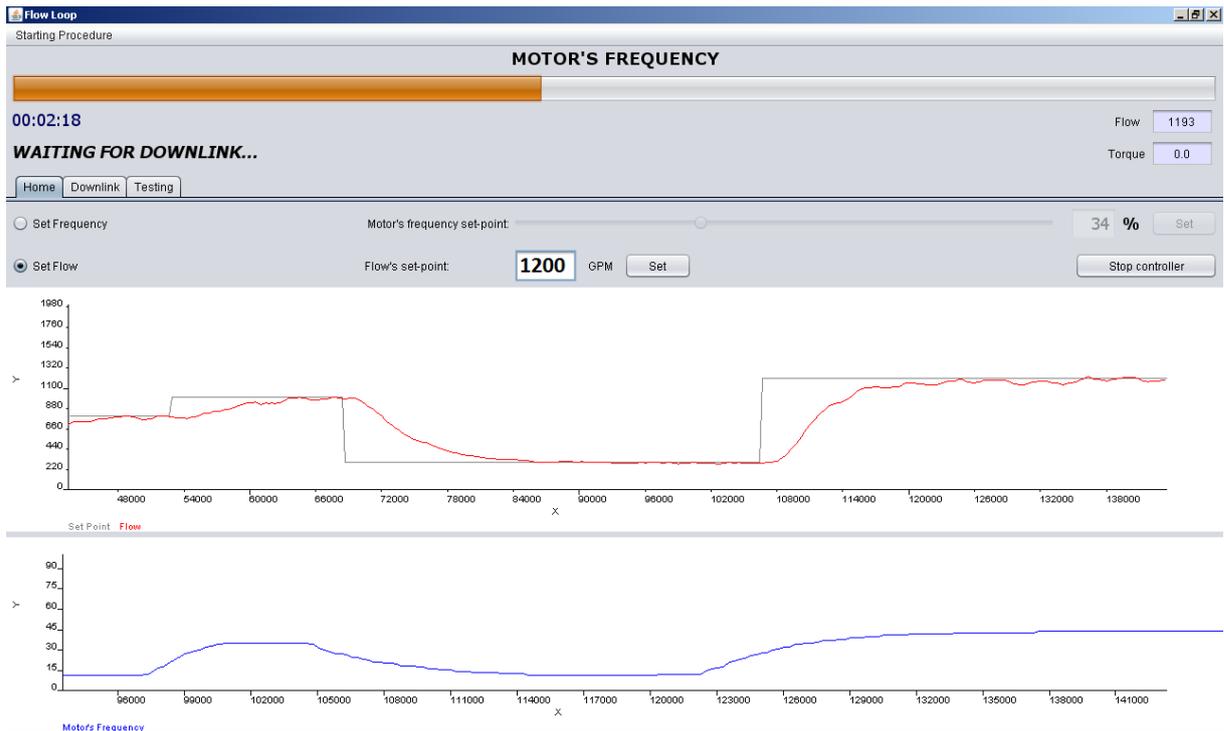


Figura 5.16: Controlador de vazão

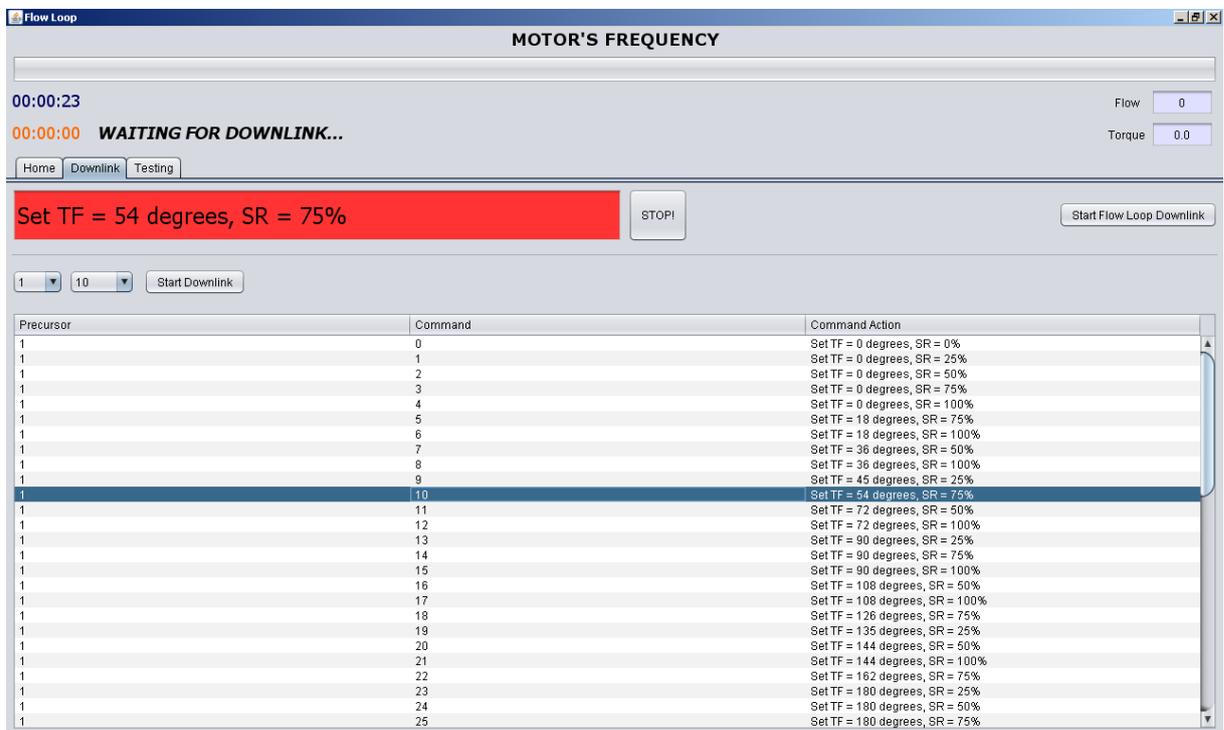


Figura 5.17: Downlink

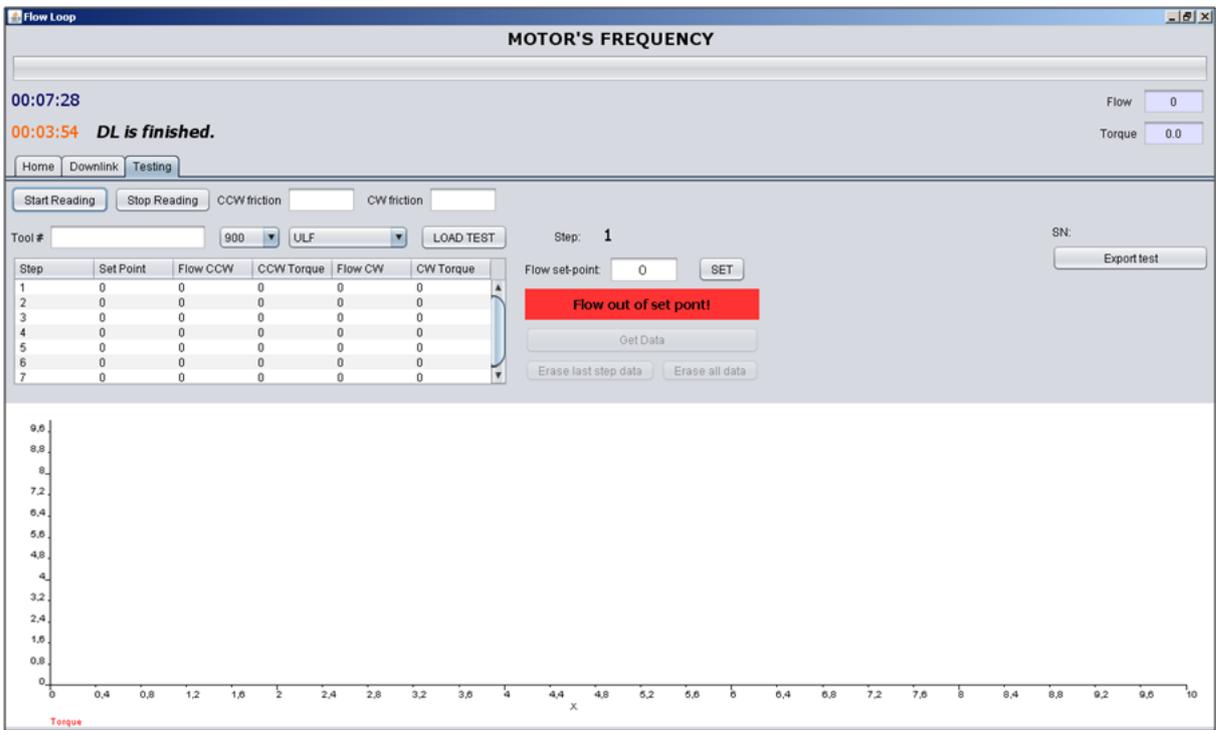


Figura 5.18: Teste de Torque

Capítulo 6: Resultados

O estudo de como o *Flow Loop Test* vinha sendo feito antes do desenvolvimento desse trabalho apresentou dois grandes problemas. Um relacionado a custo e outro a qualidade. Durante o processo de teste foi constatado que um dos dois técnicos alocados nessa atividade permanecia ocioso por quase 60% do tempo, o que caracteriza desperdício para a empresa. Outro problema encontrado foi a alta taxa de retrabalho no teste causada por erros humanos.

O objetivo da automação do *Flow Loop Test* é a redução do número de técnicos necessários para a realização do teste para apenas uma pessoa e a eliminação do índice de retrabalho relacionado a erro humano.

