



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA E INSTITUTO DE MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA

DUILIO ALMEIDA NORBERTO DA SILVA

PROJETO E CONTROLE PREDITIVO DE UMA PLANTA
PROTÓTIPO DE BOMBEIO MECÂNICO

Salvador

2016

DUILIO ALMEIDA NORBERTO DA SILVA

**PROJETO E CONTROLE PREDITIVO DE UMA PLANTA
PROTÓTIPO DE BOMBEIO MECÂNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Leizer Schnitman

Salvador

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

DUILIO ALMEIDA NORBERTO DA SILVA

PROJETO E CONTROLE PREDITIVO DE UM PLANTA
PROTÓTIPO DE BOMBEIO MECÂNICO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Examinada por:

Leizer Schnitman - Orientador

Leizer Schnitman
Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) Brasil, 2001.

Universidade Federal da Bahia.

Marcio A. F. Martins – Examinador Interno

Marcio Andre Leonardo Martins
Doutor em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo (USP) Brasil, 2014.
Universidade Federal da Bahia.

Manuel de A. Barreto Filho – Examinador Externo

Manuel de A. Barreto Filho
Doutor em Engenharia de Petróleo pela The University of Texas At Austin, Estados Unidos, 2001.

PETROBRAS S/A, UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA.

André L. Maitelli – Examinador Externo

André L. Maitelli
Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) Brasil, 1994.

Universidade do Rio Grande do Norte

José F. dos S. Corrêa – Examinador Externo

José F. dos S. Corrêa
Mestre em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) 1995, Brasil.

PETROBRAS S/A.

Salvador, 26 de janeiro de 2016

Dedico este trabalho à minha avó

Eu jamais iria para a fogueira por uma
opinião minha, afinal, não tenho certeza alguma.
Porém, eu iria pelo direito de ter e mudar de opinião,
quantas vezes eu quisesse

FRIEDRICH WILHELM NIETZSCHE

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família.

Ao meu orientador.

Aos amigos feitos durante esta jornada, em especial ao engenheiro Nilmar de Souza por projetar a estrutura mecânica do protótipo.

À CAPES e ao CTAI, pelo o apoio financeiro (bolsa) e a infraestrutura, respectivamente.

À Universidade Federal da Bahia.

RESUMO

O presente trabalho trata o projeto e desenvolvimento de um protótipo de um sistema de bombeio mecânico para a elevação artificial de petróleo, incluindo a modelagem e controle do mesmo. Esse protótipo foi construído com o objetivo de mostrar de forma didática os fenômenos físicos que acontecem em um sistema de bombeio mecânico real, se caracterizando como uma interessante plataforma de testes para variadas técnicas de controle. A presença de incertezas no modelo dinâmico desse protótipo, as quais estão usualmente relacionadas à sua montagem elétrica e/ou mecânica, podem prejudicar o controle e o bom desempenho desse sistema. Desse modo, a proposta dessa dissertação teve, além do desenvolvimento de um protótipo funcional de bombeio mecânico, mais dois objetivos principais. O primeiro foi levantar um modelo dinâmico desse protótipo utilizando técnicas de identificação de sistemas. E o segundo foi o estudo e implementação de um controlador avançado baseado em modelo, nesse caso, o Controle Preditivo Generalizado com Restrições. Os resultados obtidos indicam que o modelo desenvolvido é representativo do sistema visto que reproduz a dinâmica do sistema na região de operação para o qual foi projetado. Quanto ao controlador, os resultados obtidos de testes experimentais indicam que este é capaz de lidar com as possíveis incertezas resultantes do modelo e não linearidades inerentes ao sistema. O controlador desenvolvido se mostrou capaz de controlar o sistema em zonas de operação diferentes daquele que o modelo foi derivado. Com isso, este estudo conclui pela viabilidade e a implementação do controladores preditivos em sistemas de bombeio mecânico reais.

Palavras-chave: Identificação de Sistemas; Controle Preditivo Generalizado; Bombeio Mecânico.

ABSTRACT

This work presents the design of a mechanical pump system prototype, which is used for oil artificial lift, including its modeling and control. This prototype was built with the purpose of didactically showing the physical phenomena that occur in a real mechanical pumping system, and it shows to be a very interesting platform to be explored by different control techniques. The presence of uncertainty in the dynamic model of this prototype, which are usually related to their electrical and/or mechanical assembly, may affect the control performance of this system. Thus, the purpose of this dissertation was the development of a functional mechanical pump prototype, and two other main objectives. The first was to apply system identification techniques in order to identify a dynamic model of this prototype. The second was the study and implementation of an advanced model-based controller, in this case, the Generalized Predictive Control with Constraints is used. The results indicate that the developed model is representative of the system because it explains the dynamics of the system in the operating region for which it was designed. As for the controller, the results of experimental tests indicate its ability to cope with the possible uncertainties arising from the model. The controller was also able to control the system in different operating points for which the model was derived. Thus, it concludes that it is feasible to implement the generalized predictive controller in real mechanical pumping systems.

Keywords: Identification systems; Generalized Predictive Control; Mechanical pumps.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-1. Conceito do MPC.....	21
Figura 1.1-2. Diagrama esquemático do MPC.	22
Figura 2.3-1 Diagrama de blocos do modelo discreto geral	31
Figura 2.4-1 Modelagem caixa branca, caixa preta e caixa cinza.	34
Figura 2.4-2 Etapas do procedimento de identificação.	35
Figura 3.3-1 Diagrama de blocos da lei de controle do GPC.	51
Figura 4.2-1. Sistema BM típico.....	58
Figura 4.2-2. Bomba de fundo.	58
4.3-1 Ciclo de bombeio.	59
Figura 4.3-2. Esquema gráfico da pancada de fluido.	61
Figura 4.3-3. Carta dinamométrica de superfície.	62
Figura 4.3-4. CDF de um SBM operando sob condição normal.	62
Figura 4.3-5. Carta dinamométrica associada à condição de pancada de fluido.	63
Figura 5-4.3-1.Sistema completo do Protótipo de Bombeio Mecânico, PBM ...	64
Figura 5.3-1. Mesa reaproveitada sendo preparada com a furação apropriada (lado esquerdo) mesa com a coluna de poço sendo instalada (lado direito).	68
Figura 5.3-2. Tripé	69
Figura 5.3-3. Dimensões e balancim antes e depois do acabamento	70
Figura 5.3-4. Fixação da Biela, manivela e polia.....	71
Figura 5.3-5. Dimensões e Haste polida	71
Figura 5.3-6. Cap de 50 mm e anel de vedação à esquerda, cabeça de produção à direita	72
Figura 5.3-7. Revestimento do poço	72
Figura 5.3-8. Fundo do poço à direita e Parte superior do poço à esquerda. ...	73
Figura 5.3-9. Coluna de produção	73
Figura 5.3-10. Reservatório.	74
Figura 5.3-11. Tubulação na parte inferior da Base.	74
Figura 5.3-12. Materiais utilizados para a produção da válvula de pé à esquerda, pistão e válvula de passeios mantados à direita	75

Figura 5.3-13. Materiais utilizados para a produção da válvula de pé (a – CAP; b – Redução; c – Bola de mouse; d – Tela de estufa).....	76
Figura 5.3-14. Válvula de pé montada	76
Figura 5.4-1. Instrumentação do protótipo.	77
Figura 5.4-2. Filtro analógico do sensor de pressão	78
Figura 5.4-3. Curva Tensão de Saída x Pressão Diferencial.....	78
Figura 5.4-4. Curva Tensão de Saída x Nível do poço.....	79
Figura 5.4-5. Sensor de Pressão MXP5010 e sua montagem no sistema	80
Figura 5.4-6. Balança Digital (lado esquerdo); Strain Gauge da balança (lado direito).....	80
Figura 5.4-7. Amplificador de Instrumentação e Ponte de Wheatstone.....	81
Figura 5.4-8. Resposta em tensão dada pela célula de carga para determinados pesos	81
Figura 5.4-9. Sensor de Carga Instalado	82
Figura 5.4-10. Potenciômetro Murata.....	83
Figura 5.4-11. Potenciômetro no sistema	83
Figura 5.4-12. Sensor OPB626.....	84
Figura 5.4-13. Princípio de Funcionamento do Sensor	84
Figura 5.4-14. Motor AK555/11.1PF12R83CE-SG.....	85
Figura 5.5-1. CLP utilizado no controle do PBM	86
Figura 5.5-2. Tela principal da IHM.....	87
Figura 5.5-3. Tela das variáveis do processo.....	88
Figura 5.5-4. Tela de rotina de testes.	89
Figura 5.5-5. Tela de histórico de produção e CPM	89
Figura 6.2-1. Etapas do planejamento experimental.....	91
Figura 6.2-2. Relação em tensão e CPM	93
Figura 6.2-3. Ponto de operação.	95
Figura 6.2-4. Resposta ao degrau do PBM.....	96
Figura 6.2-5. Resposta ao degrau do PBM.....	96
Figura 6.2-6. Gráfico da constante tempo	97
Figura 6.2-7. Resposta ao sinal PRBS.....	98
Figura 6.3-1. Parâmetros a1 (linha azul) e a2 (linha verde) estimados	100
Figura 6.3-2. Parâmetro b1 estimado.....	101
Figura 6.3-3. Diagrama de blocos do modelo ARX estimado	101

Figura 6.4-1. Validação do modelo	103
Figura 6.5-1. Simulação do GPC sem restrições	105
Figura 6.5-2. Simulação Do GPC com restrições, $N_y = 15$	106
Figura 6.5-3. Simulação do GPC com restrições, $N_y = 30$	107
Figura 6.6-1. Esquema físico do sistema de controle GPCR aplicado PBM...	107
Figura 6.6-2. Diagrama de blocos do GPC	108
Figura 6.6-3. Resposta do sistema a um sinal de referência de 15 cm	109
Figura 6.6-4. Sinal de controle para a um sinal de referência de 15 cm.....	110
Figura 6.6-5. Sinal de erro	110
Figura 6.6-6. GPC para diferentes regiões de operação (sinal de saída).....	111
Figura 6.6-7. GPC para diferentes regiões de operação (sinal de controle)...	112
Figura 6.6-8. GPC para diferentes regiões de operação (sinal de erro)	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1. Relação entre nível e tensão	79
Tabela 5-2. Tensão vs rotação	85
Tabela 5-3. Máximo rendimento	86
Tabela 6-1. Relação em tensão e CPM	93
Tabela 6-2. Tabela de parâmetros de sintonia	104
Tabela 6-3. Parâmetro de sintonia do GPC com restrições	106
Tabela 6-4. Parâmetros de sintonia do GPC	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARX	<i>Autorregressivo com entradas exógenas</i>
ARIX	<i>Autorregressivo, integral com entradas exógenas</i>
ARMAX	<i>Autorregressivo, média móvel com entradas exógenas</i>
ARIMAX	<i>Autorregressivo, média móvel, integral com entradas exógenas</i>
CLP	<i>Controlador Lógico programável</i>
DC	<i>Corrente Contínua</i>
DMC	<i>Controle Por Matriz Dinâmica</i>
GPC	<i>Controle Preditivo Generalizado</i>
MIMO	<i>Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas</i>
MQ	<i>Mínimos Quadrados</i>
MQR	<i>Mínimos Quadrados Recursivo</i>
MISO	<i>Múltiplas Entradas, Única Saída</i>
MPC	<i>Controle Preditivo Baseado em Modelo</i>
MPHC	<i>Controle Preditivo Heurístico Baseado em Modelo</i>
MAC	<i>Controle Algorítmico Baseado em Modelo</i>
PID	<i>Proporcional, Integral e Derivativo</i>
PBM	<i>Protótipo de Bombeio Mecânico</i>
PFC	<i>Controle Preditivo Funcional</i>
SBM	<i>Sistema de Bombeio Mecânico</i>
SIMO	<i>Entrada única, múltiplas saídas</i>
SISO	<i>Única entrada, única saída</i>
UB	<i>Unidade de Bombeio</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO	20
1.1.1 CONCEITO E ESTRATÉGIA DO MPC.....	21
1.1.2 RESTRIÇÕES EM CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO.....	23
1.2 MODELO DO PROCESSO.....	23
1.3 SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO	24
1.4 PROPOSTA E JUSTIFICATIVA	25
1.5 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	25
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
1.7 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	26
2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	27
2.1 INTRODUÇÃO.....	27
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS	27
2.2.1 TIPOS DE MODELOS.....	28
2.3 REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS.....	29
2.3.1 REPRESENTAÇÃO GERAL DISCRETA.....	29
2.3.2 MODELO ARX.....	31
2.3.3 MODELO ARIX.....	31
2.3.4 MODELO ARMAX	32
2.3.5 MODELO ARIMAX	32

2.4	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	33
2.4.1	ETAPAS NA IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	34
2.4.2	ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS	35
2.4.2.1	O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	36
2.4.2.2	ESTIMAÇÃO RECURSIVA USANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	38
2.5	CONCLUSÃO.....	42
3	CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO – CASO SISO.....	43
3.1	INTRODUÇÃO	43
3.2	PREDITORES.....	43
3.2.1	MODELO DE PREDIÇÃO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE DIOFANTINE	44
3.2.2	MODELO DE PREDIÇÃO PELO MÉTODO MATRICIAL	47
3.3	LEI DE CONTROLE DO GPC PARA O CASO SISO IRRESTRITO	50
3.4	LEI DE CONTROLE PARA DO GPC O CASO RESTRITO.....	51
3.4.1	RESTRIÇÕES NA VARIAÇÃO DO SINAL DE CONTROLE	52
3.4.2	RESTRIÇÕES NA AMPLITUDE DO SINAL DE CONTROLE	52
3.4.3	RESTRIÇÕES NO SINAL DE SAIDA.....	54
3.4.4	RESUMO DAS RESTRIÇÕES.....	54
4	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO	56
4.1	INTRODUÇÃO	56
4.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	56
4.2.1	COMPONENTES DE UM SISTEMA TÍPICO.....	56

4.3	ASPECTOS OPERACIONAIS.....	59
4.3.1	CICLO DE BOMBEIO.....	59
4.3.2	PANCADA DE FLUIDO	60
4.3.3	CARTA DINAMOMÉTRICA.....	61
5	PROTÓTIPO DE UM SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO.....	64
5.1	REQUISITOS DE PROJETO DO PROTÓTIPO.....	65
5.1.1	REQUISITOS FUNCIONAIS DO PROTÓTIPO.....	65
5.1.2	REQUISITOS ESTRUTURAIS QUALITATIVOS	65
5.1.2.1	REQUISITOS DE INTERFACE (SISTEMA SUPERVISÓRIO, IHM).....	66
5.2	PRECESSO DE DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	66
5.3	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UM SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO.....	67
5.3.1	BASE DA UNIDADE DE BOMBEIO.....	68
5.3.2	UNIDADE DE BOMBEIO	68
5.3.2.1	TRIPÉ (APOIO).....	68
5.3.2.2	VIGA TRANSVERSAL OU BALANCIM.....	69
5.3.2.3	MANIVELA E BIELA.....	70
5.3.2.4	HASTE POLIDA	71
5.3.2.5	CABEÇA DE PRODUÇÃO.....	71
5.3.3	REVESTIMENTO E COLUNA DE PRODUÇÃO	72
5.3.4	RESERVATÓRIO.....	73
5.3.5	BOMBA DE FUNDO	74

5.4	INSTRUMENTAÇÃO DA PLANTA (SENSORES E ATUADORES).....	76
5.4.1	SENSORES.....	76
5.4.1.1	SENSOR DE PRESSÃO.....	77
5.4.1.2	SENSOR DE CARGA.....	80
5.4.1.3	SENSOR DE POSIÇÃO.....	82
5.4.1.4	SENSOR DE ROTAÇÃO.....	83
5.4.2	ATUADORES.....	85
5.5	SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO DO PBM.....	86
5.5.1	SISTEMA SUPERVISÓRIO DO PBM.....	87
6	APLICAÇÃO DE CONTROLE PREDITIVO NO PBM.....	91
6.1	INTRODUÇÃO.....	91
6.2	MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	91
6.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	92
6.2.2	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	92
6.2.3	DEFINIÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO.....	94
6.2.4	DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE AMOSTRAGEM.....	95
6.2.5	REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E COLETA DE DADOS.....	98
6.3	ESCOLHA DA ORDEM DO MODELO E ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	99
6.4	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	102
6.5	RESULTADOS SIMULADOS DO CONTROLADOR GPC.....	103
6.6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	107

6.6.1	RESULTADOS PARA DIFERENTES REGIÕES DE OPERAÇÃO	111
7	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	114
7.1	CONCLUSÕES	114
7.2	TRABALHOS FUTUROS	115
8	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial, buscando uma melhor produtividade e também uma melhor eficiência energética, vem buscando cada vez mais o uso de técnicas de controle avançado para alcançar resultados mais eficientes em seus processos. Desse modo, controladores como, *fuzzy*, adaptativo, preditivo, redes neurais, controle ótimo, entre outros, vem ganhando mais espaço na engenharia industrial em substituição a controladores convencionais a exemplo do Proporcional-Integral-Derivativo, conhecido como PID.

Dentre essas técnicas de controle avançado, destaca-se o Controlador Preditivo Baseado em Modelo, denominado MPC ou MBPC (do inglês *Model Based Predictive Control*), devido ao comprovado sucesso de sua implementação na indústria. A implementação do MPC é hoje adotada em indústrias de processos químicos e petroquímicos (RICHALET, 1978), (RICHALET, 1993), como também nos mais variados campos de atuação que vão da robótica, (VALE, 2011), à medicina (Mahfonf, Linkers, & Asbury, 1997). A grande aceitação desse método de controle está relacionada a uma série de vantagens que o MPC possui sobre outros controladores, entre as quais pode-se citar, de acordo com (CAMACHO & BORDONS, 2004), (ROSSITER, 2003) e (MACIEJOWSKI, 2001):

- Sistemas multivariáveis podem ser tratados com certa facilidade;
- Pode ser usado para controlar uma grande variedade de processos, de dinâmica simples aos mais complexos, incluindo sistemas com atraso ou instáveis em malha aberta;
- O tratamento das restrições pode ser diretamente incluído no projeto de controle;
- Incorpora o controle por antecipação, *Feedforward*, para compensar distúrbios;
- É muito aplicado em sistemas onde as referências futuras podem ser pré-estabelecidas, como é o caso de algumas aplicações em robótica (controle de trajetórias), e processos em batelada;
- Alguns autores, a exemplo de (CAMACHO & BORDONS, 2004), defendem a ideia de que é particularmente atrativo para usuários com conhecimentos

limitados em teoria de controle, uma vez que os conceitos são intuitivos, ao mesmo tempo que sua sintonia é de fácil ajuste;

Apesar das vantagens antes citadas, naturalmente, o MPC também possui algumas desvantagens. Se por um lado sua sintonia pode ser intuitiva, por outro lado, sua formulação é bem mais complexa se comparado ao controlador PID, assim como exige um maior esforço para provas de estabilidade e convergência. Outra desvantagem é que se o modelo que representa o processo não for adequado, o desempenho do MPC poderá ser comprometido.

1.1 CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

O termo MPC é normalmente utilizado para designar um conjunto de algoritmos que faz uso explícito do modelo do processo para determinar o sinal de controle por meio da minimização de uma determinada função custo.

Sua origem deu-se na indústria com o algoritmo Controle Preditivo Heurístico Baseado em Modelo do inglês *Model Predictive Heuristic Control* (MPHC), (RICHALET et al. 1978). Tal algoritmo também é conhecido como *Model Algorithmic Control*, MAC. Esse algoritmo utiliza a resposta ao impulso para modelar o processo. Outro algoritmo que surgiu na mesma época e também na indústria foi o Controle por Matriz dinâmica do inglês *Dynamic Matrix Control*, DMC (CUTLER & RAMAKER, 1980). Esse último é um dos algoritmos de controle preditivo mais populares na indústria, (QIN & BADGWELL, 2003), e utiliza a resposta ao degrau para representar o processo.

A partir desses algoritmos, DMC e MAC, vários outros tem sido sugeridos desde então. A exemplo do Controle Preditivo Funcional, PFC de (RICHALET, 1993). Este controlador não utiliza a resposta ao impulso ou ao degrau para representar o sistema, e sim na forma de espaço de estados criando uma maior possibilidade para sistemas e plantas instáveis em malha aberta, por exemplo. (FONTES, 2002),

Outro algoritmo proposto, agora utilizando função de transferência para representar o processo, foi o Controle Preditivo Generalizado, GPC (CLARKE et al, 1987). O GPC pode lidar com plantas instáveis em malha aberta, com tempo morto desconhecido, de fase não mínima e com ordem desconhecidas, (CLARKE et al, 1987), (FONTES, 2002), (CAMACHO & BORDONS, 2004). As principais diferenças

entre esses algoritmos estão nos modelos que representam o processo e na função custo a ser minimizada, (CAMACHO & BORDONS, 2004), (ROSSITER, 2003).

1.1.1 CONCEITO E ESTRATÉGIA DO MPC

A ideia fundamental do MPC é calcular a lei de controle baseada na previsão da resposta do processo a ser controlado. A ideia não é só levar em consideração o sinal de erro, baseando-se unicamente em dados passados, ou no máximo atuais, como é o caso do controle clássico, mas também levar em conta o comportamento dinâmico futuro (predito) para a saída do processo (CAMACHO & BORDONS, 2004).

O conceito do MPC está ilustrado na Figura 1.1-1, onde uma sequência de controle no futuro está sendo calculada com o objetivo de que a saída prevista siga o sinal de referência futuro. A saída do sistema é calculada dentro de um horizonte finito de previsão a cada período de amostragem, como também a sequência de controle. Uma vez feito o cálculo da sequência de controle, somente o primeiro sinal de controle é aplicado no sistema, descartando-se os demais. No instante de amostragem seguinte todo o processo é repetido. Essa metodologia é conhecida como princípio do horizonte móvel, ou horizonte deslizante do inglês *Receding Horizon*. Esse conceito no âmbito de controle foi proposto no fim dos anos 70 por (RICHALET, 1978).

O princípio do horizonte móvel dota o MPC com características de controle em malha fechada. De fato, a atualização contínua das previsões e das ações de controle, levando em consideração as medidas e referências mais recentes leva ao conceito de sistema de controle em malha fechada.

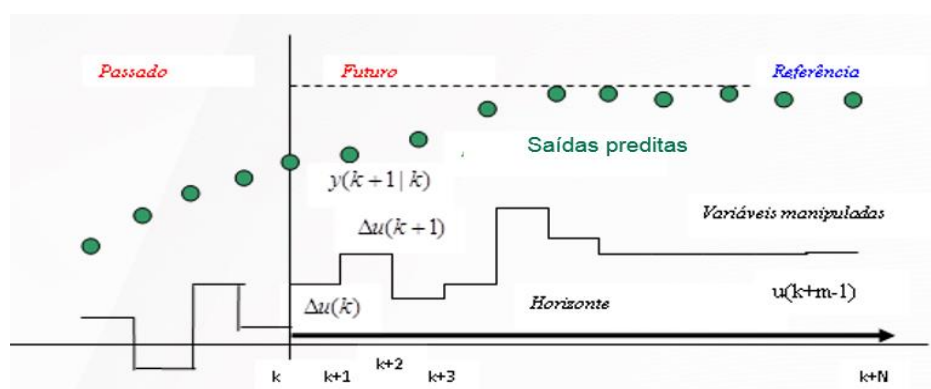


Figura 1.1-1. Conceito do MPC.

Dadas as trajetórias de referências, as ações de controle e a saída previstas são calculadas a partir de um modelo bem representativo do sistema a ser controlado.

Logo, a modelagem tem um papel fundamental no projeto do MPC. A lei de controle é obtida por meio da minimização de uma função custo que gera um conjunto de ações de controle ótimo com o objetivo de levar a saída do processo a convergir para o valor de referência.

A estrutura básica do MPC está ilustrada na Figura 1.1-2 sendo que seus principais componentes envolvidos nesta estrutura são:

- **Trajétoria de referências.** Conjunto de referências desejadas para os valores de saída do sistema. Esta trajetória pode ser constante ou usualmente ser também uma trajetória filtrada por um modelo de referência de primeira ou segunda ordem (FONTES, 2002);
- **Otimizador.** Responsável pela minimização de uma função custo de acordo com algum critério de desempenho pretendido para o sistema.
- **Preditor.** Fornece por meio do modelo do processo uma previsão do comportamento futuro da planta, com base em informações atuais e passadas da planta;
- **Modelo.** É o modelo matemático do processo. Esse modelo deve estar habilitado a representar de forma mais precisa possível o processo. Este pode ser linear ou não-linear e podendo, ainda, ser atualizado através de métodos de identificação recursiva conferindo ao controlador uma característica adaptativa.

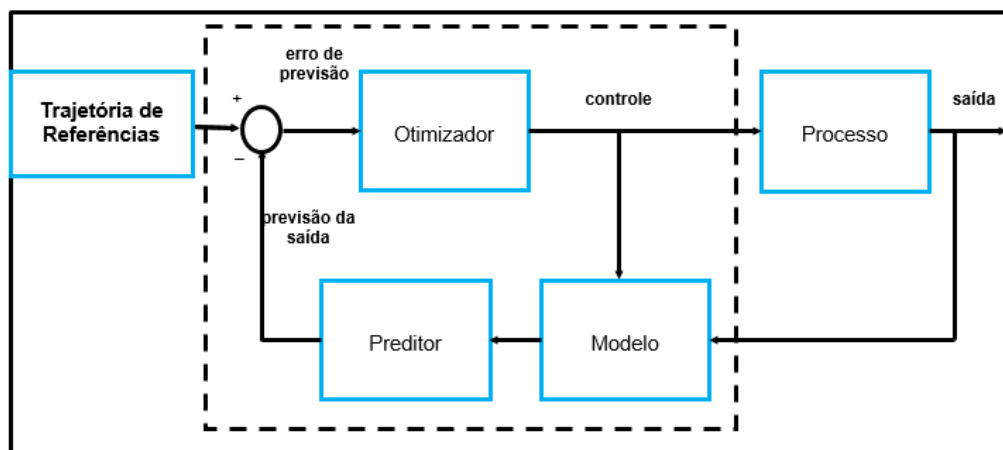


Figura 1.1-2. Diagrama esquemático do MPC.

1.1.2 RESTRIÇÕES EM CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

Como citado anteriormente, umas das principais vantagens do MPC é sua capacidade de lidar com restrições em seu projeto. Isso é particularmente interessante, visto que em problemas de controle, muitas vezes, o projeto do controlador é feito sem levar em consideração as restrições inerentes ao sistema à ser controlado. Entretanto, na prática, os processos sofrem restrições impostas pelos equipamentos, quer seja ele de leitura, transmissão ou atuação.

Outro motivo que impõe restrições em um projeto de controle, e talvez o mais importante, é o financeiro. Visto que na prática, os sistemas de controle operam na intersecção de determinadas restrições, exigindo maior produtividade com menos esforço de controle. Contudo, quando se trabalha muito próximo aos limites das restrições físicas do sistema, transgredir esses limites não é difícil de ocorrer (CAMACHO & BORDONS, 2004).

Normalmente, nos algoritmos de controle que não tratam as restrições implicitamente no projeto, as variáveis restringidas podem alcançar valores que estão fora de uma faixa admissível. Quando isso ocorre, o valor excedente dessas variáveis é simplesmente saturado, limitado. Isto pode ser mais facilmente visualizado no caso da variável manipulada. Se o sinal do controlador que é enviado para o atuador é maior do que o sinal máximo que este suporta, então o sinal é arbitrariamente igualado a esse valor máximo suportado. Entretanto, a simples eliminação do valor excedente pode conduzir a um desempenho insatisfatório do sistema em malha fechada, (ROSSITER, 2003). Desse modo, se faz necessário estudar e implementar em plantas físicas novas abordagens de controle que tratem das restrições no projeto do controlador.

1.2 MODELO DO PROCESSO

O primeiro estágio no projeto de controladores preditivos é a modelagem matemática do processo. Um modelo que represente de forma adequada o sistema a ser controlado é a chave do sucesso no projeto de tais controladores. Esses modelos podem ser derivados fenomenologicamente, ou seja, baseados na física do processo ou empiricamente através de técnicas de identificação de sistemas. Também é

comum a utilização de modelos híbridos, isto é, modelos fenomenológicos com parâmetros identificados.

No presente trabalho optou-se em empregar técnicas de identificação de sistemas para a modelagem do protótipo de bombeio mecânico. Um modelo fenomenológico poderia ser derivado para o protótipo de bombeio mecânico. No entanto, a opção pela identificação se mostrou mais adequada pelo desconhecimento do valor de muitos parâmetros, somado a presença de incertezas que estão relacionadas especialmente a montagem elétrica e/ou mecânica do protótipo. Pode-se citar, por exemplo, imprecisão de alguns componentes eletrônicos, atritos etc.

Os modelos matemáticos podem ser representados de diversas maneiras. A escolha do modelo vai depender das circunstâncias e objetivos a que se pretende com tais modelos. Entre os mais usados estão: equações diferenciais, função de transferência, espaço de estados, resposta ao degrau ou impulso. Neste trabalho o modelo utilizado para representar o processo identificado foi o modelo paramétrico entrada-saída, por se tratar de um sistema de única entrada e saída e também por ser o modelo usado no controle preditivo generalizado de (CLARKE *et al*, 1987).

1.3 SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO

Na indústria de petróleo existem diversos métodos de elevação artificial deste fluido. Sendo que o método de bombeio mecânico é um dos mais utilizados e certamente um dos mais antigos do mundo (TORRES,2012). Neste contexto, esse sistema, no que se refere ao desenvolvimento de seus componentes mecânicos, já se encontra bastante estabelecido. Todavia, de acordo com (ORDOÑEZ, 2008), quando atenta-se para estratégias de controle e de novas tecnologias de instrumentação, ainda há espaço para melhorias, principalmente, conforme (TORRES,2012), quando objetiva-se a:

- Aumento da produção de óleo;
- Redução das paradas para manutenção do equipamento;
- Diminuição do consumo de energia elétrica;

- Diminuição do consumo de combustível de motores que são alimentados por geradores (aplica-se ao caso de sistemas de BM cuja unidade não possui ligação à rede de energia elétrica).

1.4 PROPOSTA E JUSTIFICATIVA

Este trabalho se propõe ao desenvolvimento de um protótipo de bombeio mecânico na forma de uma bancada didática. Essa bancada visa se consolidar como plataforma para diversos cursos como instrumentação, controle e automação e também cursos de petróleo e gás. Após construído o protótipo, verificou-se a presença de não linearidades e incertezas no modelo dinâmico. As incertezas usualmente estão relacionadas à sua montagem elétrica e/ou mecânica, atritos não modelados, o que prejudica o controle e o bom desempenho desse sistema quando operado com um controlador convencional, como é o caso do PID. Desse modo, verificou-se a necessidade de propor a aplicação de técnicas de identificação de sistemas para levantar o modelo desse protótipo, propiciando a aplicações de técnicas avançadas de controle. A técnica de controle avançado é o Controle Preditivo Generalizado Com Restrições. As restrições abordadas no projeto serão o sinal de entrada, a taxa de variação desse sinal e o sinal da saída da planta.

Desde seu advento, para suprir as necessidades da indústria petroquímica, até os dias de hoje, as técnicas de controle preditivo vem contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e produtivo em muitos setores da indústria. Setores como a química, metalúrgica, aeroespacial, processamento de alimento automotiva etc. (QIN & BADGWEELL, 2003). Contudo, a implementação desses algoritmos em métodos de elevação artificial de petróleo constituem uma área relativamente nova, possuindo assim forte potencial para novas contribuições tecnológicas

1.5 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo geral desta dissertação pode ser dividido em três grupos:

- Apresentar o projeto e desenvolvimento de um protótipo funcional de um sistema de bombeio mecânico;
- Desenvolver um modelo dinâmico deste protótipo utilizando técnicas de identificação de sistemas;

- Aplicar e validar um controlador preditivo neste protótipo a partir do modelo identificado.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este capítulo introdutório apresentou o Controle Preditivo Baseado em Modelo, seus conceitos básicos, a forma como funciona e uma breve revisão histórica sobre o mesmo. Ainda neste capítulo é contextualizado a proposta de trabalho em cima do protótipo de um sistema de bombeio mecânico e a justificativa desta dissertação. Nos capítulos 2 e 3 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a identificação e controle do sistema. Especificamente o capítulo 2 versa sobre identificação de sistemas enquanto que o capítulo 3 sobre o controle preditivo generalizado. Já o capítulo 4 discorre sobre sistemas de bombeio mecânico típicos, seus componentes e princípios de funcionamento. Os capítulos 5 e 6 são de cunho prático. O primeiro destes trata do desenvolvimento do protótipo de bombeio mecânico, onde são apresentados detalhes desde a fase de projeto e alguns detalhes do processo de construção. O segundo mostra a aplicação e execução do processo de identificação e controle do protótipo. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais e as perspectivas para trabalhos futuros.

1.7 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A partir da presente pesquisa se produziram os seguintes artigos publicados:

- SILVA, D.A.N. & SCHNITMAN, L.. Controle Preditivo Generalizado Aplicado A Um Protótipo De Bombeio Mecânico. Congresso Rio Automação, maio de 2015.
- SOUZA, N., SILVA, D.A.N., SOUZA, V.O.S.T., Desenvolvimento De Uma Bancada Didática Para O Ensino Do Método De Elevação Artificial De Petróleo Por Bombeio Mecânico. XLIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, setembro de 2015.

2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

2.1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento do projeto de controladores preditivos, se faz necessário um modelo que represente adequadamente o sistema a ser controlado. Caso contrário, o controlador projetado poderá apresentar um mau desempenho, já que o controlador faz uso explícito do modelo do processo para prever as saídas do mesmo. (CAMACHO & BORDONS, 2004), (ROSSITER, 2003). Desse modo, o modelo tem um papel fundamental no sucesso da implementação do controlador preditivo.

No contexto da elevação artificial de petróleo pelo método de bombeio mecânico, modelos fenomenológicos tem sido desenvolvidos a exemplo do modelo proposto em (TORRES & SCHNINTMAN, 2010). Neste trabalho, as equações diferenciais que relacionam o nível do anular do poço do SBM com as demais variáveis do sistema foram derivadas a partir do princípio do balanço de massa. Tal princípio poderia facilmente ser utilizado para levantamento do modelo fenomenológico do Protótipo de Bombeio Mecânico utilizado neste trabalho. No entanto, devido às incertezas, dinâmicas não modeladas e a necessidade de se obter um modelo mais preciso, optou-se pela utilização de técnicas de identificação de sistemas.

Este capítulo tratará de maneira geral aspectos fundamentais da identificação de sistemas.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS

A construção e uso de modelos é muito comum em muitas áreas da ciência e da tecnologia. No contexto da engenharia de controle, que é o escopo do presente trabalho, um modelo matemático de um sistema pode ser definido com um conjunto de equações usadas para representar um sistema físico, ou, como definiu Aguirre (2007), um modelo matemático de um sistema real é um análogo matemático que representa algumas das características observadas em tal sistema. Tal modelo poder ser considerado adequado quando a dinâmica do sistema é representada de forma

satisfatória no domínio do tempo e da frequência e em todas as faixas de interesse. Porém, se o sistema a ser identificado apresentar não linearidades dentro da faixa de operação, um único modelo linear pode não ser suficiente para a sua representação. Nestes casos, um modelo não-linear ou um conjunto de modelos lineares podem ser necessários para melhor representar um sistema real. (AGUIRRE, 2007).

2.2.1 TIPOS DE MODELOS

Existe uma infinidade de tipos de modelos para as mais variadas áreas do conhecimento, como dito anteriormente. No âmbito da identificação de sistemas, os modelos matemáticos comumente usados são classificados como:

- Modelos estáticos e dinâmicos. Um modelo é considerado dinâmico quando a saída do mesmo não depende apenas do valor atual da entrada, mas também de valores passados da entrada ou da própria saída. Logo, os sistemas dinâmicos tem uma relação direta com o tempo e são compostos por equações diferenciais, ao passo que os estáticos não possuem um relação temporal e normalmente são representados por equações algébricas;
- Modelos discretos e contínuos. Modelos dinâmicos contínuos são descritos por equações diferenciais e representam a evolução do sistema continuamente no tempo. Quanto aos modelos dinâmicos discretos, sua evolução se dá em instantes discretos ou em períodos de amostragem e são representados por equações a diferenças;
- Modelos monovariáveis e multivariáveis. Os termos mono e multivariáveis estão associados ao número de entradas e saídas do sistema. Os modelos monovariáveis são constituídos apenas de entrada e saída únicas. Na literatura são denominados como modelos SISO (*Single Input, Single Output*). Quando o modelo é representado por mais de uma saída e/ou entrada, ele é denominado multivariável. Na literatura são referidos como modelos SIMO (*Single Input, Multiple Output*), MISO (*Multiple Input, Single Output*), e MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*);
- Modelos lineares e não lineares. Um modelo é dito linear se o princípio da superposição se aplica a ele (OGATA, 2011). Caso contrário o modelo é dito

ser não linear. De forma prática, considere um dado sistema que, quando excitado por uma entrada $u_1(t)$ produz a saída $y_1(t)$ e quando excitado por $u_2(t)$ produz a saída $y_2(t)$. Se o sistema dado satisfizer o princípio da superposição então, quando excitado por $au_1(t) + bu_2(t)$, sua saída será $ay_1(t) + by_2(t)$, sendo a e b constantes reais;

- Modelos determinísticos e estocásticos. Modelos determinísticos são aqueles em que se trabalha com a relação exata das variáveis e sem expressar incertezas (LJUNG & GLAD, 1994). Por outro lado, o modelo é estocástico se ele trabalha com os conceitos de incertezas, sendo que sua saída é uma variável com componentes aleatórios;
- Modelos paramétricos e não paramétricos. No contexto da identificação de sistemas, modelos paramétricos são aqueles que possuem parâmetros, ou seja, números, coeficientes que os caracterizem, ao passo que, os modelos não paramétricos são convoluções da entrada e sua variação e usualmente representados graficamente. (AGUIRRE, 2007).

2.3 REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS

Depois de escolhida a estrutura para o modelo do sistema, o próximo passo é escolher a maneira de como representá-lo matematicamente. Há diversas maneiras de representar o mesmo modelo matemático, ou seja, várias formas em que as equações do sistema podem ser descritas. Na modelagem de sistemas dinâmicos lineares, tanto no caso contínuo como discreto, as principais representações são a resposta ao degrau, função de transferência, a resposta em frequência e a representação no espaço de estados. Entretanto, neste trabalho o foco será a representação geral discreta e suas derivações que são particularmente adequadas à identificação de sistemas.