Conforme foi mostrado no Capítulo 2, a Figura 6.1 aponta as atividades que cada um dos técnicos era responsável no decorrer do teste.

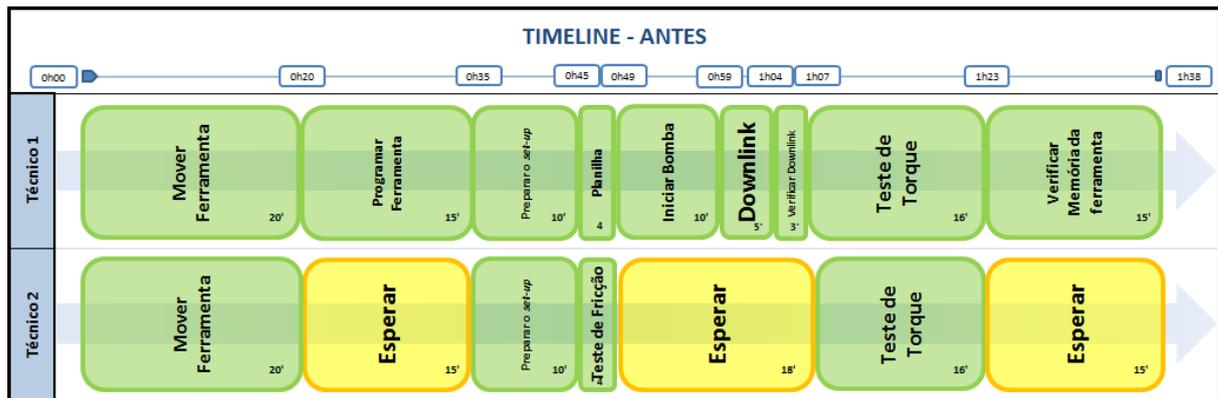


Figura 6.1: Estado inicial do processo de teste

Com as mudanças apontadas, também, no Capítulo 2 foi possível otimizar o processo de forma a economizar um total de 1,21 homen-hora por teste. A Figura 6.2 mostra como ficou o *timeline* do teste após a implementação das melhorias.

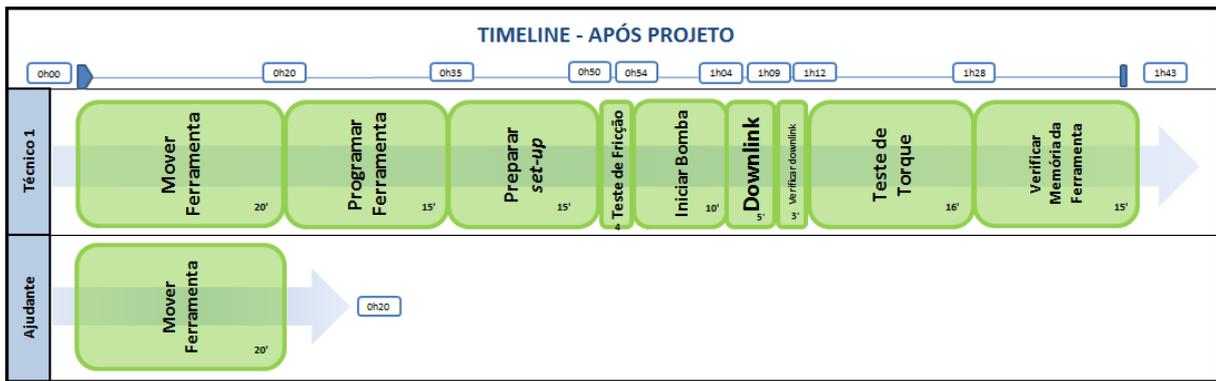


Figura 6.2: Estado final do processo de teste

Através da Figura 6.2 é possível notar que a única atividade do *Flow Loop Test* que exige mais de uma pessoa para ser feita é a operação de mover ferramentas. Esse processo não pode ser modificado porque ele é protegido por normas de segurança da empresa, uma vez que é necessário a utilização de talha.

Outra análise importante dos resultados do projeto é a redução de atividades que não agregam valor ao produto. A Figura 6.3 mostra que além de uma redução de quase 40% em homens-hora utilizadas no teste, houve a eliminação de processos que não agregam valor.

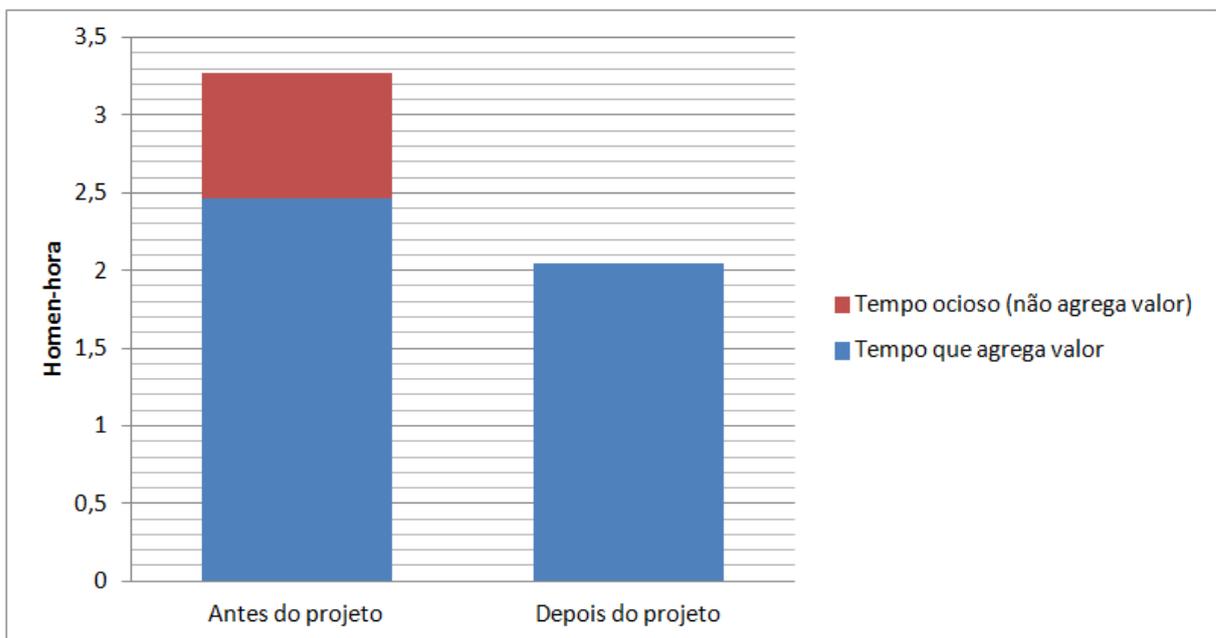


Figura 6.3: Análise quantitativa das melhorias

Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas

O programa de estágio na empresa Schlumberger foi uma excelente oportunidade para conhecer melhor a indústria do petróleo. As atividades realizadas durante o estágio possibilitaram, ao mesmo tempo, um estudo aprofundado sobre operações de perfuração de poços de petróleo, um contato direto com processos produtivos de chão-de-fábrica, como por exemplo *Lean Manufacturing*, e também possibilitou o desenvolvimento do projeto descrito nesse trabalho.

O projeto envolveu o estudo de várias disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação. Foram utilizados conceitos de eletrônica, informática industrial, fenômenos dos transportes, instrumentação, controle de sistemas dinâmicos, entre outros.

O uso de novas tecnologias no desenvolvimento técnico do projeto se provaram promissoras e, ao mesmo tempo, apresentaram algumas restrições. Por exemplo, o uso do Arduino em ambientes industriais deve ser usado com bastante cautela. A Figura 7.1 mostra os sinais $+V$ (sinalizado pela curva "C") e $A1$ (sinalizado pela curva "D") trocados entre o inversor de frequência e a placa de aquisição de dados. Pela figura, fica claro que esses sinais contam com muitos ruídos que, através de investigação de causa realizadas na planta, são causadas por interferência eletromagnética. Esse tipo de ruído deve ser minimizado ao máximo pois o Arduino é uma placa bastante sensível a esse tipo de interferência.

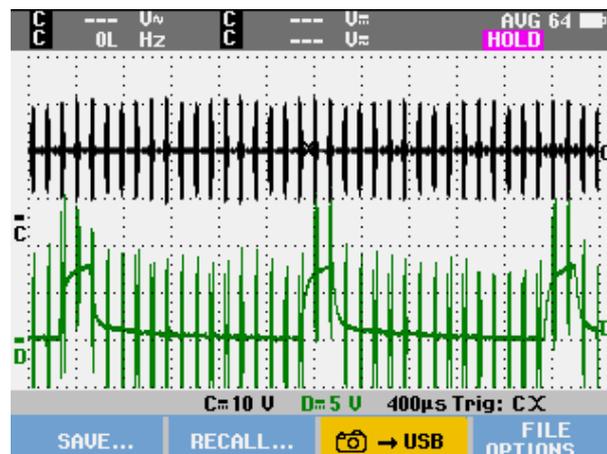


Figura 7.1: Sinais do inversor de frequência em um ambiente industrial

Pelos resultados alcançados por esse trabalho, outras bases da Schlumberger

se mostraram interessadas na implementação do projeto. Sendo assim, como perspectivas futuras, o projeto será publicado pela equipe de engenheiros de manutenção de *D&M* em canais internos de comunicação da empresa e ter a sua documentação compartilhada entre as mais de 80 bases ao redor do mundo.