2.3.1 REPRESENTAÇÃO GERAL DISCRETA

Um sistema linear discreto pode ser representado sob a seguinte forma generalizada:

$$y(k) = \frac{q^{-d}B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)A(q)}e(k) \quad (2-1)$$

> *Parte determinística* < > *Modelo do ruído* <

Onde:

- $y(k)$ É a saída do processo no instante atual (k).
- $u(k)$ É a entrada do processo no instante (k).
- q Representa o operador de deslocamento, tal que se for q^{-1} também conhecido como operador de atraso unitário, significa que $y(k)q^{-1} = y(k-1)$, mais propriedades sobre o operador de atraso unitário podem ser encontrados em (ENDERS, 1995).
- d é o retardo ou tempo morto do sistema, em múltiplos períodos de amostragem, ($d \geq 0$).
- $e(k)$ é o ruído medido no instante atual (k), como amostra de um ruído branco.

Os polinômios, $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ e $D(q)$ são definidos como:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + a_{n_b}q^{-n_b} \\ C(q) &= 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \\ D(q) &= 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_{n_d}q^{-n_d} \end{aligned} \quad (2-2)$$

Em que n_a , n_b , n_c e n_d são os graus dos polinômios $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ e $D(q)$ respectivamente.

Em termo de diagrama de blocos o modelo é representado na Figura 2.3-1:

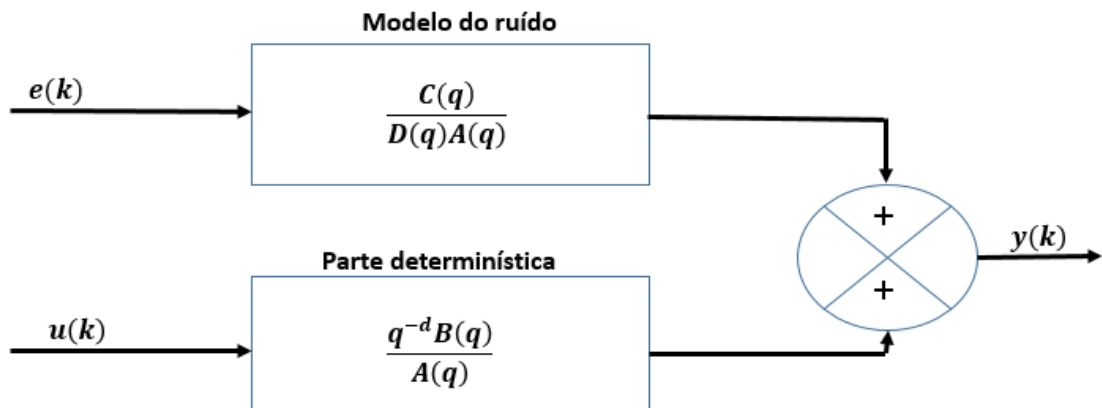


Figura 2.3-1 Diagrama de blocos do modelo discreto geral

2.3.2 MODELO ARX

O modelo autorregressivo com entrada exógenas, do inglês (*Auto-Regressive with eXógenous Inputs*) é derivado do modelo discreto geral. Neste caso o modelo ARX é obtido fazendo $n_a = n$; $n_b \leq n$; $n_c = n_d = 0$. O modelo resultante é:

$$y(k) = \frac{q^{-d}B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{1}{A(q)}e(k) \quad (2-3)$$

Ou ainda,

$$A(q)y(k) = q^{-d}B(q)u(k) + e(k) \quad (2-4)$$

2.3.3 MODELO ARIX

No modelo autorregressivo integral com entrada exógena, (do inglês *Auto-Regressive Integrated with eXógenous Inputs*), o modelo ARIX difere do modelo ARX, devido a introdução de uma ação integral para eliminar o erro de regime permanente em processos integradores. Neste caso, fazendo $n_a = n$; $n_b \leq n$; $n_c = 0$; $n_d = 1$ e considerando $d_1 = -1$ do polinômio $D(q)$, neste caso, corresponde à introdução da ação integral que é normalmente representado por Δ , ou seja, $D(q) = 1 - q^{-1}$. O modelo resultante torna-se:

$$y(k) = \frac{q^{-d}B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{1}{\Delta A(q)}e(k) \quad (2-5)$$

Ou ainda,

$$A(q)\Delta y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + e(k) \quad (2-6)$$

2.3.4 MODELO ARMAX

O modelo autorregressivo com média móvel e entradas exógenas, do inglês *Auto-Regressive Moving Average With eXogenous Inputs*, Pode ser obtido do modelo discreto geral. Neste caso tem-se que $n_a = n; n_b \leq n; n_c > 0$ e $n_d = 0$, resultando no seguinte modelo:

$$y(k) = \frac{q^{-d}B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{A(q)}e(k) \quad (2-7)$$

Ou ainda,

$$A(q)y(k) = q^{-d}B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (2-8)$$

2.3.5 MODELO ARIMAX

O modelo autorregressivo, integral, média móvel e com entradas exógenas, do inglês *Auto-Regressive Integrated Moving Average With eXogenous Inputs*, neste caso tem-se que: $n_a = n; n_b \leq n; n_c > 0, n_d = 1$ e $d_1 = -1$ então, como já dito anteriormente, $D(q) = 1 - q^{-1}$. O modelo resultante é:

$$y(k) = \frac{q^{-d}B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{\Delta A(q)}e(k) \quad (2-9)$$

Ou ainda,

$$A(q)\Delta y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + C(q)e(k) \quad (2-10)$$

2.4 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Para se obter um modelo matemático de um determinado processo há basicamente três formas, ver Figura 2.4-1, que são:

- Modelagem caixa branca ou fenomenológica. Essa modelagem é baseada no conhecimento das relações dos princípios que regem o processo, os quais serão empregados com o objetivo de se chegar a um modelo que irá estabelecer as relações de quantidades físicas do processo (VAN DEN HOF & BOMBOIS, 2004).
- Identificação de sistemas. É a modelagem empírica, também conhecida como modelagem caixa preta. Consiste na determinação de um modelo matemático que represente os aspectos essenciais do sistema a partir de dados de entrada e saída observados. (AGUIRRE, 2007).
- Modelagem caixa cinza. Essa técnica se encontra entre a modelagem pela física do processo e a modelagem caixa preta. Ela se caracteriza por usar informações adicionais e que não estão presente nos dados de entrada e saída do processo.

Na modelagem caixa branca é exigido um conhecimento profundo do sistema a ser modelado além de uma relação de familiaridade com o mesmo. Esse tipo de modelagem demanda do projetista o conhecimento das relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos. Entretanto, devido ao tempo necessário para modelar um sistema partindo do equacionamento de fenômenos envolvidos e do conhecimento aprofundado do sistema, modelar a partir da física do processo nem sempre é viável (AGUIRRE, 2007). Então, uma alternativa a modelagem caixa branca é a utilização de métodos de identificação de sistemas, modelagem caixa preta, pois nesse tipo de modelagem exige-se pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema. Entretanto, de acordo com (TORRES, 2012), a inexistência de qualquer informação acerca do sistema a se controlar é uma situação rara, e portanto, quase nunca observada na prática. Logo a modelagem caixa preta, em circunstâncias que há informações adicionais do processo, também pode ser chamada caixa cinza.

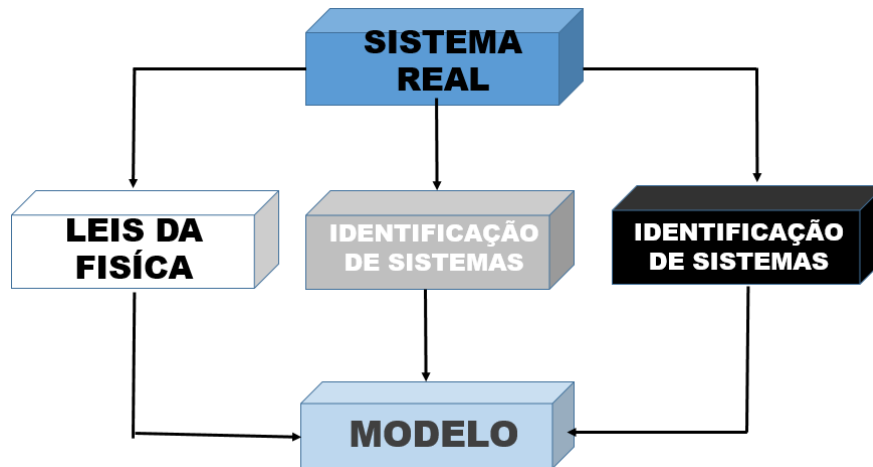


Figura 2.4-1 Modelagem caixa branca, caixa preta e caixa cinza.

2.4.1 ETAPAS NA IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Antes de se iniciar os procedimentos de modelagem de um determinado sistema, seja por técnicas caixa branca ou caixa preta, o projetista tem que ter em mente dois paradigmas fundamentais. O primeiro é que o modelo desenvolvido será sempre uma representação aproximada. Portanto, não existe o modelo ideal do sistema, e sim, uma família de modelos com características e desempenho variados de um mesmo sistema. O segundo é que, o modelo encontrado é uma aproximação de apenas algumas características do sistema real (AGUIRRE, 2007).

As etapas fundamentais em qualquer procedimento de identificação é mostrado na Figura 2.4-2 adaptada de Ljung (1987).

De acordo com (LJUNG, 1987), (AGUIRRE, 2007) (VAN DEN HOF & BOMBOIS, 2004) os elementos básicos de um experimento de identificação são:

- Testes dinâmicos e coleta de dados. A etapa da coleta de dados pode acontecer de duas maneiras. A primeira é quando os dados disponíveis serão dados de operação normal do sistema. A segunda ocorre quando o experimento para coleta de dados é feita sob medida, ou seja, o sistema é excitado com sinais específicos para se obter informações específicas da planta;
- Escolha de um conjunto de modelo. Deve ser especificado qual o modelo, dentro de um conjunto de modelos candidatos, irá representar de forma mais precisa as informações de interesse do sistema;

- Estimacão de parâmetros. Uma vez escolhido o modelo, esta nova fase representa a determinao dos coeficientes numéricos da representao matemática escolhida. Mais detalhes sobre estimacão de parâmetros serão tratados no próximo típico;
- Validao do modelo. Tendo definido o conjunto de modelos,  necessário verificar qual modelo dentro desse conjunto representa melhor o sistema de acordo com os objetivos de interesse.

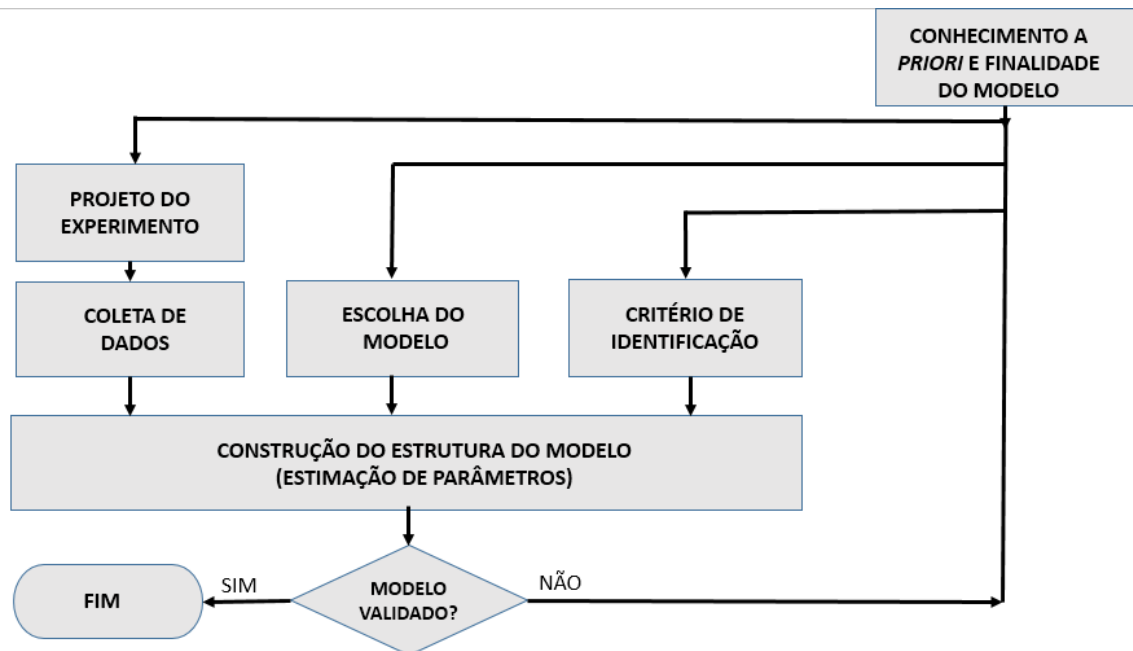


Figura 2.4-2 Etapas do procedimento de identificao.

2.4.2 ESTIMAO DE PARÂMETROS

Depois de definida a estrutura e o modelo paramétrico a ser usado para representar um determinado sistema, o próximo passo  estimar seus parâmetros. Há diversas formas na identificao de parâmetros de modelos lineares discretos. No presente trabalho a ferramenta utilizada para estimacão dos parâmetros foi o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MQR), com o objetivo na estimacão de parâmetros autorregressivos e dos regressores exógenos. Na sequência são apresentados os fundamentos do Método dos Mínimos Quadrados, (MQ), para que se possa ter um melhor embasamento para o entendimento do MQR.

2.4.2.1 O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

No presente contexto o MQ será usado para a estimação dos parâmetros de um modelo ARX. Dado um sistema SISO representado pelo modelo ARX, Eq. (2.4), e considerando $na = n, nb \leq n$ e $nd = 0$ tem-se:

$$A(q)y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + e(k) \quad (2-11)$$

Que também pode ser representada sob a forma compacta:

$$y(k) = \theta(k)\varphi^T(k) + e(k) \quad (2-12)$$

Onde:

$$\theta^T = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{na} \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{nb}] \quad (2-13)$$

é o vetor de parâmetros do modelo e

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-na), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-nb)] \quad (2-14)$$

é o vetor de dados, também chamado vetor de regressão. E $e(k)$ pode representar erro de modelagem, ruído, erro de medição, etc.

Admitindo um conjunto de N medidas realizadas e suficientes para determinar o vetor de parâmetros, a Eq.(2-12) pode ser escrita de forma matricial

$$Y = \Phi\theta + E \quad (2-15)$$

Onde,

$$Y^T = [y(n+1), y(n+2), \dots, y(N)] \quad (2-16)$$

$$E^T = [e(n+1), e(n+2), \dots, e(N)] \quad (2-17)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \vdots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

N é o número de amostras de dados de entradas e saídas medidas. A partir da Eq. (2-15), o erro pode ser definido como:

$$E = Y - \Phi\theta \quad (2-19)$$

A fim de encontrar um índice que quantifique a qualidade dos parâmetros estimados, $\Phi\theta$ em relação ao vetor de dados Y, a seguinte função custo é definida:

$$J = \sum_{i=1}^N E(i)^2 = E^T E = \|E\|^2 \quad (2-20)$$

Substituindo a Eq. (2-19), na função J escrita na Eq.(2-20), pode-se reescrevê-la como sendo:

$$J = (Y - \Phi\theta)^T (Y - \Phi\theta) \quad (2-21)$$

ou ainda,

$$J = Y^T Y - Y^T \Phi\theta - \theta^T \Phi^T Y + \theta^T \Phi^T \Phi\theta \quad (2-22)$$

Então a minimização da função custo J em relação ao vetor de parâmetros estimados θ , pode ser expressa diferenciando a Eq. (2-22) e igualando a zero. Tem-se que:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = 0 \quad (2-23)$$

Resolvendo a Eq. (2-23), encontra-se:

$$\hat{\theta} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T Y \quad (2-24)$$

A matriz $[\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$ é conhecida como matriz pseudo-inversa. Entretanto, a Eq. (2-24), que é o estimador dos mínimos quadrados, exige que toda a massa de dados esteja disponível para a estimação dos parâmetros necessários de uma só vez. Então todos os dados de entrada e saída de um determinado sistema são previamente coletados para utiliza-los a posteriori para se obter o modelo desejado.

2.4.2.2 ESTIMAÇÃO RECURSIVA USANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Na seção anterior foi apresentado o MQ, que é um algoritmo bastante usado em diversas áreas da ciência e tecnologia, porém um dos requisitos para sua utilização é que toda massa de dados de entrada e saída esteja disponível para a estimação dos parâmetros necessários, como já dito anteriormente. Então esse algoritmo não é conveniente para ser usado em propostas de controladores adaptativos ou auto regulados. (BOBÁL, *et. al*, 2005). Desse modo se faz necessária a versão recursiva do MQ, o MQR. Essa versão pode executar a identificação de parâmetros em tempo real, ou seja, a cada atualização dos dados amostrados. Isto diminui a complexidade dos cálculos, pois os valores das medições atuais são usados somente para correção da estimativa feita no instante imediatamente anterior ao atual.

Então, com base no desenvolvimento matemático apresentado em (COELHO & COELHO, 2004), para deduzir MQR partindo do MQ observa-se que a Eq.(2-24) para um determinado instante k pode ser escrita na forma de

$$\hat{\theta}(k) = [\Phi^T(k) \Phi(k)]^{-1} \Phi^T(k) Y(k) \quad (2-25)$$

E que a mesma equação no instante $(k+1)$ pode ser escrita como:

$$\hat{\theta}(k+1) = [\Phi^T(k+1) \Phi(k+1)]^{-1} \Phi^T(k+1) Y(k+1) \quad (2-26)$$

Onde:

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \vdots \\ \varphi^T(k) \end{bmatrix} \rightarrow \Phi(k+1) \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \vdots \\ \varphi^T(k) \\ \varphi^T(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(k) \\ \varphi^T(k+1) \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

E:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} \rightarrow Y(k+1) = \begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

O que pode ser escrita como:

$$\Phi^T(k+1)\Phi(k+1) = \Phi^T(k)\Phi(k) + \varphi(k+1)\varphi^T(k+1) \quad (2-29)$$

E:

$$\Phi^T(k+1)Y(k+1) = \Phi^T(k)Y(k) + \varphi(k+1)y(k+1) \quad (2-30)$$

Definindo-se

$$P = [\Phi^T(k+1)\Phi(k+1)]^{-1} \quad (2-31)$$

e

$$R = \Phi^T(k+1)Y(k+1) \quad (2-32)$$

Logo a Eq.(2-26) pode ser escrita como:

$$\hat{\theta} = P(k+1)R(k+1) \quad (2-33)$$

Substituindo a Eq. (2-31) e a Eq. (2-32) na Eq. (2-29) e Eq. (2-30) respectivamente, tem-se que:

$$P^{-1}(k+1) = P^{-1}(k) + \varphi(k+1)\varphi^T(k+1) \quad (2-34)$$

$$R(k+1) = R(k) + \varphi(k+1)y(k+1) \quad (2-35)$$

A fim de se evitar um calculo da matriz inversa P da Eq.(2-31) a cada iteração, pode-se utilizar o lema da matriz inversa dada pela equivalência matemática representada na Eq (2-36), onde a prova pode ser encontrada em (AGUIRRE, 2007). Então, tem-se que:

$$(A + BCD)^{-1} \equiv A^{-1} - A^{-1}B(DA^{-1}B + C^{-1})^{-1}DA^{-1} \quad (2-36)$$

Sendo que A, C e $(DA^{-1}B + C^{-1})$ são matrizes quadradas não singulares. Definindo:

$A = P^{-1}(k) \in R^{p \times p}, B = \varphi(k+1) \in R^{p \times 1}, D = \varphi(k+1) \in R^{1 \times p}$ e $C = I$, onde I é a matriz identidade. Obtem-se, a partir da Eq. (2-34), a seguinte equação:

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k)\varphi(k+1)\varphi^T(k+1)P(k)}{1 + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)} \quad (2-37)$$

onde $1 + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)$ é um escalar. A Eq. (2-37) é conhecida como matriz de covariância do erro de estimação.