Referências

- [1] Brasil Escola - História do Petróleo no Brasil
<http://www.brasilecola.com/brasil/historia-do-petroleo-no-brasil.htm>
Acesso em Junho de 2012.
- [2] CPDOC-FGV. A Petrobras e a auto-suficiência na produção de petróleo, por Adelina Novaes e Cruz, Carlos Eduardo Barbosa Sarmiento e Regina da Luz Moreira
- [3] O Estado de São Paulo - O que muda com o novo marco regulatório do pré-sal
<http://www.estadao.com.br/noticias/economia,o-que-muda-com-o-novo-marco-regulatorio-do-pre-sal,427579,0.htm>
Acesso em Julho de 2012.
- [4] Petrobras - 12 perguntas para você entender o novo marco regulatório
<http://www.petrobras.com.br/minisite/presal/pt/perguntas-respostas/>
Acesso em Julho de 2012.
- [5] SCHLUMBERGER - OIL CD - Confidencial
- [6] Petrobras - Pré-Sal - Vivendo uma revolução
<http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/alternativo/transcricoes/pre-sal/>
Acesso em Junho de 2012.
- [7] IEA - International Energy Agency
<http://www.iea.org/stats/>
Acesso em Julho de 2012.
- [8] WEBARTIGOS - Petróleo: Futuro Escasso ou Promissor
<http://www.webartigos.com/artigos/petroleo-futuro-escasso-ou-promissor/60809/>
Acesso em Junho de 2012.
- [9] Veja.com - Pré-sal
http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/perguntas_respostas/pre-sal/index.shtml
Acesso em Junho de 2012.

- [10] BEZERRA, F. Automação do Processo de Inspeção Elétrica de Ferramentas. Monografia para a Graduação no curso de Engenharia de Controle e Automação, UFSC, Florianópolis, 2011.
- [11] Portal Brasil - Reservas de petróleo e gás poderão chegar a 30 bilhões de barris, diz Petrobras
<http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2012/05/16/reservas-de-petroleo-e-gas-poderao-chegar-a-30-bilhoes-de-barris-diz-petrobras>
Acessado em Julho de 2012
- [12] Portal Brasil - Campanha da ANP capacita jovens para o setor de óleo e gás
<http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2012/06/25/campanha-da-anp-capacita-jovens-profissionalmente-para-setor-de-oleo-e-gas>
Acessado em Julho de 2012
- [13] Portal Brasil - Petrobras deve investir US\$ 236,5 bilhões até 2016 para aumentar produção de petróleo
<http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2012/06/15/petrobras-deve-investir-us-236-5-bilhoes-ate-2016-para-aumentar-producao-de-petroleo>
Acessado em Julho de 2012
- [14] Portal Brasil - Ampliação de parque de refino brasileiro receberá US\$ 31,2 bilhões da Petrobras aumentar produção de petróleo
<http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2012/06/25/ampliacao-de-parque-de-refino-brasileiro-recebera-us-31-2-bilhoes-da-petrobras>
Acessado em Julho de 2012
- [15] BARBOSA, Rodolfo e ALVES, Aluísio. Petrobras ultrapassa Microsoft em valor de mercado, diz estudo. São Paulo: Agência Reuters, 19/05/2008 - 15h17
- [16] Wikipedia - Petrobras em números
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Petrobras>
Acessado em Julho de 2012
- [17] SFREDO, P. B., Construção da Área de Calibração da Ferramenta de Indução e Estudo de Sua Funcionalidade para Análise de Propriedades Petrofísicas de Formações Geológicas. Monografia para a Graduação no curso de Engenharia de Controle e Automação, UFSC, Florianópolis, 2006.

- [18] BOARIN PINTO, Silvia Helena; MONTEIRO DE CARVALHO, Marly; LEE HO, Linda. Implementação de programas de aulidade: um Survey em empresas de grande porte no Brasil. Revista Gestão & Produção. v.13, n.2, p191-203, mai.-ago. 2006.
- [19] Wikipedia - Seis Sigma
<http://pt.wikipedia.org/wiki/DMAIC>
Acessado em Julho de 2012
- [20] MELLO, A. E. N. S., Aplicação do mapeamento de processos e da simulação no desenvolvimento de projetos de processos produtivos. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- [21] DREHER, J. R., Módulo IV - Comandos Industriais II: Chaves de Partida Suave *Soft-Starter* e Inversor de Frequência. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina Unidade de Chapecó - CEFET/SC, 2008.
- [22] HENRIQUE, M., Conversores de Frequência e *Soft-Starters*. Curso ministrado pela EJM Engenharia. <http://www.ejm.com.br/download/Inversores.pdf>
- [23] Wikipedia - Inversor
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Inversor>
Acessado em Julho de 2012
- [24] SCHNEIDER, P. S., Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 2000.
- [25] Mecatrônica Atual - Medidor de Vazão tipo Magnético
<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/790>
Acessado em Julho de 2012
- [26] SCHNEIDER, P. S., Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 2000.
- [27] Wikipedia - Arduino
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Arduino>
Acessado em Junho de 2012

- [28] WEG AUTOMAÇÃO, Guia de Aplicação de Inversores de Frequência, 2ª Edição.
- [29] LEE, J.S. et al. Building a Safe and Robust Industrial System with Avago Technologies Optocouplers. Avago Technologies. Retrieved November 2, 2010.
- [30] Wikipedia - Filtro passa-baixo
http://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_passa-baixo
Acessado em Junho de 2012
- [31] Electronic's World - Como fazer sua PCI (Placa de Circuito Impresso)
<http://lucascavalheiro.wordpress.com/2008/10/22/como-fazer-pci/>
Acessado em Junho de 2012
- [32] NORMEY-RICO, Introdução à Análise e Projeto de Sistemas de Controle Linear, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [33] NORMEY-RICO, Funcionamento de Sistemas em Regime Permanente, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [34] COELHO, A. A. R., Identificação de Sistemas Dinâmicas Lineares, Editora da UFSC, 2004.
- [35] CARVALHO, R. L., Desenvolvimento de Modelos e Algoritmos de Controle Avançado para Separadores Trifásicos, Relatório de Estágio, Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.
- [36] ASTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. Automatic Tuning of PID Controllers. Estados Unidos da América: [s.n.]. 1988. 141 p.
- [37] SOARES, P. M. O. R., Discretização de Controladores Contínuos. Dissertação submetida para satisfação parcial do grau de mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Universidade do Porto. Portugal, 1996.
- [38] NORMEY-RICO, Interconexão de Sistemas Contínuos e Discretos, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [39] Wikipedia - Java (linguagem de programação)
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Java_\(linguagem_de_programa%C3%A7%C3%A3o\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Java_(linguagem_de_programa%C3%A7%C3%A3o))
Acessado em Junho de 2012

[40] Wikipedia - Comunicação Serial

http://pt.wikipedia.org/wiki/Comunica%C3%A7%C3%A3o_serial

Acessado em Junho de 2012

Apêndice A : Funcionamento Básico dos Inversores de Frequência

Há algum anos, para se ter um controle preciso de velocidade era necessário utilizar motores de corrente contínua. Entretanto, isso acarretava em diversos problemas como custo do motor, necessidade de retificação da tensão e manutenção. Com os avanços da eletrônica de potência e com as necessidades de aumento de produção, uma série de equipamento na área de automação foram desenvolvidos e lançados no mercado. O inversor de frequência é um desses equipamentos. Versátil e dinâmico, os inversores de frequência permitiram o uso de motores de indução para controle de velocidade em substituição aos motores de corrente contínua [21].

Para controlar a velocidade de motores de indução trifásicos, o método mais eficiente consiste na variação da frequência de sua fonte alimentadora através de inversores de frequência. O inversor de frequência, também chamado por alguns fabricantes de conversor de frequência, é um equipamento capaz de controlar a velocidade e torque de motores de corrente alternada. Esse equipamento pode ter várias filosofias de controle e várias potências. Independentemente do fabricante e modelo, a estrutura básica do inversor é a mesma, conforme ilustra a Figura A.1. O que muda significativamente de um tipo para outro é a filosofia de controle [21].

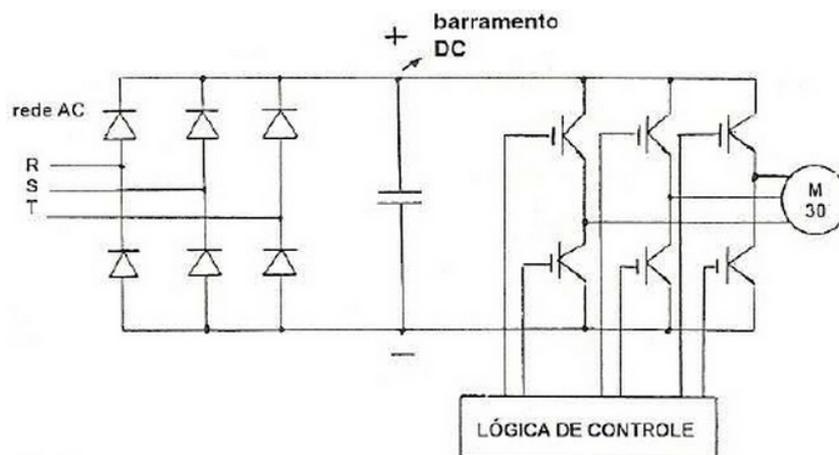


Figura A.1: Estrutura básica de um inversor de frequência trifásico.

A estrutura básica do inversor é composta por diodos, capacitores e transistores bipolares de porta isolada (IGBTs). Esse conjunto de componentes eletrônicos têm a função de retificar a rede AC, filtrar o sinal e chavear a saída trifásica para o motor de indução, esquematizado na Figura A.2.

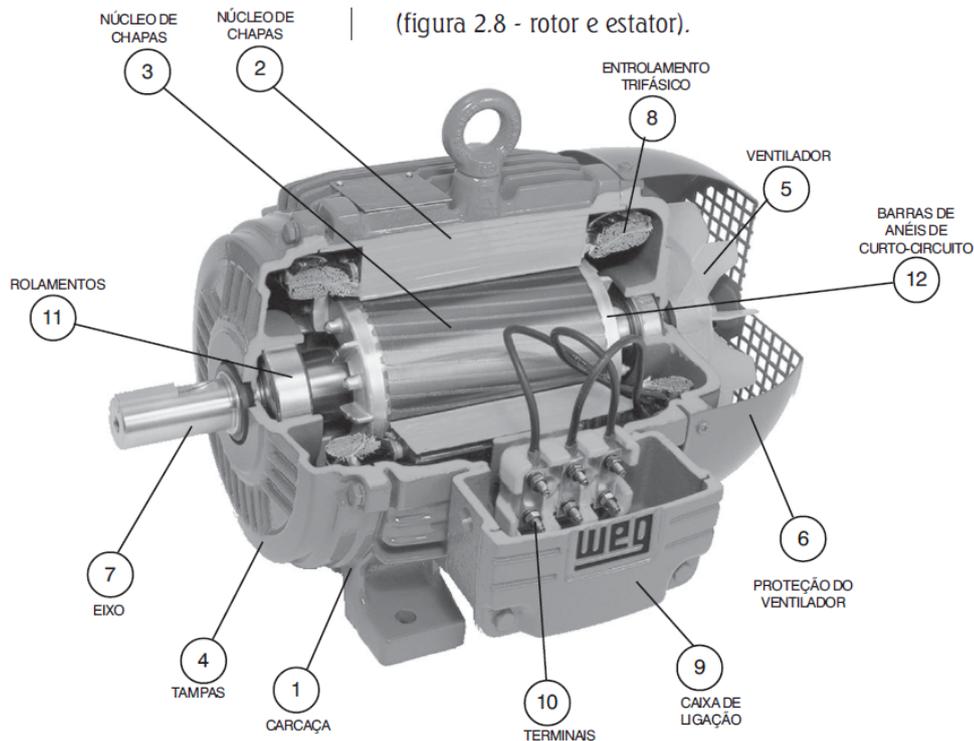


Figura A.2: Componentes de um motor de indução [28].

O circuito que comanda os IGBTs é responsável pela geração de determinados pulsos que fazem com que os transistores chaveiem o circuito da Figura A.1, variando a tensão e frequência do sinal enviado para o motor. O método de geração desses pulsos é conhecido por modulação PWM (*Pulse With Modulation*) e tem a forma mostrada na Figura A.3.

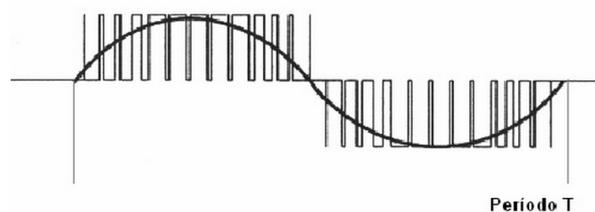


Figura A.3: Modulação PWM [21].