Lembrando que a equação do erro de estimação é dada pela Eq. (2-19) então, a equação que representa a previsão do erro pode ser definida como:

$$E(k+1) = y(k+1) - \varphi(k+1)\hat{\theta} \quad (2-38)$$

Substituindo a Eq.(2-38) na Eq.(2-35) tem-se que:

$$R(k+1) = R(k) + \varphi(k+1)E(k+1) + \varphi(k+1)\varphi^T(k+1)\hat{\theta}(k) \quad (2-39)$$

Substituindo a Eq.(2-29) e a Eq. (2-33) na Eq.(2-39), resulta em:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + P(k+1)\varphi(k+1)E(k+1) \quad (2-40)$$

O termo $P(k+1)\varphi(k+1)$ da Eq.(2-40) é um vetor coluna denominado ganho K do estimador, ou seja;

$$K(k+1) = P(k+1)\varphi(k+1) = \frac{P(k)\varphi(k+1)}{1+\varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)} \quad (2-41)$$

Então o vetor de parâmetros estimados é calculado por:

$$\hat{\Theta}(k+1) = \hat{\Theta}(k) + K(k+1)E(k+1) \quad (2-42)$$

Em suma, o MQR possui os seguintes passos:

- I. Inicializa a matriz de covariância;
- II. Atualizar o vetor de medidas

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-na), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-nb)];$$

- III. Calcular o erro de previsão

$$E(k+1) = y(k+1) - \varphi(k+1)\hat{\Theta};$$

- IV. Calcular o ganho do estimador

$$K(k+1) = \frac{P(k)\varphi(k+1)}{1+\varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)};$$

- V. Calcular o vetor de parâmetros estimados

$$\hat{\Theta}(k+1) = \hat{\Theta}(k) + K(k+1)E(k+1);$$

- VI. Calcular a matriz de covariância

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k)\varphi(k+1)\varphi^T(k+1)P(k)}{1+\varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)};$$

VII. Retorna ao passo II.

Para a inicialização do algoritmo MQR deve-se atribuir valores para o vetor de parâmetros $\hat{\theta}(0)$ e a matriz de covariância $P(k)$. Normalmente quando não há nenhum conhecimento do sistema a ser identificado, se inicializa o vetor de parâmetros com zeros e a matriz de covariância, que é uma matriz identidade, multiplicada por um valor elevado, geralmente um número maior ou igual 10^3 (AGUIRRE, 2007). Entretanto, quando se há algum conhecimento do sistema, pode-se atribuir valores diferentes de zero, caso se tenha conhecimento aproximado dos mesmos. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando for possível fazer uma identificação prévia em batelada do sistema. Enquanto que matriz de covariância $P(k)$ deve ser multiplicada por um número pequeno, neste caso, menor ou igual a 10.

A magnitude dos elementos da diagonal da matriz de covariância $P(k)$ está relacionada com a qualidade da identificação. Caso essa magnitude seja baixa significa uma identificação adequada, ou seja, variância baixa. Por outro lado, se a magnitude dos elementos da diagonal é alta, significa uma identificação inadequada, isto é, variância alta. Mais detalhes sobre o MQ e MQR pode ser encontrada em (LJUNG L. , 1987), (AGUIRRE, 2007) e (COELHO & COELHO, 2004).

2.5 CONCLUSÃO

Neste Capítulo foi apresentada de maneira breve a teoria a respeito de modelagem e identificação de sistemas lineares. Foram apresentados alguns tipos de modelos que são uteis no processo de identificação, como também sua representação matemática no tempo discreto. Tratou-se sobre estimação de parâmetros e dois métodos de estimação o MQ e o MQR, muito utilizados na área de identificação de sistemas.

3 CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO – CASO SISO

3.1 INTRODUÇÃO

O GPC foi proposto por Clark et al (1987), desde então tem se tornado um dos métodos mais populares no âmbito do controle preditivo, sendo utilizado com êxito em numerosas aplicações, tanto na área acadêmica quanto na área industrial (CAMACHO & BORDONS, 2004). Podendo tratar plantas instáveis, de fase não mínima e com atraso de transporte. Possui vasta aplicação na indústria química, petroquímica e em outros segmentos. O GPC consiste no cálculo de uma sequência de ações futuras de controle de forma a minimizar a seguinte função custo:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_y} \delta(j) [\hat{y}(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (3-1)$$

Onde:

- $\hat{y}(k+j|k)$ é a predição ótima j passos à frente da saída do processo, utilizando as saídas e entradas conhecidas até o instante k ;
- $\Delta u(k)$ é a variação na ação de controle no instante k atual;
- $w(k)$ é a referência;
- N_y e N_u são o horizonte de predição e controle respectivamente.
- N_1 é o horizonte mínimo de predição, sendo normalmente igual ao tempo morto do sistema;
- δ e λ são sequências de ponderação sobre o sinal de erro e de controle; respectivamente.

. Assim, quando a função objetivo que é minimizada em um determinado instante de tempo uma sequência de controle ideal é encontrada de forma a diminuir a diferença entre a saída (y) e a referência (w). Desde que o modelo apresentado seja uma representação correta ou satisfatória do processo.

3.2 PREDITORES

O primeiro estágio no projeto de controladores preditivos é a determinação do modelo de predição. No caso do GPC proposto por Clark et al (1987), este utiliza em seu algoritmo um modelo paramétrico para representar o sistema a ser controlado. Tal modelo, como já discutido anteriormente, é do tipo ARIMAX. E é dado por:

$$A(q)\Delta y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + C(q)e(k) \quad (3-2)$$

Como definido anteriormente $\Delta = 1 - q^{-1}$ e fazendo $\tilde{A} = A(q)\Delta$, então a Eq (3-2) ainda pode ser convenientemente escrita como:

$$\tilde{A}(q)y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + C(q)e(k) \quad (3-3)$$

A razão para a escolha deste modelo, além de ser um modelo simples e de fácil implementação discreta em computador, é a eliminação do erro em estado estacionário em processos integradores. (ROSSITER, 2003), (CAMACHO & BORDONS, 2004). O modelo descrito na Eq. (3-3) é linear e causal. A partir desse modelo pode-se obter informações do sistema por ele representado com relação a estabilidade e alocação de polos, por exemplo. Entretanto, o processo de modelagem para o MPC ainda não está completamente concluído. É necessário projetar um modelo de predição n-passos à frente para ser incluído na função custo a ser otimizada.

O modelo de predição n-passos à frente para o modelo ARIMAX pode ser derivado de várias maneiras, (CAMACHO & BORDONS, 2004). A maneira mais utilizada em artigos acadêmicos é pela Equação de Diofantine, (CLARKE, MOHTADI, & TUFFS, 1987), (CAMACHO & BORDONS, 2004). No entanto, conforme (ROSSITER, 2003), esse método é um tanto confuso para o entendimento imediato e a razão para seu uso não é historicamente clara. Nos tópicos seguintes serão abordados tanto o método Diofantino quanto o método matricial desenvolvido por (ROSSITER, 2003) com o intuito de avaliar as vantagens desse último.

3.2.1 MODELO DE PREDIÇÃO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE DIOFANTINE

O valor predito pode ser analisado como sendo a superposição de duas respostas, a resposta livre e a resposta forçada. A primeira consiste na resposta

natural do sistema, enquanto que a segunda é obtida por meio das ações de controle. (SOUZA, 2006). Então, com o intuito de separar a resposta livre da resposta forçada, tradicionalmente utiliza-se uma identidade polinomial conhecida como Equação de Diofantine, dada pela Eq. (3-4).

$$\frac{1}{\tilde{A}(q)} = E_j(q) + q^{-j} \frac{F_j(q)}{\tilde{A}(q)} \quad (3-4)$$

Onde:

$E_j(q)$, $F_j(q)$ e $\tilde{A}(q)$ são dados por:

$$E_j(q) = e_{j,0} + e_{j,1}q^{-1} + \dots + e_{j,j-1}q^{-(j-1)}$$

$$F_j(q) = f_{j,0} + f_{j,1}q^{-1} + \dots + f_{j,na}q^{-(na-1)}$$

$$\Delta = 1 - q^{-1}$$

$$\tilde{A}(q) = \Delta A(q)$$

O polinômio $E_j(q)$ e $F_j(q)$ são determinados de forma única pelo grau de $j-1$ associado a $\tilde{A}(q)$. $E_j(q)$ e $F_j(q)$ podem ser determinados a partir da divisão polinomial de 1 por $\tilde{A}(q)$, enquanto que $E_j(q)$ coeficiente da divisão polinomial e $F_j(q)$ é o resto desta divisão.

Tomando como base (CAMACHO & BORDONS, 2004) para o desenvolvimento do modelo de predição e considerando o modelo do ruído, $C(q^{-1})$ da Eq. (3-3), igual a 1, tem-se que:

$$\tilde{A}(q)y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + e(k) \quad (3-5)$$

A partir do produto entre a Eq.(3-5) e o polinômio $E_j(q^{-1})$ da Eq. (3-4) obtêm-se:

$$\tilde{A}(q)E_j(q)y(k+j) = E_j(q)B(q)\Delta u(k+j-d-1) + E_j(q)e(k+j) \quad (3-6)$$

Resolvendo a Eq.(3-6) para $E_j(q)$ e substituindo o resultado na equação de Diofantine representada na Eq.(3-4), resulta em:

$$y(k+j) = F_j(q)y(k) + E_j(q)B(q)\Delta u(k+j-d-1) + E_j(q)e(k+j) \quad (3-7)$$

Como o grau do polinômio $E_j(q) = j - 1$ os termos do ruído da Eq.(3-7) estão no futuro, então, a melhor predição é dada por:

$$\hat{y}(k+j) = G_j(q)\Delta u(k+j-d-1) + F_j(q)y(k) \quad (3-8)$$

Sendo que $G_j(q) = E^j(q)B_j(q)$.

Ainda de acordo com (CAMACHO & BORDONS, 2004) o conjunto de predições ótimas j passos à frente, levando em consideração um retardo de d períodos de amostragem, onde a saída só será influenciada pela entrada depois de $(d+1)$ períodos de amostragem, pode ser expresso por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{y}(k+d+1|k) = G_{d+1}\Delta u(k) + F_{d+1}y(k) \\ \hat{y}(k+d+2|k) = G_{d+1}\Delta u(k+1) + F_{d+1}y(k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+d+N|k) = G_{d+1}\Delta u(k+N-1) + F_{d+1}y(k) \end{array} \right\} \quad (3-9)$$

Ou de forma compacta:

$$y = G\Delta u + F(q)y(k) + G'(q)\Delta u(k-1) \quad (3-10)$$

Onde

$$\begin{aligned} \bullet \quad y &= \begin{bmatrix} \hat{y}(k+d+1|k) \\ \hat{y}(k+d+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+d+N|k) \end{bmatrix}; \quad \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N) \end{bmatrix} \\ \bullet \quad G &= \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix}; \quad F(q) = \begin{bmatrix} F_{d+1}(q^{-1}) \\ F_{d+2}(q^{-1}) \\ \vdots \\ F_{d+N}(q^{-1}) \end{bmatrix} \\ \bullet \quad G'(q) &= \begin{bmatrix} (G_{d+1}(q) - g_0)q \\ (G_{d+2}(q) - g_0 - g_1z^{-1})q^2 \\ \vdots \\ (G_{d+N}(q) - g_0 - g_1q^{-1} - \dots - g_{N-1}q^{-(N-1)})q^N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-11)$$

Da Eq.(3-10) é possível observar que a resposta livre depende apenas dos dois últimos termos dessa equação, enquanto que o primeiro representa a resposta forçada. Desse modo, fazendo $F = F(q)y(k) + G'(q)\Delta u(k-1)$, a Eq.(3-8) pode ser reescrita como:

$$Y = G\Delta u + F \quad (3-12)$$

3.2.2 MODELO DE PREDIÇÃO PELO MÉTODO MATRICIAL

Nesta seção será mostrado o método matricial para encontrar o modelo de predição n-passos à frente. Partindo do modelo ARIMAX, Eq. (3-3), o qual foi descrito como sendo;

$$\tilde{A}(q)y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + C(q)e(k) \quad (3-13)$$

Lembrando que, $\tilde{A}(q) = \Delta A(q)$. O polinômio $\tilde{A}(q)$ e $B(q)$ são definidos, assumindo que o sistema é estritamente próprio, por:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(q) &= 1 + \tilde{a}_1q^{-1} + \tilde{a}_2q^{-2} + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}}q^{-n\tilde{a}-1} \\ B(q) &= b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \end{aligned} \quad (3-14)$$

Então a predição um passo à frente pode ser escrita como:

$$y(k+1) = [\tilde{a}_1y(k) + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}+1}y(k-n\tilde{a})] + b_1\Delta u(k) + b_{nb-1}\Delta u(k-n_b+1) \quad (3-15)$$

Com o objetivo de explicitar a resposta livre e a resposta forçada a Eq. (3-15) pode ser escrita na forma:

$$y(k+1) = -[\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2q^{-2} + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}+1}q^{-n\tilde{a}}]y(k) + [b_2q^{-1} + b_3q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{nb+1}]\Delta(k-1) + b_1\Delta(k) \quad (3-16)$$

Onde os dois primeiros termos da Eq.(3-16) representam a resposta livre do sistema e o terceiro a resposta forçada ou grau de liberdade como também é denominado por alguns autores.

Observando a Eq. (3-16), é possível notar que predições n-passos à frente podem ser calculadas recursivamente baseado na predição um passo à frente. Isto é, com $y(k+1)$ é possível determinar $y(k+2)$ e com este é possível calcular $y(k+3)$ e assim sucessivamente. O cálculo recursivo das predições é intuitivo e computacionalmente muito eficiente. Entretanto, a manipulação algébrica se torna confusa e inadequada, (ROSSITER, 2003). Desse modo, o método matricial é uma alternativa para o cálculo do preditor em relação ao método Diofantino. Isto porque o método matricial é computacionalmente tão eficiente quanto o método recursivo e é algebricamente compacto quanto o método Diofantino, porem, de mais fácil entendimento. Então, partindo da Eq. (3-15), o conceito de predição um passo à frente, inerente aos modelos discretos, pode ser usado recursivamente para encontrar predições n-passos à frente, como mostrado a seguir:

$$\begin{aligned}
 y(k+1) + \tilde{a}_1 y(k) + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}+1} y(k - n\tilde{a}) &= b_1 \Delta u(k) + \dots + b_{n_b} \Delta u(k - n_b + 1) \\
 y(k+2) + \tilde{a}_1 y(k+1) + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}+1} y(k - n\tilde{a} + 1) &= b_1 \Delta u(k+1) + \dots + b_{n_b} \Delta u(k - n_b + 2) \\
 y(k+3) + \tilde{a}_1 y(k+2) + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}+1} y(k - n\tilde{a} + 2) &= b_1 \Delta u(k+2) + \dots + b_{n_b} \Delta u(k - n_b + 2) \\
 &\vdots \\
 y(k+ny) + \tilde{a}_1 y(k) + \dots + \tilde{a}_{n\tilde{a}+1} y(k + ny + 1 - n\tilde{a}) &= b_1 \Delta u(k + nu - 1) + \dots + \\
 &+ \dots + b_{n_b} \Delta u(k + nu - n_b) \quad (3-17)
 \end{aligned}$$

Reescrevendo o sistema de equações da Eq.(3-17), de forma compacta, torna-se:

$$C_{\tilde{A}} y_{\rightarrow k} + H_{\tilde{A}} y_{\leftarrow k} = C_B \Delta u_{\rightarrow k-1} + H_B \Delta u_{\leftarrow k-1} \quad (3-18)$$

Na Eq. (3-18) observa-se as notações $y_{\rightarrow k}$ e $y_{\leftarrow k}$. Introduzida por (ROSSITER, 2003) a notação da seta apontada para à direita é utilizada para valores estritamente futuros (não incluindo valores atuais). Enquanto que a seta apontada para à esquerda denota valores passados (incluindo o valores atuais).

As matrizes, $C_{\tilde{A}}$, C_B , $H_{\tilde{A}}$ e H_B são matrizes denominadas *Toeplitz* e *Hankel* associadas aos polinômios $\tilde{A}(q)$ e $B(q)$, detalhes sobre essas matrizes pode ser encontrado em (ROSSITER, 2003). Cada termo da Eq. (3-18) é dado por:

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_1 & 1 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_2 & \tilde{a}_1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_{\tilde{A}}} \underbrace{\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+n_y) \end{bmatrix}}_{y_{\rightarrow k}(\text{futuro})} + \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{a}_1 & \tilde{a}_2 & \dots & \tilde{a}_{n_{\tilde{a}}+1} \\ \tilde{a}_2 & \tilde{a}_3 & \dots & 0 \\ \tilde{a}_3 & \tilde{a}_4 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_{\tilde{A}}} \underbrace{\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ \vdots \\ y(k-n_{\tilde{a}}) \end{bmatrix}}_{y_{\leftarrow k}(\text{presente/passado})} = \\
 & \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ b_3 & b_2 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_B} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+ny-1) \end{bmatrix}}_{\Delta u_{\rightarrow k-1}(\text{presente e futuro})} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_2 & b_3 & \dots & b_{nb} \\ b_3 & b_4 & \dots & 0 \\ b_4 & b_5 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_B} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta u(k-2) \\ \vdots \\ \Delta u(k-nb+1) \end{bmatrix}}_{\Delta u_{\leftarrow k-1}(\text{passado})} \quad (3-19)
 \end{aligned}$$

Da Eq. (3-18) a saída predita é dada por:

$$y_{\rightarrow k} = C_{\tilde{A}}^{-1} [C_B \Delta u_{\rightarrow k-1} + H_B \Delta u_{\leftarrow k-1} - H_{\tilde{A}} y_{\leftarrow k}] \quad (3-20)$$

E pode ser escrita como:

$$y_{\rightarrow k} = H \Delta u_{\rightarrow k-1} + P \Delta u_{\leftarrow k-1} + Q H_{\tilde{A}} y_{\leftarrow k} \quad (3-21)$$

Onde $H = C_{\tilde{A}}^{-1} C_B$, $P = C_{\tilde{A}}^{-1} H_B$, $Q = -C_{\tilde{A}}^{-1} H_{\tilde{A}}$. A matriz $C_{\tilde{A}}^{-1}$ pode ser calculada por $C_{\tilde{A}}^{-1} = C_{\tilde{A}}^{-1}$, (ROSSITER, 2003). Na seção seguinte será abordada a lei de controle do GPC, então a Eq.(3-19) ainda pode ser convenientemente escrita da seguinte maneira:

$$Y = G \Delta U + F \quad (3-22)$$

Onde $G \Delta U = P \Delta u_{\leftarrow k-1} + Q H_{\tilde{A}} y_{\leftarrow k}$, que representa a resposta livre do sistema e $F = H \Delta u_{\rightarrow k-1}$ representando a resposta forçada do sistema.

3.3 LEI DE CONTROLE DO GPC PARA O CASO SISO IRRESTRITO

De posse do modelo de predição representado pela Eq. (3-10) e (3-21), que podem ser representadas pela Eq. (3-22) a lei de controle do GPC é obtida pela minimização da Eq. (3-1), como já citado, ou seja:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_y} \delta(j) [\hat{y}(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (3-23)$$

Com a função custo anteriormente definida, e com o modelo de predição, é possível determinar a lei de controle. Dessa forma, A Eq.(3-23) pode ser escrita como:

$$J = (G\Delta u + F - w)^T (G\Delta u + F - w) + \lambda \Delta u^T \Delta u \quad (3-24)$$

Onde W é o vetor de referências dado por:

$$w = [\varpi(k+d+1) \ \varpi(k+d+2) \ \dots \ \varpi(k+d+N)]^T \quad (3-25)$$

A Eq.(3-24) ainda pode ser escrita na forma:

$$J = \frac{1}{2} \Delta u^t H u + b^t \Delta u + F_0 \quad (3-26)$$

Em que:

$$\begin{aligned} H &= 2(G^t G + \lambda I) \\ b^t &= 2(F - w)^T G \\ F_0 &= (F - W)^T (F - W) \end{aligned} \quad (3-27)$$

A finalidade da lei de controle do GPC é que essa lei seja tal que minimize J . Assumindo que não há restrições, esse mínimo pode ser encontrado igualando a zero o gradiente de J em relação a Δu . Dessa forma, fazendo $\frac{\delta J}{\delta \Delta u} = 0$, tem-se que:

$$\Delta u = -H^{-1} b = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f) \quad (3-28)$$

Devido ao princípio do horizonte móvel, o sinal de controle que está sendo enviado é o primeiro elemento do vetor u , e é dado por:

$$\Delta u(k) = K(w - f) \quad (3-29)$$

Onde K é o primeiro elemento da matriz $H = 2(G^t G + \lambda I)$. Isso pode ser facilmente observado na Figura 3.3-1 adaptada de (CAMACHO & BORDONS, 2004).

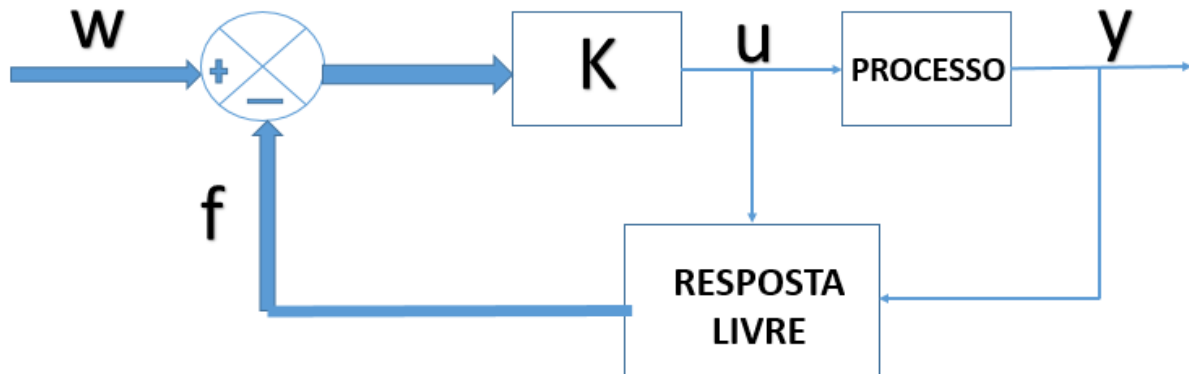


Figura 3.3-1 Diagrama de blocos da lei de controle do GPC.

3.4 LEI DE CONTROLE PARA DO GPC O CASO RESTRITO

Na seção anterior foi demonstrado o algoritmo GPC livre de restrições. No entanto, uma das características mais atraentes do GPC é a de lidar com restrições do sistema a ser controlado implicitamente no projeto do controlador. No caso sem restrições, como visto na seção anterior, a solução de:

$$J = \frac{1}{2} \Delta u^t H \Delta u + b^t \Delta u + f_0 \quad (3-30)$$

É dada por:

$$H \Delta u = -b$$

Sujeito a restrições torna-se:

$$R \Delta u \leq c$$

Onde R e c são matrizes de restrições determinadas a partir das restrições contidas no problema em questão. No caso do presente trabalho as restrições que serão tratadas são: restrições na variação do sinal de controle, na amplitude do sinal de controle e no sinal de saída.

3.4.1 RESTRIÇÕES NA VARIAÇÃO DO SINAL DE CONTROLE

Definindo-se Δu como sendo a variação do sinal de controle, $\underline{\Delta u}$ sendo o limite mínimo e $\overline{\Delta u}$ o limite máximo para Δu , pode-se escrever esta restrição na forma:

$$\underline{\Delta u} \leq \Delta u \leq \overline{\Delta u} \quad (3-31)$$

Na forma de desigualdades matriciais tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta u} \\ \underline{\Delta u} \\ \vdots \\ \underline{\Delta u} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_u-1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \overline{\Delta u} \\ \overline{\Delta u} \\ \vdots \\ \overline{\Delta u} \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

A Eq.(3-32) ainda pode ser escrita de maneira mais conveniente como:

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix} \Delta u \leq \begin{bmatrix} V\overline{\Delta u} \\ -V\underline{\Delta u} \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

Em que I é uma matriz identidade de dimensão $N_u \times N_u$, e V é um vetor com N_u elementos, todos unitários.

3.4.2 RESTRIÇÕES NA AMPLITUDE DO SINAL DE CONTROLE

As restrições na amplitude do sinal de controle também podem ser tratadas no projeto do controlador. Estas restrições podem ser definidas como sendo \underline{u} o limite mínimo e \overline{u} o limite máximo de u que é o sinal de controle. Assim:

$$\underline{u} \leq u(k) \leq \bar{u} \quad (3-34)$$

Na forma de desigualdade matricial:

$$\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{u} \\ \vdots \\ \underline{u} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_u-1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{u} \\ \vdots \\ \bar{u} \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

Para escrever as ações de controle em função da variação do sinal de controle Δu , tem-se que:

$$u(k+i) = u(k-1) + \Delta u(k) + \Delta u(k+1) + \dots + \Delta u(k+i) \quad (3-36)$$

Uma vez que:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_u-1) \end{bmatrix}}_{u(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}}_E \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_u-1) \end{bmatrix}}_{\Delta u(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}}_L u(k-1) \quad (3-37)$$

Na forma compacta:

$$u(k) = E\Delta u(k) + Lu(k-1) \quad (3-38)$$

Então a Eq.(3-34) torna-se:

$$\underline{u} \leq E\Delta u(k) + Lu(k-1) \leq \bar{u} \quad (3-39)$$

E que ainda pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} E \\ -E \end{bmatrix} \Delta u \leq \begin{bmatrix} V\bar{u} - Lu(k-1) \\ -V\underline{u} - Lu(k-1) \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

Onde E e L já foram definidos na Eq. (3-37) e V é um vetor com N_u elementos, todos unitários.

3.4.3 RESTRIÇÕES NO SINAL DE SAÍDA

As restrições na saída seguem o mesmo raciocínio das citadas anteriormente. No entanto deve-se escrever essas restrições em função de Δu , já que é em função de Δu que será minimizada a função custo. Da mesma forma como foi feito com as restrições do sinal de controle, u . Definindo-se Y como sendo o sinal de saída e \underline{Y} seu limite inferior e \bar{Y} como sendo o superior, tem-se que:

$$\underline{Y} \leq Y(k) \leq \bar{Y} \quad (3-41)$$

Onde a Eq. (3-40) pode ser reescrita na forma:

$$\underline{Y} \leq G\Delta u + F \leq \bar{Y} \quad (3-42)$$

Escrevendo a Eq. (3-41) e na forma de desigualdade matricial, chega-se a:

$$\begin{bmatrix} G \\ -G \end{bmatrix} \Delta u \leq \begin{bmatrix} \bar{Y} - F \\ -\underline{Y} - F \end{bmatrix} \quad (3-43)$$

3.4.4 RESUMO DAS RESTRIÇÕES

Após a modelagem das restrições do sinal de controle, sua taxa de variação e do sinal de saída, essas equações podem ser combinadas em uma única equação geral onde todas as restrições poderão ser satisfeitas simultaneamente. Desse modo, utilizando as equações (3-33), (3-40) e a Eq. (3-43) chega-se a:

$$R\Delta u \leq c$$

Onde:

$$R = \begin{bmatrix} I \\ -I \\ E \\ -E \\ G \\ -G \end{bmatrix}; \quad e C = \begin{bmatrix} V\overline{\Delta u} \\ -V\underline{\Delta u} \\ V\overline{u} - Lu(k-1) \\ -V\underline{u} - Lu(k-1) \\ \overline{Y} - F \\ -\underline{Y} - F \end{bmatrix}$$

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO

4.1 INTRODUÇÃO

Poços de produção de petróleo apresentam usualmente um ciclo de vida de produção que começa como poço surgente, aquele que produz naturalmente a partir das pressões existentes no reservatório. Entretanto, com a retirada do petróleo a pressão no reservatório diminui e com o tempo deixa de existir energia suficiente para elevar o petróleo até a superfície, sendo necessária a utilização de métodos artificiais de elevação do petróleo, (CAJUEIRO, 2012). Dentre os diversos métodos de elevação existentes, o mais utilizado em poços terrestres, *on-shore*, é o método do Bombeio Mecânico com Hastes, (THOMAS ET AL.,2001).

Este capítulo será destinado a uma breve revisão desta técnica, visto que há uma vasta literatura sobre o tema. Os itens serão resumidos na descrição dos componentes contidos em um sistema de bombeio mecânico, SBM, e seus princípios básicos de operação.

4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A elevação do fluido contido no poço se dá a partir do funcionamento de uma bomba alternativa instalada no fundo do poço. Esse movimento alternativo é produzido na superfície por uma unidade de bombeio, na qual faz parte um motor rotativo. A unidade de bombeio, UB, é responsável por converter movimento rotativo em alternativo e transmiti-lo ao pistão da bomba de fundo através de uma coluna de hastes.

4.2.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA TÍPICO

A Figura 4.2-1, extraída de (ORDOÑEZ, 2008), ilustra um sistema de BM típico, o qual é dividido em dois grupos: elementos de superfície e de subsuperfície.

Os principais componentes de acordo com cada grupo e em conformidade com (TORRES, 2012), (ORDOÑEZ, 2008) (BARRETO FILHO, 1993), são:

Componentes de superfície

- Motor: responsável por fornecer energia ao sistema. Uma das variáveis do processo que está relacionado com o motor é definido como CPM, (Ciclos Por Minuto). Sendo a maneira usual de se definir a velocidade de bombeio;
- Redutor: reduz a velocidade angular do motor a uma velocidade adequada de bombeamento, CPM, proporcionando inclusive um maior torque ao sistema;
- Balancim (viga principal): converte o movimento rotativo do redutor, dado pela rotação do motor, em um movimento alternativo vertical.
- Contrapeso: devido a diferença de carga exercida na coluna de hastes na sucessão de movimentos ascendentes e descendentes o contrapeso é utilizado para balancear essa carga de forma a melhorar o rendimento e aumentar a vida útil do motor;
- Haste polida: transmite o movimento alternativo fornecido pelo balancim ao conjunto de hastes. A denominação haste polida é devido ao acabamento desenvolvido com o objetivo de permitir uma vedação adequada, com o mínimo de atrito com o poço;
- Tripé (apoio): É a estrutura mecânica que suporta o balancim.

Componentes de subsuperfície ou de fundo.

- Coluna de hastes: é diretamente conectada, rosqueada, à haste polida. Sua função é transmitir o movimento alternativo da UB para a bomba de fundo;
- Bomba de fundo: responsável por deslocar o fluido do poço no sentido ascendente. Suas principais partes são: o pistão, as válvulas de passeio e de pé. Detalhes da bomba de fundo podem ser visualizados na Figura 4.2-2.

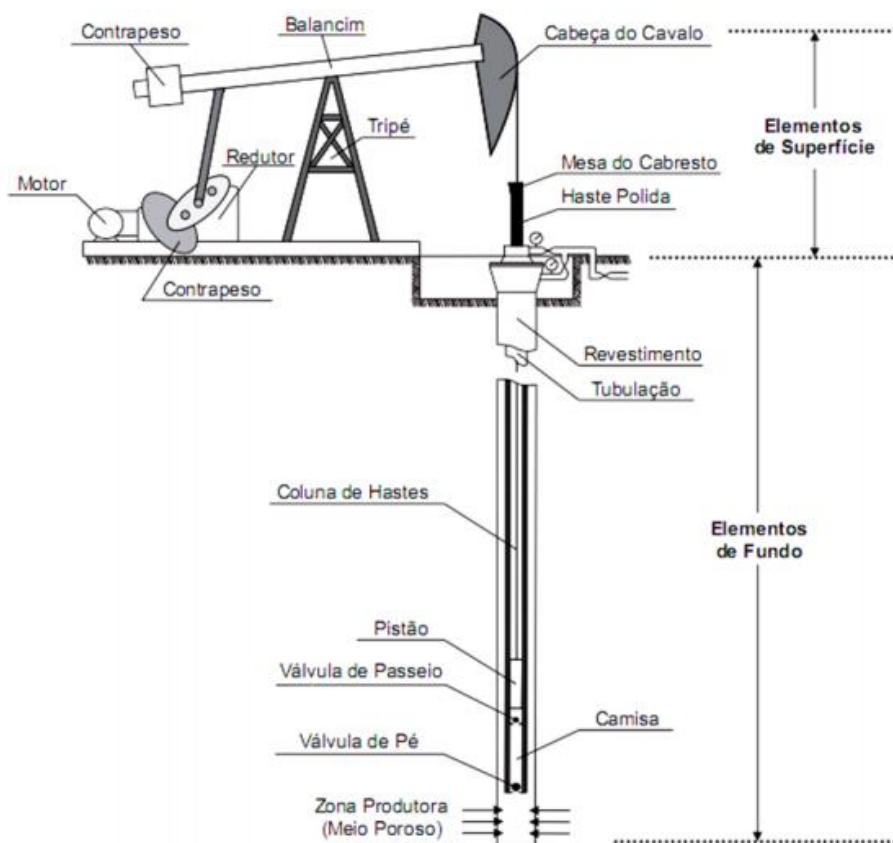


Figura 4.2-1. Sistema BM típico.

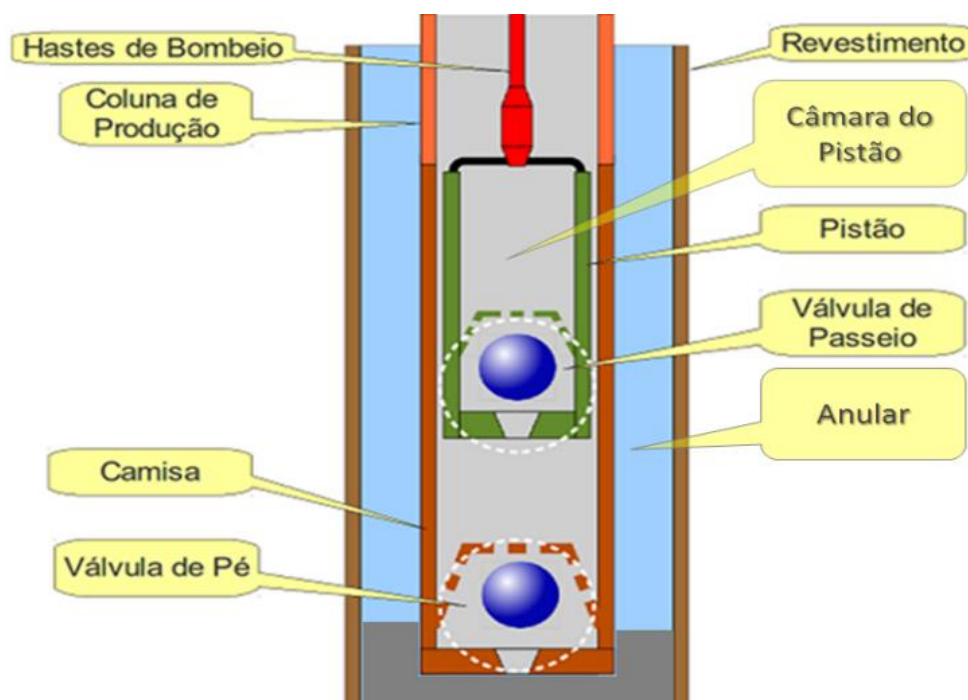


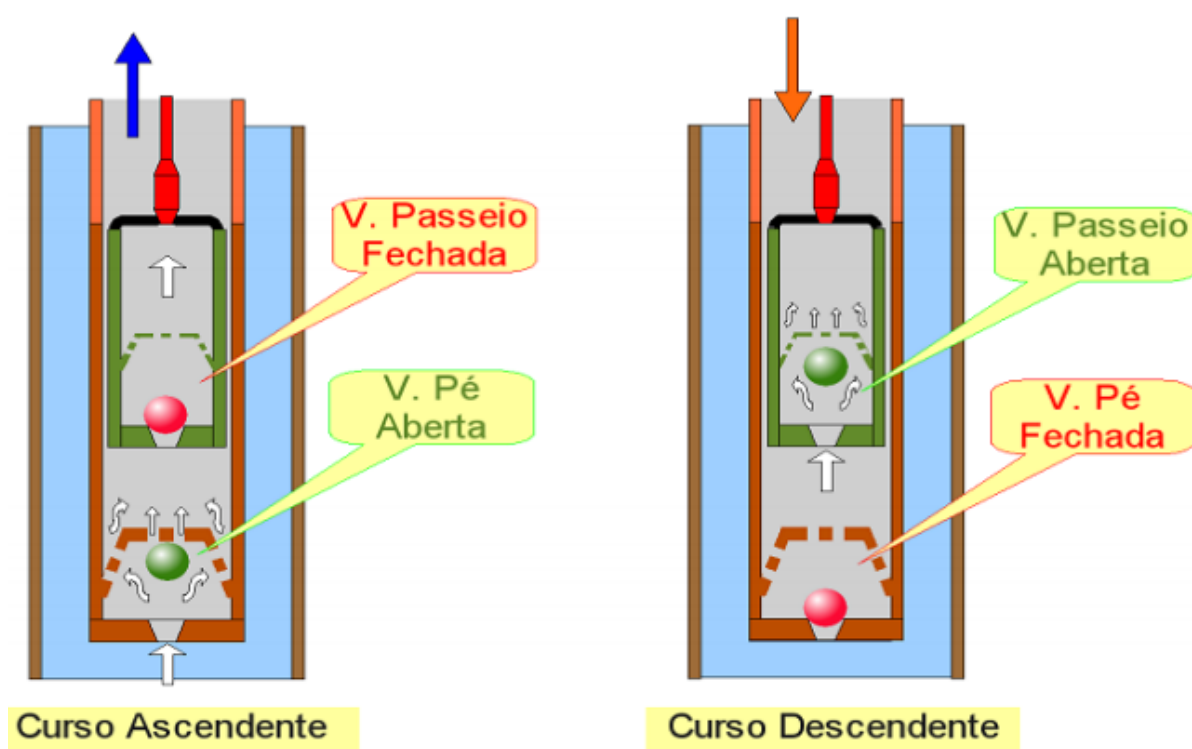
Figura 4.2-2. Bomba de fundo.