A sigla PWM em português significa "modulação por largura de pulso". Ela é uma técnica de controle de potência, tensão ou corrente através da largura do pulso de excitação, oriundos dos sistemas de controle. Esse controle é feito através do seu ciclo de trabalho (Duty Cycle) da onda. O ciclo de trabalho é uma característica de uma onda quadrada, representada pela porcentagem do tempo do período de onda em que o sinal está com amplitude máxima.

Essa técnica pode ser melhor compreendida através da Figura A.4. Nela notamos três sinais cuja forma de onda é quadrada. A amplitude dos três também é a mesma, igual a $5 V_{cc}$. Como os três têm mesmo período então a frequência tem o mesmo valor para todos ($f = 1/T$) [21]. Por exemplo, para o primeiro sinal da Figura A.4, durante metade do período de onda o sinal está em nível alto ($5 V_{cc}$) e na outra metade do tempo ele está em nível baixo ($0 V_{cc}$). Nesse caso o seu *duty cycle* é de 50%.

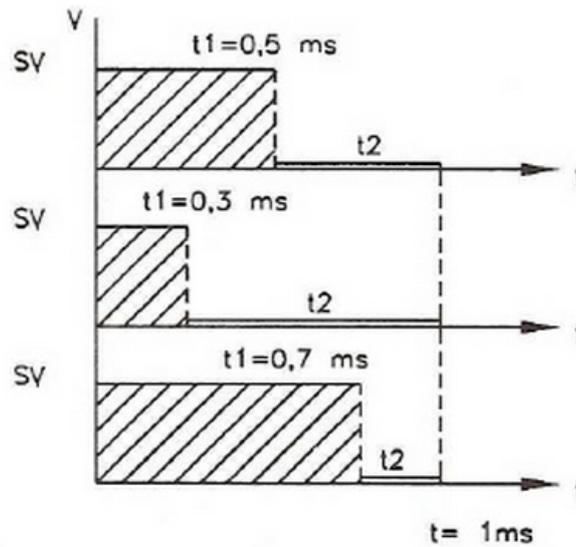


Figura A.4: *Duty Cycle* de um sinal PWM [21].

Para sistemas com cargas resistivas, como motores de indução, o valor de tensão "percebida" pelo sistema é equivalente ao *duty cycle*. Isto é, no exemplo da Figura A.4, para um *duty cycle* de 50%, um motor de indução "perceberia" um sinal de tensão com 50% do valor da amplitude, isto é, um sinal constante de $2,5 V_{cc}$. Em outras palavras, a técnica de PWM não varia a tensão real do sinal, mas varia a tensão eficaz. Isso faz com que a tensão da fonte de alimentação não precise variar, variando apenas o sinal de controle. O uso de PWM possui grandes vantagens, a principal delas é a eficiência, devido ao fato de que, teoricamente, um controle PWM não dissipa potência.

Apêndice B : Medidor de Vazão Tipo Magnético

O medidor de vazão magnético, também conhecido como eletromagnético ou por tensão induzida, é um medidor que utiliza um princípio de medição antigo (lei de Faraday), que será explicada melhor a seguir. O medidor de vazão magnético atende a um gigantesco número de aplicações como, por exemplo: medição de vazão de iogurte, xaropes de glucose com alta concentração, cerveja e derivados, polpa de celulose, polpa de minério, ácidos em geral, efluentes industriais, esgoto, lamas, pastas, etc [25].

Para que ele possa ser indicado em uma aplicação basta que o líquido possua uma condutividade elétrica mínima admitida, dependendo de sua pressão, temperatura e velocidade de escoamento na tubulação do processo, com certeza a vazão desse líquido poderá ser medida precisamente, conforme a necessidade do usuário [25].

O cientista Michael Faraday demonstrou pela primeira vez o princípio que leva o seu nome em 1832. Desde então, foram desenvolvidos muitos equipamentos baseados na sua lei, o medidor de vazão magnético é um desses equipamentos. O primeiro medidor de vazão magnético foi desenvolvido no final da década de 40, já no século 20. No entanto, medidores de vazão magnéticos modernos e realmente eficazes, só surgiram no final dos anos 70. Apesar do medidor de vazão magnético ser baseado num princípio antigo, ele continua sendo aperfeiçoado e customizado para algumas aplicações por alguns fabricantes [25].

A lei de Faraday utilizada para medidores de vazão, determina que o movimento do líquido (o qual deverá possuir uma condutividade elétrica mínima admitida) através do campo magnético induz uma força eletromotriz que atravessa o líquido num sentido perpendicular ao campo magnético, sendo essa f.e.m. diretamente proporcional à sua velocidade de escoamento [25], Figura B.1.

Devido ao campo magnético empregado na indução, o material do tubo medidor não deve ser material não magnético, para não conduzir e nem modificar a direção do campo magnético gerado. Por meio de dois eletrodos inseridos em um plano perpendicular ao campo magnético, torna-se possível a medição da força eletromotriz induzida por meio de um milivoltímetro. Essa força eletromotriz induzida (dada em milivolts), não é afetada pela temperatura, viscosidade, pressão, turbulência, densidades

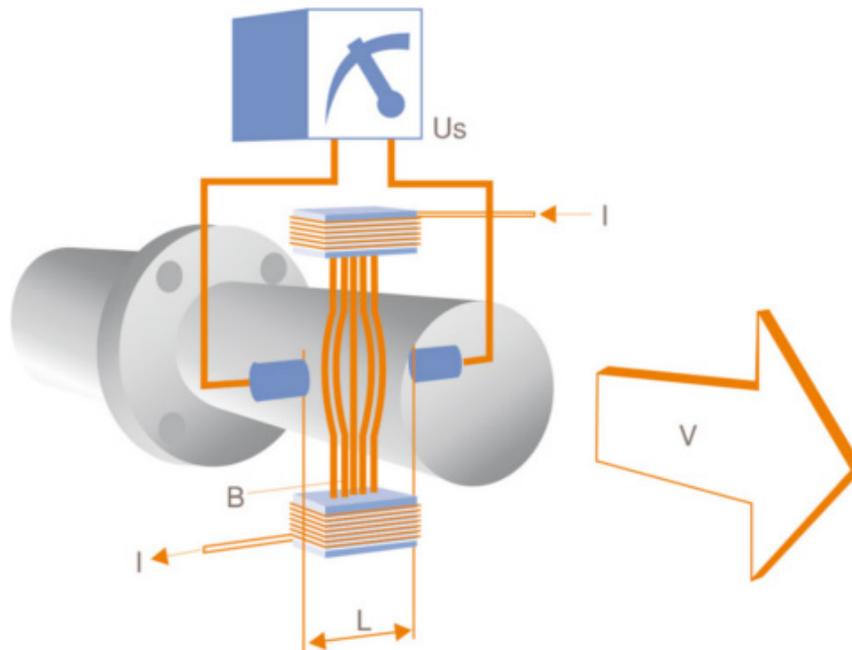


Figura B.1: Princípio de funcionamento de medidores eletromagnéticos de vazão

específica/relativa e condutividade elétrica do líquido medido, desde que a condutividade elétrica esteja acima do valor mínimo exigido [25].