4.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

Nas subsecções seguintes procura-se introduzir alguns aspectos operacionais de um sistema de bombeio mecânico e também alguns fenômenos envolvidos que ocorrem quando a unidade está em operação.

4.3.1 CICLO DE BOMBEIO

O ciclo de bombeamento é dividido em dois cursos diferentes ilustrados figura 4.3-1, o curso ascendente, *upstroke*, e o curso descendente, *downstroke*, (THOMAS ET AL.,2001). No curso ascendente, que ocorre quando a coluna de hastes puxa o pistão para cima, o peso do fluido que está dentro da coluna de produção mantém a válvula de passeio fechada. Isto se dá devido à pressão hidrostática no interior da bomba de fundo ser menor do que a pressão hidrostática do fluido acima do pistão, (CAJUEIRO, 2012). Neste momento, a baixa pressão criada na camisa da bomba abaixo do pistão e acima da válvula de pé faz com que esta se abra, permitindo a passagem do fluido que está no anular para o interior da bomba. E o fluido contido acima do pistão é elevado com as hastes.



4.3-1 Ciclo de bombeio.

No curso descendente, que ocorre quando as hastes se deslocam para baixo, os fluidos que estão na camisa da bomba são comprimidos fechando a válvula de pé. Como o pistão continua descendo, a pressão acima e abaixo da válvula de passeio se igualam e esta abre, permitindo a passagem de fluido para cima do pistão. Ao atingir o final do curso descendente e iniciar o curso ascendente, a válvula de passeio fecha e a de pé abre, iniciando um novo ciclo, (THOMAS ET AL.,2001).

4.3.2 PANCADA DE FLUIDO

Um fenômeno importante que pode ocorrer durante a elevação de petróleo por bombeio mecânico é conhecido como pancada de fluido. Esse fenômeno pode afetar diretamente na produção e nos custos de manutenção.

De acordo com (ORDOÑEZ, 2008), a pancada de fluido ocorre quando o nível do anular do poço não possui fluido suficiente para o enchimento completo da câmara do pistão durante o curso ascendente, como pode ser visto em A na Figura 4.3-2. Isto pode acontecer por algum problema que esteja restringindo a passagem do fluido pela válvula de pé, ou porque o sistema de bombeio mecânico tem capacidade de produção maior do que a do reservatório. Para condições de operação normal, no início do ciclo descendente, a válvula de passeio abre-se ao encontrar a camisa de produção cheia de fluido, fazendo que esta seja preenchida suavemente. Em situações em que não há fluido suficiente na câmara de produção, caso B da Figura 4.3-2, o pistão depara-se com uma coluna de gás ocasionando uma pressão insuficiente para provocar a abertura da válvula de passeio. À medida que o pistão avança no curso descendente, este pode encontrar de maneira abrupta a coluna de fluido no interior da câmara de produção. Quando isto ocorre, ocasiona uma transferência brusca de carga e conseqüentemente, como está ilustrado em C da Figura 4.3-2, um forte golpe mecânico sobre os componentes da bomba de fundo.

A pancada de fluido acelera o desgaste mecânico dos equipamentos da unidade de bombeio, tanto de superfície como de subsuperfície. Uma ferramenta adequada para se diagnosticar a pancada de fluido é a chamada carta dinamométrica a qual será brevemente introduzida na próxima subsecção.

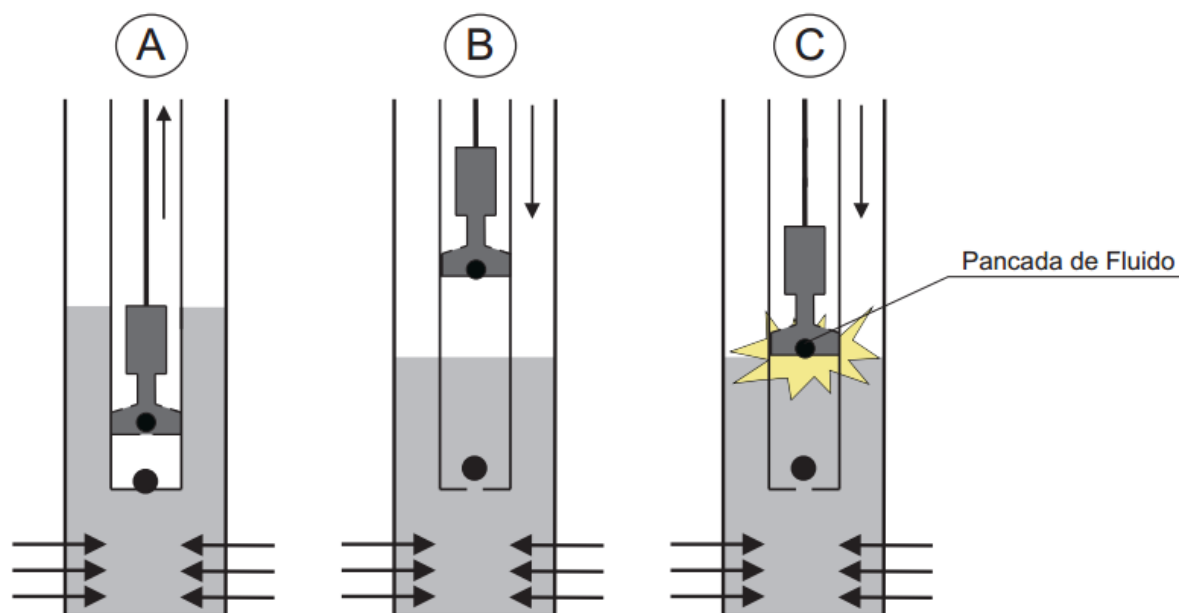


Figura 4.3-2. Esquema gráfico da pancada de fluido.

4.3.3 CARTA DINAMOMÉTRICA

A carta dinamométrica é um instrumento muito importante para análise de condições de operação do bombeio mecânico. De acordo com (CAJUEIRO, 2012) através dela é possível obter diversas informações, dentre as quais pode-se destacar o início e final dos cursos ascendente e descendente, carga sobre a bomba e hastes, e a pancada de fluido.

Existem dois tipos de cartas dinamométricas; a carta de superfície (CDS) e a carta de fundo (CDF). A CDS é um traçado contínuo da carga versus deslocamento (ambos referenciados a haste polida), é registrada por meio de sensores de posição e célula de carga. A CDF é calculada a partir da CDS por meio de modelos matemáticos que possibilitam inferir o comportamento no fundo do poço a partir de dados oriundos da superfície (CDS).

A Figura 4.3-3 extraída de (CAJUEIRO, 2012) exemplifica uma CDS de uma unidade de bombeio operando sobre condições normais. Nesta CDS obtém-se informações referentes às cargas suportadas pela haste polida, início, fim, e

desenvolvimento do curso das hastes, a máxima e mínima carga suportada pela haste polida, peso do fluido sobre o pistão, efeito dos contrapesos, vazamento na válvula de pé e na válvula de passeio.

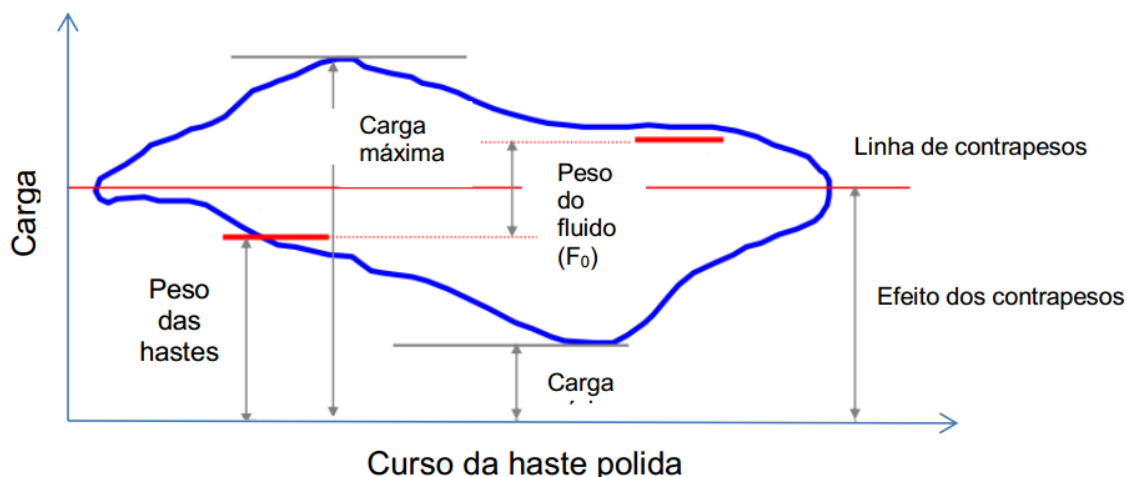


Figura 4.3-3. Carta dinamométrica de superfície.

A Figura 4.3-4 também adaptada de (CAJUEIRO, 2012), mostra uma CDF de uma unidade de bombeio operando em condições normais. O ponto A indica onde o curso da haste inicia o movimento ascendente. Do ponto B para o ponto C, o fluido é elevado pelas hastes. Do ponto C para o D, o curso das hastes é descendente.

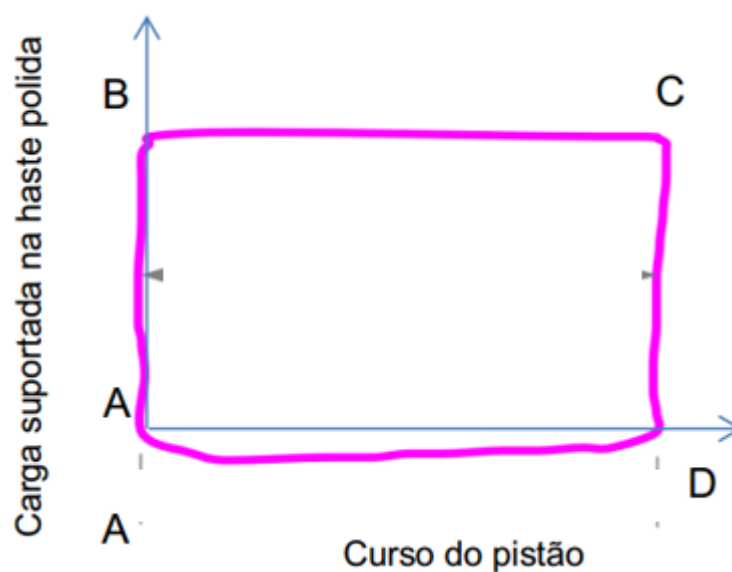


Figura 4.3-4. CDF de um SBM operando sob condição normal.

Uma informação muito importante que pode ser extraída da CDF é referente a pancada de fluido. A Figura 4.3-5 adaptada de (CAJUEIRO, 2012), mostra uma CDF para a condição de pancada de fluido. O ponto A indica o início do curso descendente das hastes e ocorre com a válvula de passeio fechada. A válvula de passeio abre-se somente após o choque da bomba com o fluido existente na coluna.

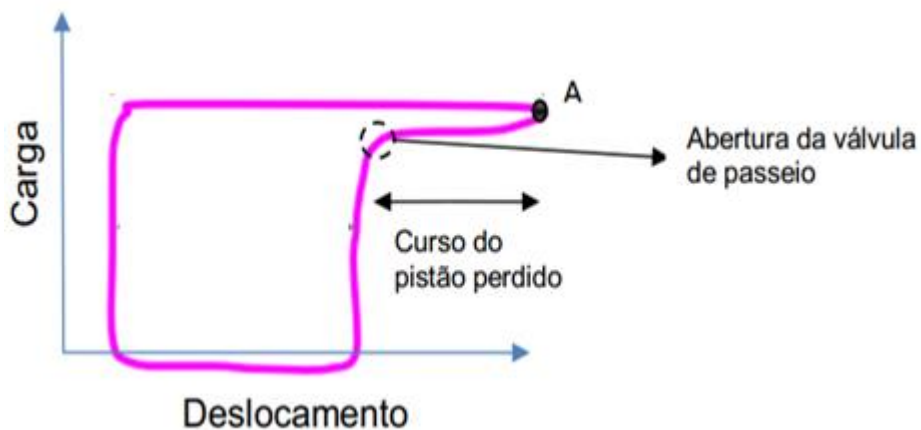


Figura 4.3-5. Carta dinamoétrica associada à condição de pancada de fluido.

5 PROTÓTIPO DE UM SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO

O protótipo de um sistema de bombeio mecânico, PBM, foi desenvolvido no Centro de Capacitação Tecnológica em Automação Industrial (CTAI) da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. O objetivo desse protótipo é representar de forma didática os fenômenos físicos que acontecem em um sistema de bombeio mecânico como pancada de fluido, pressão de reservatório, atritos etc. Ele também servirá como uma plataforma de pesquisa onde as mais variadas técnicas de controle podem ser implementadas e analisadas, antes de serem executadas em uma planta de tamanho real.

O PBM ainda pode ser transformado em produto, neste caso, um kit didático para áreas de petróleo e gás, controle e automação, instrumentação etc. Com esse intuito, construiu-se um protótipo que fosse funcional e de fácil portabilidade. O PBM possui 1,2 metros de altura, é totalmente instrumentado e com toda a tubulação transparente para melhor visualização dos fenômenos. O sistema completo pode ser visualizado na Figura 5-4.3-1.

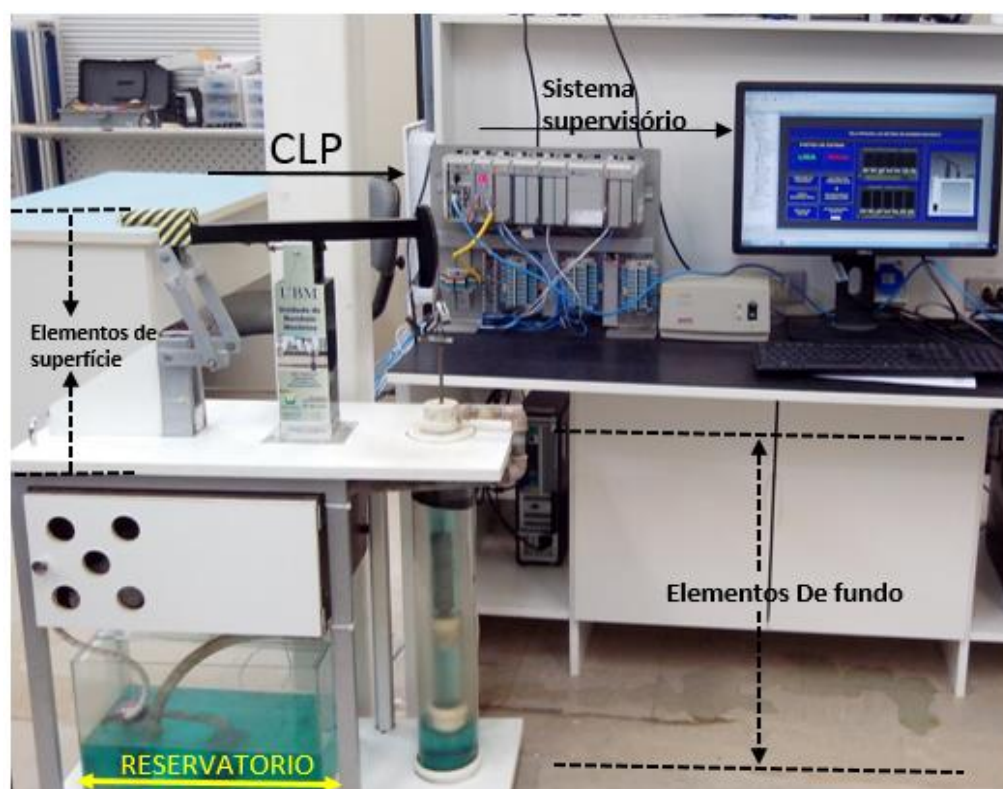


Figura 5-4.3-1. Sistema completo do Protótipo de Bombeio Mecânico, PBM

Nas secções seguintes será mostrado o processo de desenvolvimento do PBM, incluindo os requisitos de projeto, sua montagem e integração.

5.1 REQUISITOS DE PROJETO DO PROTÓTIPO

O objetivo principal de desenvolvimento do projeto foi o de apresentar um protótipo funcional de um sistema de bombeio mecânico em escala reduzida. A proposta foi composta de projeto mecânico, malha de controle por um Controlador Lógico Programável, CLP, com sistema supervisório (IHM, Interface Homem Máquina), e ainda que representasse com a maior fidelidade possível a operação de um sistema de produção de petróleo por bombeio mecânico. Desse modo, na fase de projeto foram definidos alguns requisitos conceituais para o desenvolvimento do PBM. Esses requisitos foram divididos em funcionais, que estão relacionados com a operação do sistema e requisitos estruturais. Estes últimos qualitativos, nesse caso, são requisitos que estão relacionados com o tamanho, aspectos físicos da estrutura, *design* da interface do sistema supervisório, controle, etc.

5.1.1 REQUISITOS FUNCIONAIS DO PROTÓTIPO

Entre os requisitos funcionais desse protótipo pode-se citar os principais como reproduzir o ambiente industrial, ou seja, o sistema deve conter malha de controle composta por CLP com sistema supervisório. A variável de processo à ser controlada foi definida como sendo o nível dinâmico no anular do poço e a variável manipulada a velocidade do ciclo de bombeio. Outro requisito funcional foi o de traçar as cartas dinamométricas, reproduzindo ao menos, as condições de operação normal e de pancada de fluido.

5.1.2 REQUISITOS ESTRUTURAIS QUALITATIVOS

Além dos requisitos funcionais, foram apresentados também requisitos não funcionais, ou seja, requisitos estruturais e qualitativos. Entre esses requisitos pode-se citar que o sistema completo deve ser portátil e ter peso inferior a 20Kg. Deve ser de

fácil fixação e com dimensões de no máximo 1,7m de altura por 0,75m de largura por 0,35m de profundidade. A unidade de bombeio mecânico deve ter no máximo 0,5m de altura.

A montagem física deve respeitar as posições verticais, ou seja, é importante visualizar os equipamentos de superfície acima e os de subsuperfície em baixo, com uma clara divisão da linha que divide o que está acima e do que está abaixo da superfície. Os motores para acionamento da bomba e para a movimentação da unidade de bombeio devem ser motores de corrente contínua, devidamente dimensionados.

O revestimento e a coluna de produção devem ser feitos de material transparente para perfeita visualização do fluido. Esse fluido deve ser água que circulará em circuito fechado, ou seja, tudo que for produzido pelo poço deve retornar ao reservatório;

5.1.2.1 REQUISITOS DE INTERFACE (SISTEMA SUPERVISÓRIO, IHM)

Além dos requisitos funcionais, estruturais e qualitativos, também foram definidos alguns requisitos referente ao sistema supervisório e sua interface com usuário. Entre estes requisitos pode-se destacar que a IHM deve ser desenvolvida no computador e deve ser baseada em sistemas supervisórios. Deve ser a interface para definição do ponto de operação (nível dinâmico desejado). Conterá sinóticos que reproduzam a operação da unidade de bombeio em tempo real.