Além do medidor eletromagnético de vazão, diversas outras tecnologias de instrumentação também são utilizadas. A tabela da Figura B.2 mostra as principais características de cada um.

Tipo	Classe	Faixa	Vari- ção da faixa	Pressão máxima MPa	faixa de temperatu- ra °C	viscosidade máxima cSt ($10^{-6}m^2$ /s	escala	indicação	incerteza padrão %	Material	perda de carga kPa	compri- mento de linha cm	considera- ções especiais	alimen- tação	custo relativo
obstrução	Orifício	liq. 0,012→220 gás 23→43000	5:1	42	-270 → 1100	4000	raiz quadra- da	remota pressão diferencial	1-2 fundo de escala de pressão diferencial	metais em geral	0,7 → 200	4 → 30	tubo reto: 10 Diam. montante 3 Diam. jusante	nenhu- ma	1,0
	Bocal	liq. 0,031→950 gás 45→240000	5:1	10	-50 → 800	4000	raiz quadra- da	remota pressão diferencial	1-2 fundo de escala de pressão diferencial	bronze, aço, aço inox, ferro	0,7 → 140	2 → 60	tubo reto: 10 Diam. montante 3 Diam. jusante	nenhu- ma	1,4
	Venturi	liq. 0,03→ 950 gás 45→240000	5:1	10	-50 → 800	4000	raiz quadra- da	remota pressão diferencial	1-2 fundo de escala de pressão diferencial	bronze, aço, aço inox, ferro, plástico	0,7 → 100	2 → 60	tubo reto: 10 Diam. montante 3 Diam. jusante	nenhu- ma	1,5
arrasto	rotâmetro de vidro	liq. $0,1 \times 10^{-3}$ → 16 gás 0,006 → 330	10:1	2	-45 → 200	100	linear	local remota (elétrica ou pneumática)	1-2 fundo de escala	metais em geral, plásticos e cerâmicos	0,05 → 7	0,6 → 10	montagem vertical	nenhu- ma	1,0
	rotâmetro de metal	liq. 0,03 → 250 gás 0,2 → 470	10:1	35	-180 → 870	100	linear	local remota (elétrica ou pneumática)	1-2 fundo de escala	metais em geral, plásticos e cerâmicos	0,3 → 70	1,2 → 30	montagem vertical	nenhu- ma	1,2
	turbina ou hélice	liq. $0,2 \times 10^{-3}$ → 3100 gás 0,2 → 140000 liq. limpo 0,02 → 63	15:1 10:1 10:1	105 1	-270 → 540 -15 → 150	30 2000	linear	remota elétrica local remota elétrica	0,5 da leitura 1 da leitura	alumínio, aço inox bronze, aço, aço inox, ferro	14 → 70 7 → 140	0,3 → 90 1,2 → 15	qualquer preferên- cia na horizontal	elétrica nenhu- ma	5,0 1,0
magnéti- co		líquidos condutivos apenas $0,1 \times 10^{-3}$ → 3100	20:1	4	-130 → 180	1000	linear	remota elétrica	0,5 → 1 fundo de escala	plástico, aço inox	muito pequena	0,2 → 200	qualquer	elétrica	6,0

Figura B.2: Quadro comparativo entre tipos de medidores de vazão

Anexo A: Diagrama do Inversor de Frequência Varispeed E7 - Yaskawa

◆ Electrical Connection

■ Wiring the Inverter

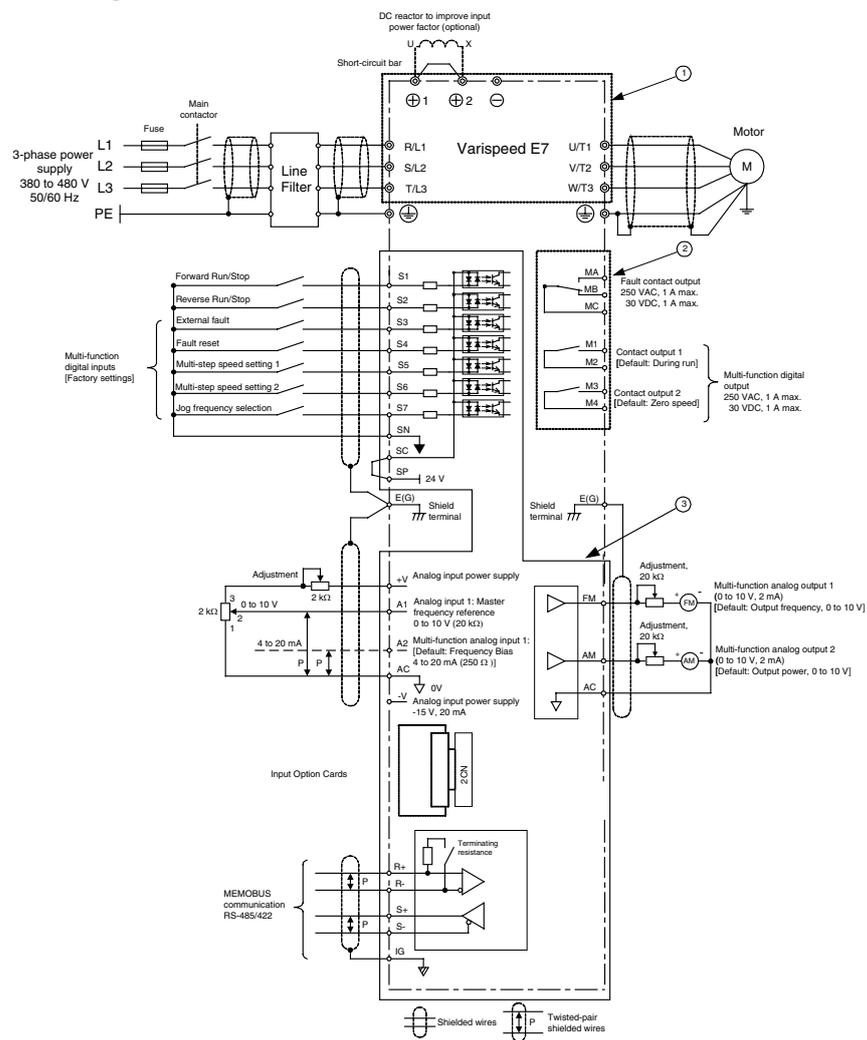


Fig 4 Wiring Diagram

Anexo B: Lista de Componentes

A lista de componentes necessárias para a construção da placa eletrônica de aquisição de dados é mostrada na Figura B.1.