A IHM deve mostrar valores das variáveis do sistema em tempo real, inclusive plotar as cartas dinamométricas dos últimos 10 ciclos de bombeamento. Também deve mostrar, em tempo real, gráfico com dados históricos da velocidade dos ciclos de bombeio por minuto (CPM), históricos da produção (em litros/min).

Os requisitos definidos referentes ao controle do sistema serão apresentados convenientemente no capítulo seis, no qual é tratado o projeto do controlador.

5.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O processo de desenvolvimento do protótipo partiu da análise dos requisitos citados na secção anterior. Esta análise foi realizada com o intuito de observar a

viabilidade de implementação desses requisitos e de inteirar-se a respeito do projeto. Após isso, traçar uma estratégia de desenvolvimento. Esta estratégia utilizada pode ser resumida nas seguintes etapas:

- Análise de requisitos;
- Levantamento da literatura de referência para a área;
- Divisão de atividades do projeto por área relevante;
- Ênfase no processo mecânico;
- Solução conceitual dos problemas de controle;
- Determinação de componentes e materiais;
- Montagem da unidade e planta simulada;
- Programação do supervisor e sistemas acessórios;
- Integração de componentes e testes.

5.3 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UM SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO

A unidade de bombeio mecânico e de toda a planta foi projetada visando à facilidade no processo de construção. Entretanto, para que o protótipo se assemelhasse com uma unidade de bombeio real seria necessário que a estrutura fosse construída em metal. Porém, para a sua fabricação, um fator limitante foi o orçamento, visto que muitos dos serviços que seriam utilizados gerariam custos relativamente altos, como é o caso a usinagem das peças em metal ou alumínio para o protótipo.

Assim, foram utilizados métodos alternativos no processo de fabricação, por exemplo, a utilização de componentes em madeira, tornando mais barato a usinagem das peças e conseqüentemente a construção do protótipo. Entretanto, a semelhança visual do PBM com SBM real foi respeitada. Para isto, as peças da unidade de bombeio que foram confeccionadas em madeira foram tratadas com massa plástica e posteriormente pintadas em tinta automotiva, dando aspecto visual bastante semelhante ao metal.

5.3.1 BASE DA UNIDADE DE BOMBEIO

A base utilizada no projeto, ver Figura 5.3-1, foi adaptada de uma bancada de escritório que já se encontrava sem uso e que, oportunamente, possuía medidas que se encaixava nos requisitos de projeto minimizando os custos e dando uma conotação de sustentabilidade ao projeto. A partir da base existente os tampões da parte superior e inferior foram substituídos por outros que se enquadrassem aos padrões do projeto.

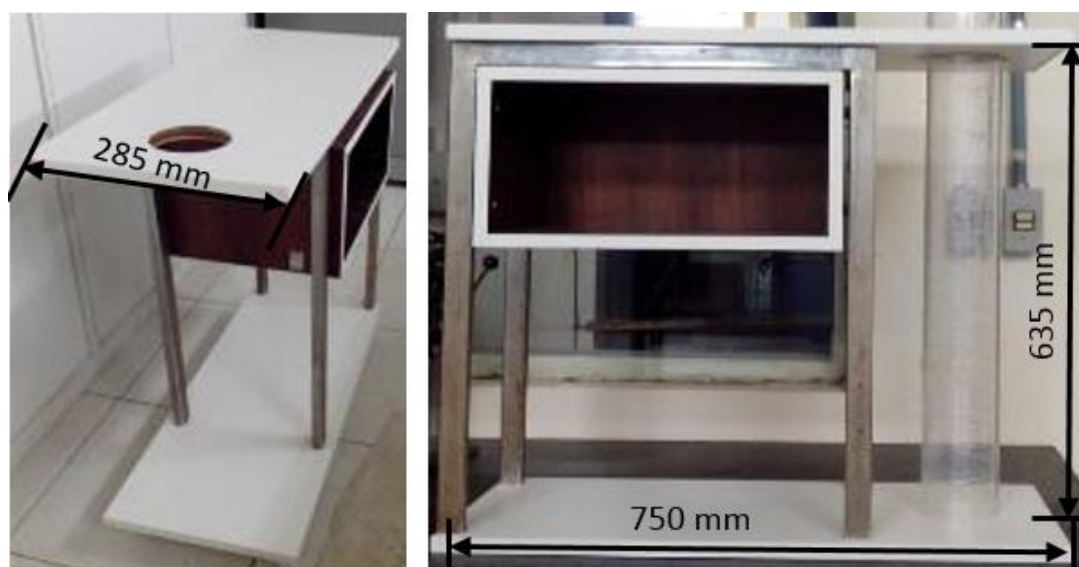


Figura 5.3-1. Mesa reaproveitada sendo preparada com a furação apropriada (lado esquerdo) mesa com a coluna de poço sendo instalada (lado direito).

5.3.2 UNIDADE DE BOMBEIO

5.3.2.1 TRIPÉ (APOIO)

A primeira peça a ser montada foi o tripé, ver Figura 5.3-2, em forma de torre, fixado com 4 suportes de alumínio na base, o que dá solidez e estabilidade à unidade de bombeio. O tripé (apoio) foi fabricado em madeira, revestido por massa plástica e pintado com tinta metálica, esse componente é responsável por apoiar o Balancim e sua carga.

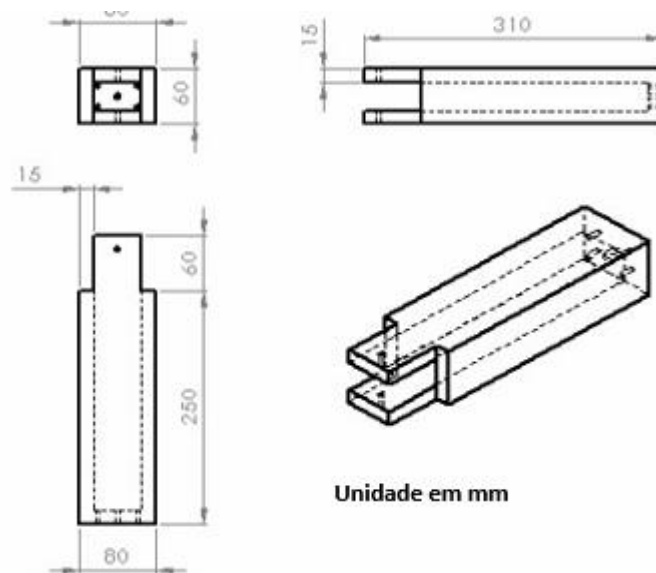


Figura 5.3-2. Tripé

5.3.2.2 VIGA TRANSVERSAL OU BALANCIM

Viga de madeira, apoiada por um “mancal”, que está preso no topo do tripé. Essa peça também foi revestida de massa plástica e pintada com tinta metálica para melhorar o acabamento, ver Figura 5.3-3. Na extremidade da viga está localizada a cabeça da Unidade de bombeio, que irá suportar a carga da unidade de bombeio. A geometria da cabeça da unidade faz com que a haste polida sempre se mova verticalmente no poço, reduzindo esforços e atrito. O cabresto, elemento que realiza a conexão mecânica entre o balancim e a haste, é de aço revestido com PVC.

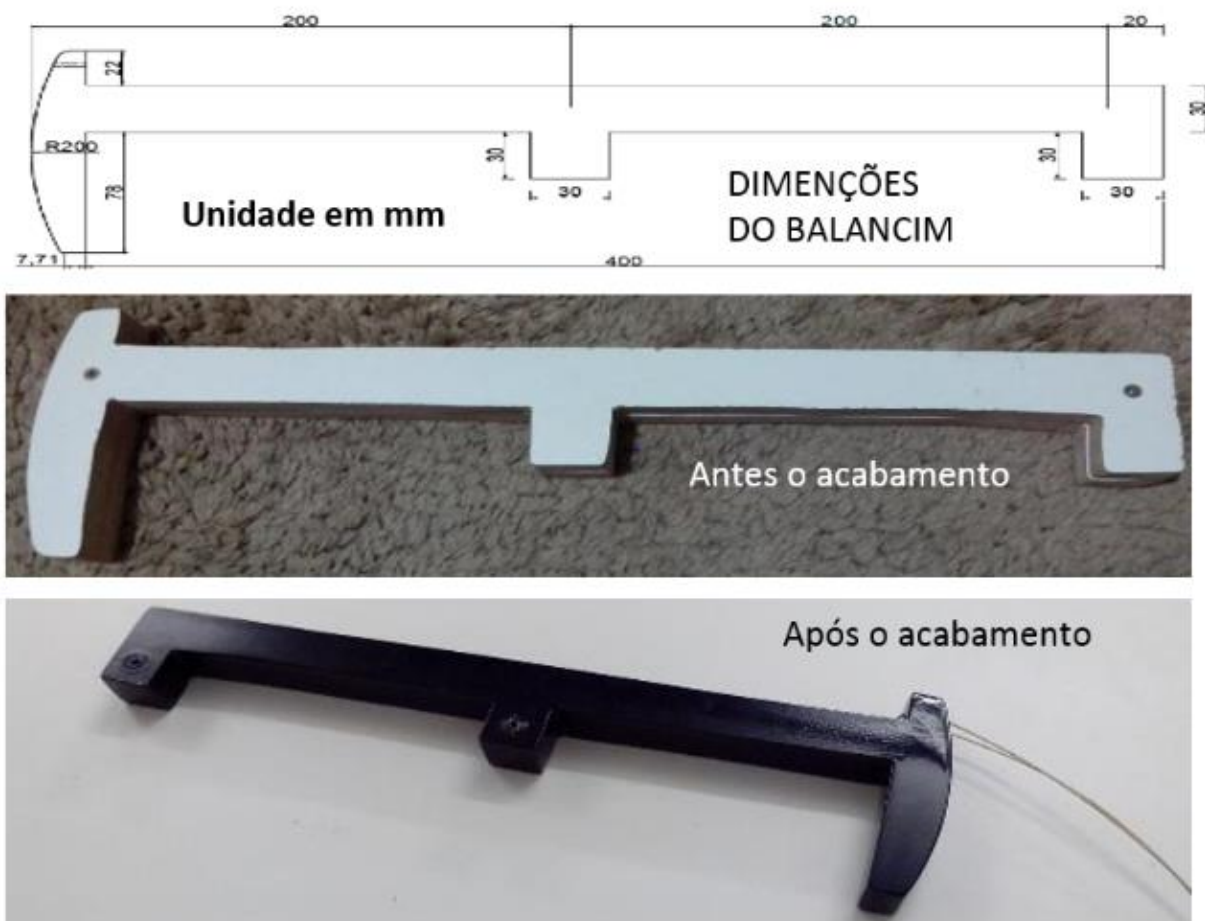


Figura 5.3-3. Dimensões e balancim antes e depois do acabamento

5.3.2.3 MANIVELA E BIELA

A manivela, ver Figura 5.3-4, foi confeccionada em madeira e é usada para transmitir o movimento do motor à biela. Um contrapeso foi utilizado para minimizar o esforço do motor. A biela é responsável por transmitir o movimento do motor ao balancim. A distância do eixo da manivela ao mancal da biela define o curso da haste polida que é de 15 cm. A montagem da biela e manivela pode ser observada na Figura 5.3-4, nesta montagem foram inseridos suportes e a polia.

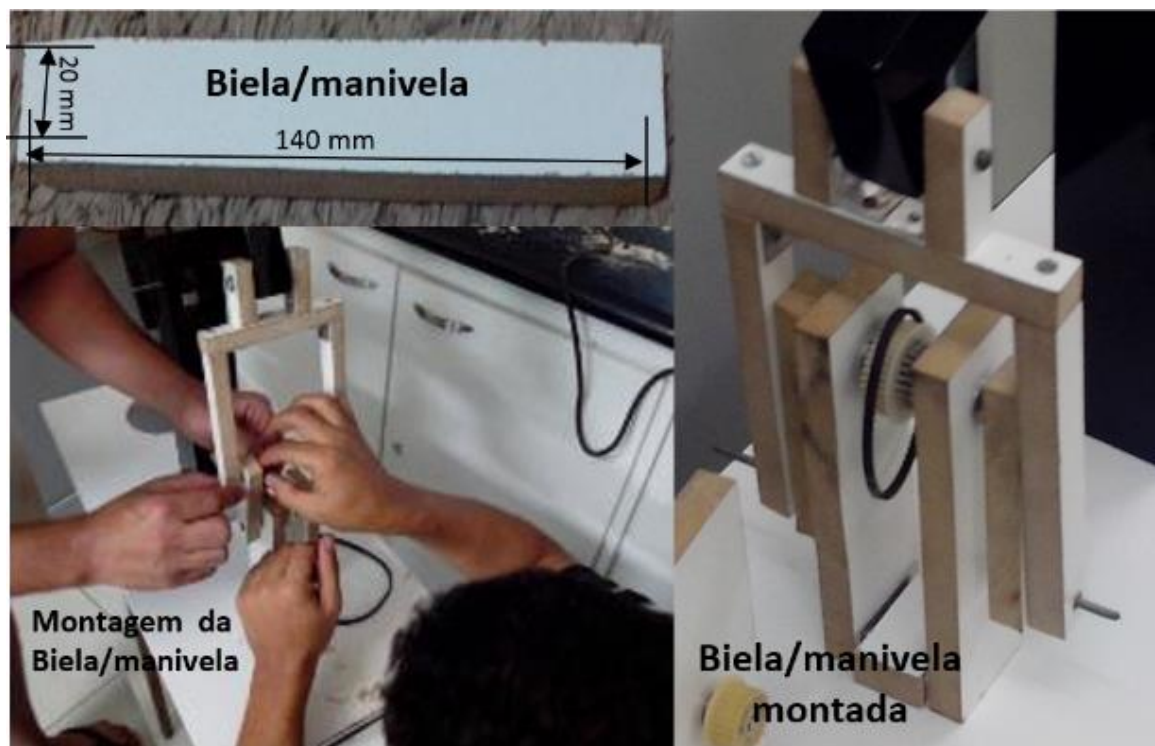


Figura 5.3-4. Fixação da Biela, manivela e polia

5.3.2.4 HASTE POLIDA

A haste polida, ver Figura 5.3-5, é de aço inox e é responsável por suportar a carga da coluna de fluido, atrito e peso dos componentes da bomba de fundo.

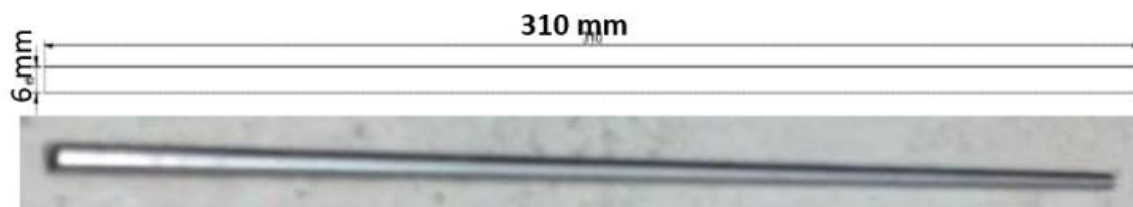


Figura 5.3-5. Dimensões e Haste polida

5.3.2.5 CABEÇA DE PRODUÇÃO

Para a cabeça de produção foi utilizada uma tampa cega (cap) de 50 mm. No centro foi feito um furo de 6 mm e foi afixado nesse furo um mancal, por onde irá deslizar a haste polida, e que também servirá como vedação. Para apoiar o mancal foi utilizada uma camada de 3 mm de durepoxi por toda a base do cap. Para a saída

da produção do poço foi aberto um furo de $\frac{1}{2}$ mm na lateral do cap. Para vedação entre o tubo de acrílico e o cap foi utilizado um anel de vedação. A cabeça de produção está ilustrada na Figura 5.3-6.



Figura 5.3-6. Cap de 50 mm e anel de vedação à esquerda, cabeça de produção à direita

5.3.3 REVESTIMENTO E COLUNA DE PRODUÇÃO

O revestimento do poço é o local onde ocorre o acúmulo de fluido devido a diferença de pressão com o reservatório. O material é acrílico, conforme Figura 5.3-7, de cor transparente. Dentre os requisitos de projeto estão também os tempos para enchimento e esvaziamento da coluna de produção, um fator que depende diretamente da capacidade de bombeamento. O revestimento e a coluna de produção foram dimensionados de tal modo a respeitar tempos da ordem de minuto.

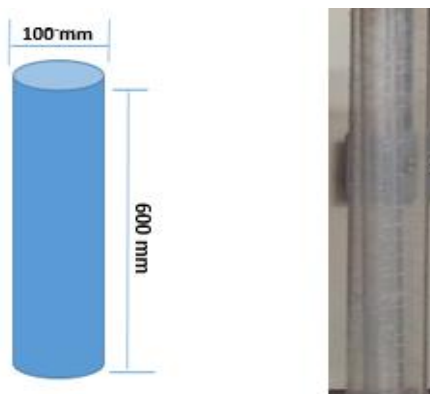


Figura 5.3-7. Revestimento do poço

Para tampar a parte inferior do poço foi utilizada uma tampa cega, conhecida como cap, de 100 mm com um anel de vedação, em seu centro foi realizado um furo

para a entrada de água no poço, e ao fora do centro foi feito um furo para coletar a pressão no poço. Na parte superior do poço foi utilizado um cap de 100 mm sem vedação e com um furo central de 50 mm, para colocar inserir a camisa de produção.



Figura 5.3-8. Fundo do poço à direita e Parte superior do poço à esquerda.

Na parte interna do poço encontra-se a coluna de produção. É na coluna de produção que o processo de bombeio ocorre. O material da coluna de produção também é acrílico, conforme Figura 5.3-9, de cor transparente, devido ao requisito de projeto, e possui as seguintes medidas;

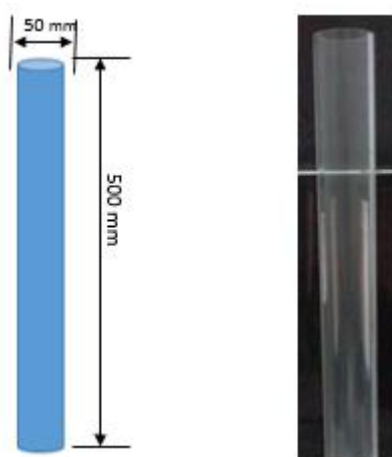


Figura 5.3-9. Coluna de produção

5.3.4 RESERVATÓRIO

Para simular o reservatório foi construído um tanque em vidro com forma retangular e dimensões de 40x25x25 cm. Dentro deste reservatório há uma bomba

DC, com alimentação de 0 à 12 volts como ilustrado na Figura 5.3-10. Esta bomba DC envia o fluido contido no reservatório para o anular do poço através de uma tubulação que se encontra abaixo da unidade de bombeio conforme a Figura 5.3-11.