Tabela B.1: Lista de componentes

ID	Valor	Package	Tipo	Posição (nm)	Orientação
C2	10 μ F	E2-5	rc1	(57.69 21.15)	R180
JP1		1X06	pinhead	(38.7 6.05)	R0
JP2		1X06	pinhead	(56.45 6.05)	R0
JP3		1X08	pinhead	(32.05 54.15)	R180
JP4		1X08	pinhead	(53.9 54.15)	R180
OK1	4N35	DIL06	optocoupler	(40.41 23.36)	R0
OK2	4N35	DIL06	optocoupler	(40.41 23.36)	R0
R1	1.2k Ω	0207/10	resistor	(21.62 13.76)	R180
R2	10k Ω	0207/10	resistor	(21.64 9.54)	R0
R3	10k Ω	0207/10	resistor	(37.74 13.94)	R0
R4	1.2k Ω	0207/10	resistor	(30.8 49.4)	R0
R6	1k Ω	RS3	pot	(28.2 22.9)	R270
R7	10k Ω	0207/10	resistor	(56.89 13.27)	R180
R8	220 Ω	0207/10	resistor	(55.89 40.87)	R0
R9	10k Ω	0207/10	resistor	(18.51 28.19)	R270
SP1	F/CM12P	F/CM12P	buzzer	(11.49 46.36)	R180
T1	2N3904	TO92	transistor	(56.24 33.05)	R270
X4		AK500/2	con-ptr500	(8.65 12.1)	R270
X5		AK500/3	con-ptr500	(8.85 28.2)	R270

Anexo C: Tabela de Transformadas

Table of Laplace and Z-transforms

	$X(s)$	$x(t)$	$x(kT)$ or $x(k)$	$X(z)$
1.	–	–	Kronecker delta $\delta_0(k)$ 1 $k = 0$ 0 $k \neq 0$	1
2.	–	–	$\delta_0(n-k)$ 1 $n = k$ 0 $n \neq k$	z^{-k}
3.	$\frac{1}{s}$	$1(t)$	$1(k)$	$\frac{1}{1-z^{-1}}$
4.	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}	e^{-akT}	$\frac{1}{1-e^{-aT}z^{-1}}$
5.	$\frac{1}{s^2}$	t	kT	$\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$
6.	$\frac{2}{s^3}$	t^2	$(kT)^2$	$\frac{T^2 z^{-1}(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})^3}$
7.	$\frac{6}{s^4}$	t^3	$(kT)^3$	$\frac{T^3 z^{-1}(1+4z^{-1}+z^{-2})}{(1-z^{-1})^4}$
8.	$\frac{a}{s(s+a)}$	$1 - e^{-at}$	$1 - e^{-akT}$	$\frac{(1 - e^{-aT}z^{-1})}{(1-z^{-1})(1 - e^{-aT}z^{-1})}$
9.	$\frac{b-a}{(s+a)(s+b)}$	$e^{-at} - e^{-bt}$	$e^{-akT} - e^{-bkT}$	$\frac{(e^{-aT} - e^{-bT})z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})(1 - e^{-bT}z^{-1})}$
10.	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}	kTe^{-akT}	$\frac{Te^{-aT}z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})^2}$
11.	$\frac{s}{(s+a)^2}$	$(1-at)e^{-at}$	$(1-akT)e^{-akT}$	$\frac{1 - (1+aT)e^{-aT}z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})^2}$
12.	$\frac{2}{(s+a)^3}$	$t^2 e^{-at}$	$(kT)^2 e^{-akT}$	$\frac{T^2 e^{-aT}(1 + e^{-aT}z^{-1})z^{-1}}{(1 - e^{-aT}z^{-1})^3}$
13.	$\frac{a^2}{s^2(s+a)}$	$at - 1 + e^{-at}$	$akT - 1 + e^{-akT}$	$\frac{(aT - 1 + e^{-aT}) + (1 - e^{-aT} - aTe^{-aT})z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2(1 - e^{-aT}z^{-1})}z^{-1}$
14.	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$\sin \omega t$	$\sin \omega kT$	$\frac{z^{-1} \sin \omega T}{1 - 2z^{-1} \cos \omega T + z^{-2}}$
15.	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$	$\cos \omega kT$	$\frac{1 - z^{-1} \cos \omega T}{1 - 2z^{-1} \cos \omega T + z^{-2}}$
16.	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \sin \omega t$	$e^{-akT} \sin \omega kT$	$\frac{e^{-aT} z^{-1} \sin \omega T}{1 - 2e^{-aT} z^{-1} \cos \omega T + e^{-2aT} z^{-2}}$
17.	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \cos \omega t$	$e^{-akT} \cos \omega kT$	$\frac{1 - e^{-aT} z^{-1} \cos \omega T}{1 - 2e^{-aT} z^{-1} \cos \omega T + e^{-2aT} z^{-2}}$
18.	–	–	a^k	$\frac{1}{1 - az^{-1}}$
19.	–	–	a^k $k = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{z^{-1}}{1 - az^{-1}}$
20.	–	–	ka^{k-1}	$\frac{z^{-1}}{(1 - az^{-1})^2}$
21.	–	–	$k^2 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1 + az^{-1})}{(1 - az^{-1})^3}$
22.	–	–	$k^3 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1 + 4az^{-1} + a^2 z^{-2})}{(1 - az^{-1})^4}$
23.	–	–	$k^4 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1 + 11az^{-1} + 11a^2 z^{-2} + a^3 z^{-3})}{(1 - az^{-1})^5}$
24.	–	–	$a^k \cos k\pi$	$\frac{1}{1 + az^{-1}}$

$x(t) = 0$ for $t < 0$
 $x(kT) = x(k) = 0$ for $k < 0$
 Unless otherwise noted, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$