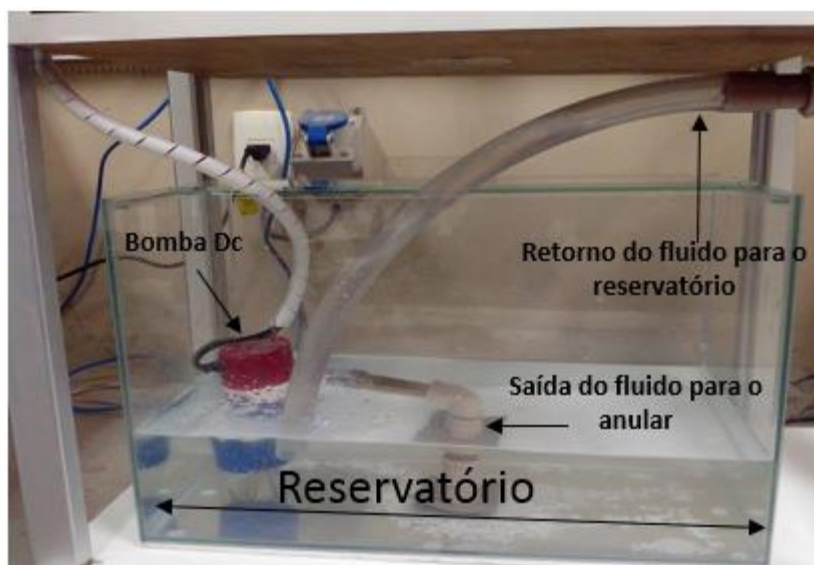


Figura 5.3-10. Reservatório.



Figura 5.3-11. Tubulação na parte inferior da Base.

5.3.5 BOMBA DE FUNDO

A bomba de fundo é composta por partes onde as principais são o pistão, a válvula de passeio e a válvula de pé. O pistão é a parte que está conectada à coluna de hastes. O espaço interno do pistão é chamada de câmara do pistão, é nesse espaço que o fluido será elevado a superfície por meio da coluna de produção.

A construção da válvula de passeio deu-se juntamente com a construção do pistão. Para a confecção foi utilizada um cap de 40mm lixado até que sua superfície

externa deslizesse na parte interna do tubo de acrílico. Neste cap foram feitos vários furos para possibilitar a passagem de água no movimento descendente do pistão, e um furo central para fixá-la na haste. Acoplado ao cap foi utilizada uma redução de 40 para 20 mm na qual foi colocada uma esfera de mouse. O pistão e a válvula de passeio estão ilustrados na Figura 5.3-12.



Figura 5.3-12. Materiais utilizados para a produção da válvula de pé à esquerda, pistão e válvula de passeios mantados à direita

Quanto à válvula de pé, esta encontra-se instalada na parte inferior da bomba e fixada na coluna de produção. Para sua construção foi utilizado um cap de 50mm com um furo central, onde foi colocada uma redução de 40 para 20 mm, dentro da redução foi colocada uma bola de mouse, para limitar o movimento da bola foi colada uma tela na extremidade da redução. Estes materiais podem ser visualizados na Figura 5.3-13.

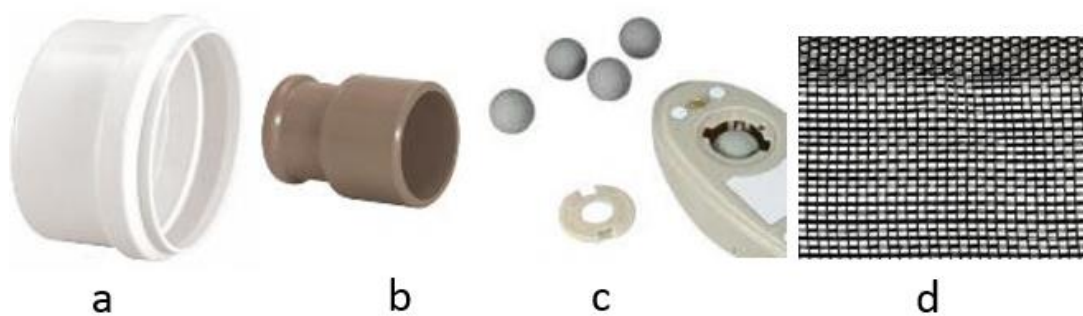


Figura 5.3-13. Materiais utilizados para a produção da válvula de pé (a - CAP; b - Redução; c - Bola de mouse; d - Tela de estufa).

A válvula de pé montado poder visualizado na Figura 5.3-14.



Figura 5.3-14. Válvula de pé montada

5.4 INSTRUMENTAÇÃO DA PLANTA (SENSORES E ATUADORES)

5.4.1 SENSORES

Para a instrumentação do protótipo foram utilizados os sensores de pressão, carga, posição e rotação. Na Figura 5.4-1, é ilustrado de forma esquemática todos os sensores utilizados no protótipo.

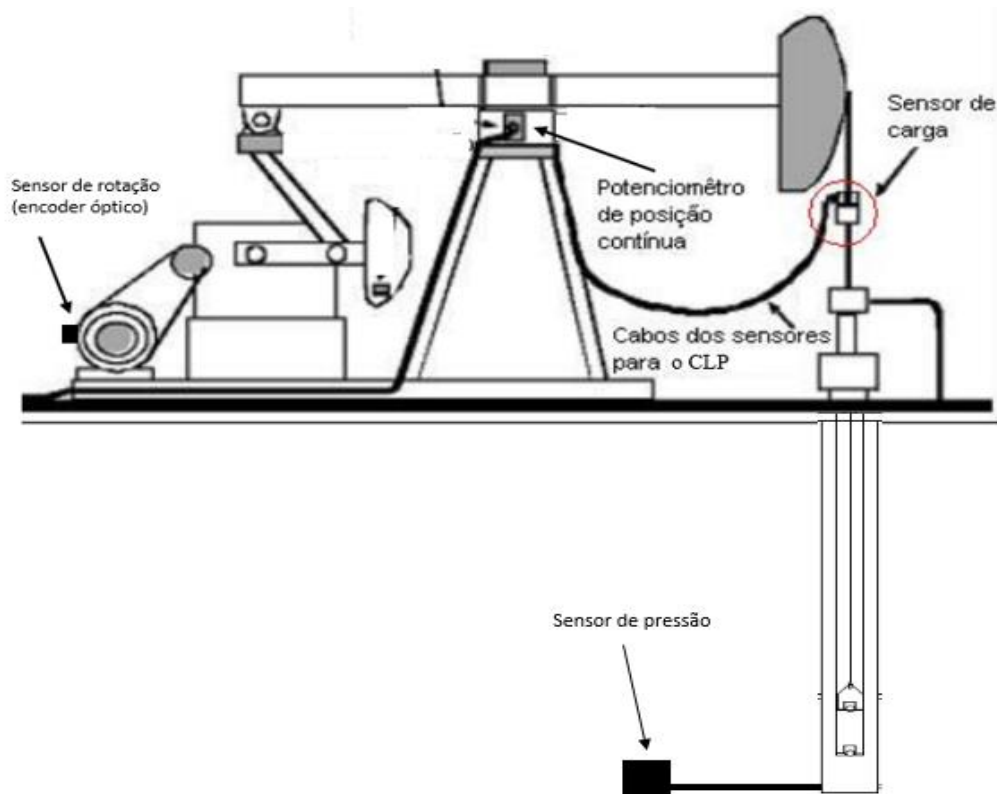


Figura 5.4-1. Instrumentação do protótipo.

5.4.1.1 SENSOR DE PRESSÃO

O sensor de pressão é utilizado para a determinação de uma grandeza direta e outra indireta. Uma é a pressão de fundo, a outra, é a altura do nível de líquido no anular respectivamente. A primeira serve para o monitoramento do índice de produtividade do poço (*IP*) e a segunda é para medir a variável do processo, neste caso o nível no anular do poço. Para tal, o modelo selecionado foi o MPX5010 da *Freescalor Semiconductor* (Figura 5.4-5). Este modelo é baseado em transdutor piezo resistivo e projetado para diversas aplicações e principalmente aquelas que utilizam conversores analógicos digitais e sistemas micro processados. O sensor MPX5010 fornece um sinal analógico de tensão proporcional (de 0 a 5V) à pressão aplicada.

A curva característica do sensor que relaciona pressão com tensão, de acordo com seu *Datasheet*, pode ser observada na Figura 5.4-3. No entanto, para relacionar a tensão de saída do sensor com o nível do anular do poço foi necessário realizar um experimento. Contudo, antes da realização do experimento foi utilizado diretamente na saída do sensor um filtro analógico com intuito de melhorar a relação sinal ruído,

como sugerido pelo *Datasheet* do mesmo. Isto tornou a relação sinal/ruído do sensor de nível do PBM adequada a aplicação.

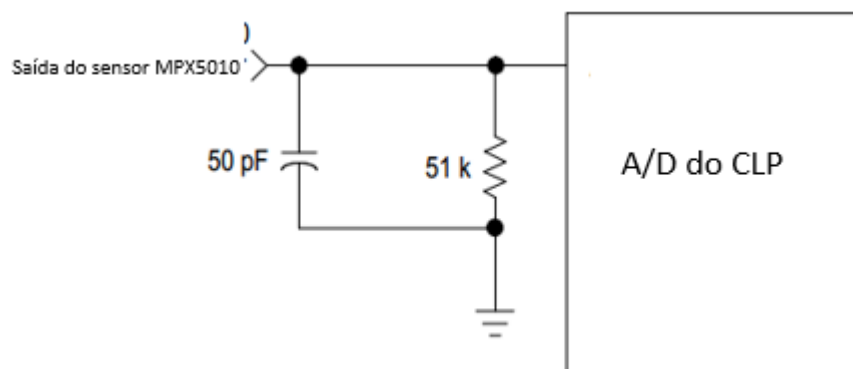


Figura 5.4-2. Filtro analógico do sensor de pressão

Neste experimento variou-se o nível no anular do poço e medida a respectiva saída em tensão do sensor. Os dados desse experimento podem ser observados na Tabela 5-1. De posse destes dados, e visto que se trata de uma reta como observado na Figura 5.4-4 foi utilizado o método de regressão linear a fim encontrar um modelo para este comportamento do sensor. O modelo encontrado foi;

$$V_{out} = 0,044N + 0.264822 \quad (5-1)$$

onde V_{out} é a tensão de saída do sensor e N o nível no anular do poço

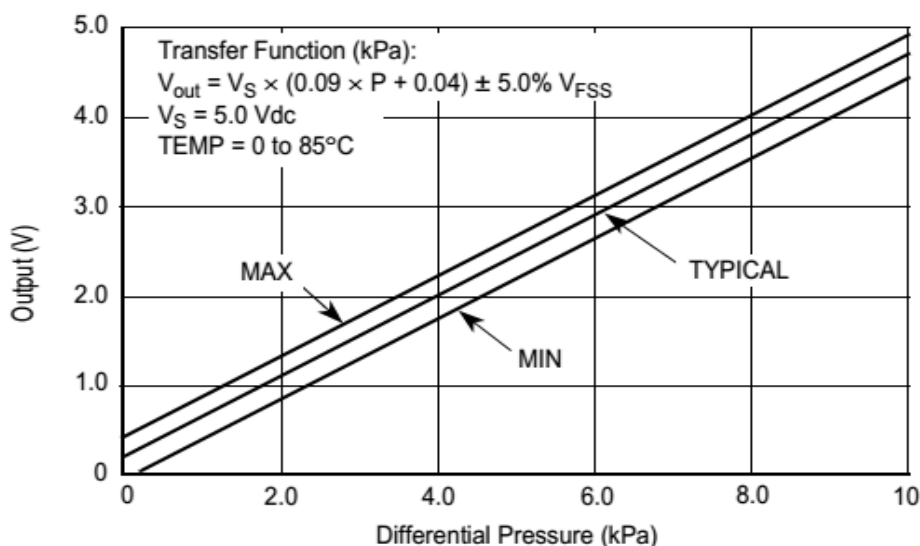


Figura 5.4-3. Curva Tensão de Saída x Pressão Diferencial

Altura do nível no anular do poço (cm)	Tensão (volts)
0	0,315
4,5	0,453
8,1	0,611
12,2	0,791
16,5	0,973
20,9	1,175
23,15	1,281
29,8	1,579
32,2	1,690
37,1	1,898
42,1	2,121
45,05	2,246

Tabela 5-1. Relação entre nível e tensão

Mais detalhes sobre sensor pode ser encontrada em seu *Datasheet* em (Motorola, Inc. 1997, 2015).

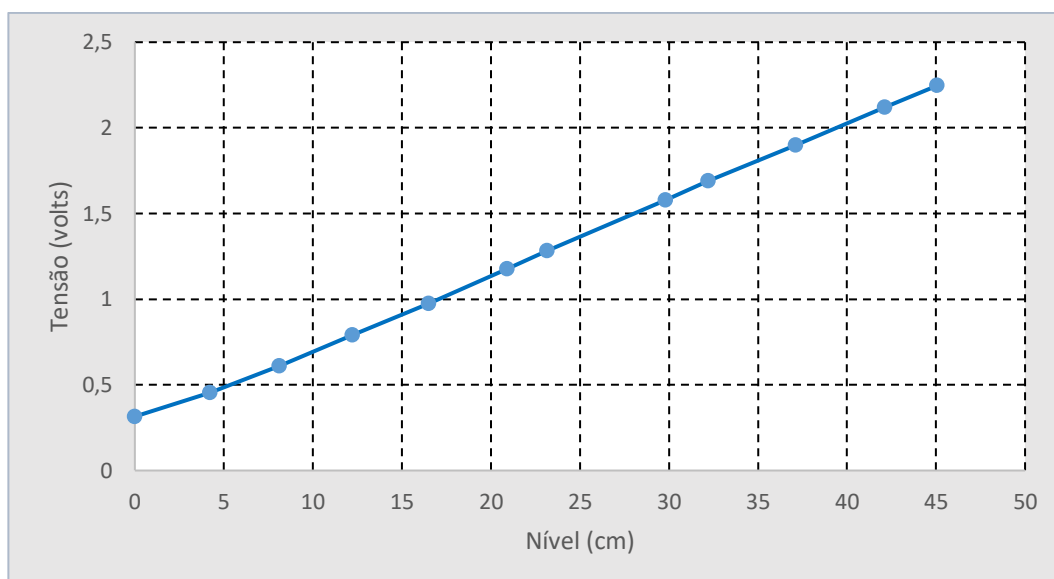


Figura 5.4-4. Curva Tensão de Saída x Nível do poço

O sensor de pressão foi preso na parte inferior da base como também pode ser observado na Figura 5.4-5.



Figura 5.4-5. Sensor de Pressão MXP5010 e sua montagem no sistema

5.4.1.2 SENSOR DE CARGA

O sensor de carga é necessário para a construção da carta dinamométrica. A carga estimada para o sistema foi entre dois e três quilogramas, o que foi um fator limitante no projeto. Pois para esta faixa de carga não foi encontrado um elemento sensor que atenda a esta especificação a custos acessíveis.

Para superar está dificuldade foram empregadas técnicas de engenharia reversa. Após pesquisa, foi descoberto que pequenas balanças digitais de precisão, comumente encontradas em cozinhas (Figura 5.4-6), se utilizam de células de carga. Elas trabalham com pesos limites de 5 ou 7 quilogramas com resolução de 1 grama.



Figura 5.4-6. Balança Digital (lado esquerdo); Strain Gauge da balança (lado direito)

O elemento sensor contido na balança é uma barra metálica com dois strain gauges de 750Ω . A placa eletrônica, da balança, onde é feito o condicionamento de sinal é do tipo caixa preta, ou seja, não é possível fazer a leitura do sinal condicionado. Desse modo, foi desenvolvido um circuito condicionador de sinais específico para este sensor. Este condicionamento de sinal foi feito através de uma ponte de wheatstone e um amplificador de instrumentação. O circuito projetado pode ser observado na Figura 5.4-7. Para a calibração do sensor foram utilizados pesos de referência com o objetivo de se obter a curva característica do sensor de carga, ver Figura 5.4-8

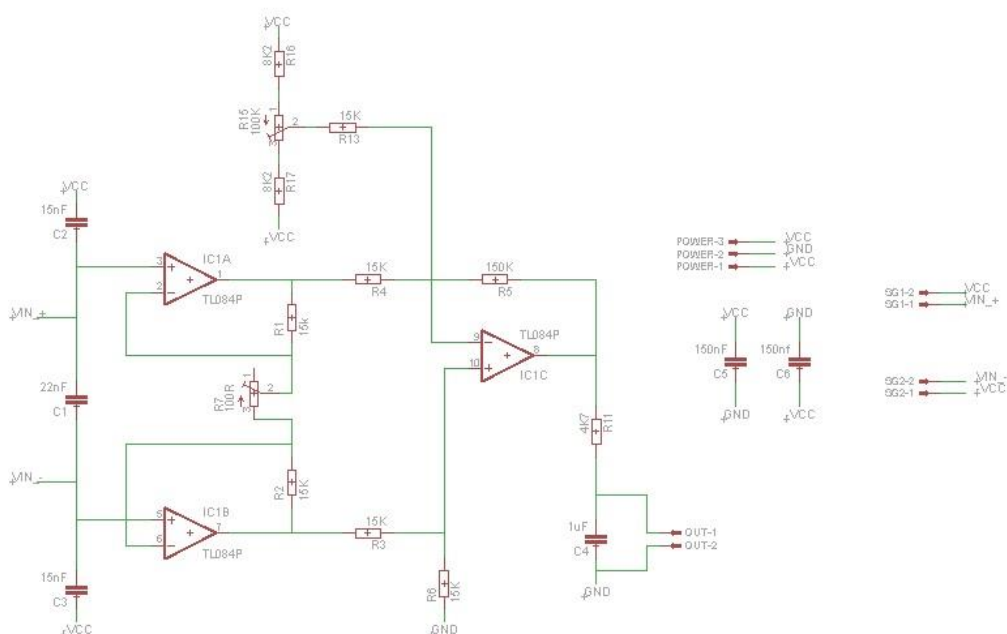


Figura 5.4-7. Amplificador de Instrumentação e Ponte de Wheatstone

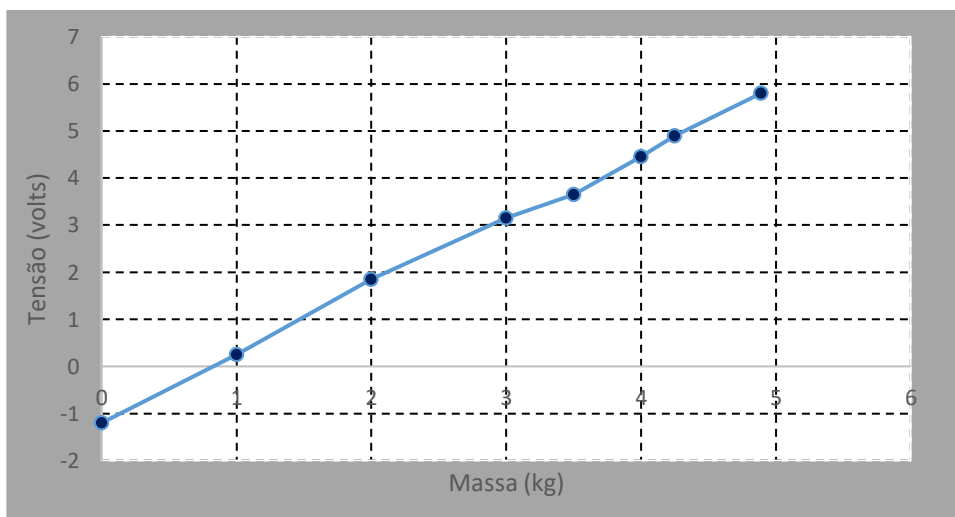


Figura 5.4-8. Resposta em tensão dada pela célula de carga para determinados pesos

O sensor de carga depois de devidamente calibrado, foi instalado no protótipo e pode ser visto na Figura 5.4-9.

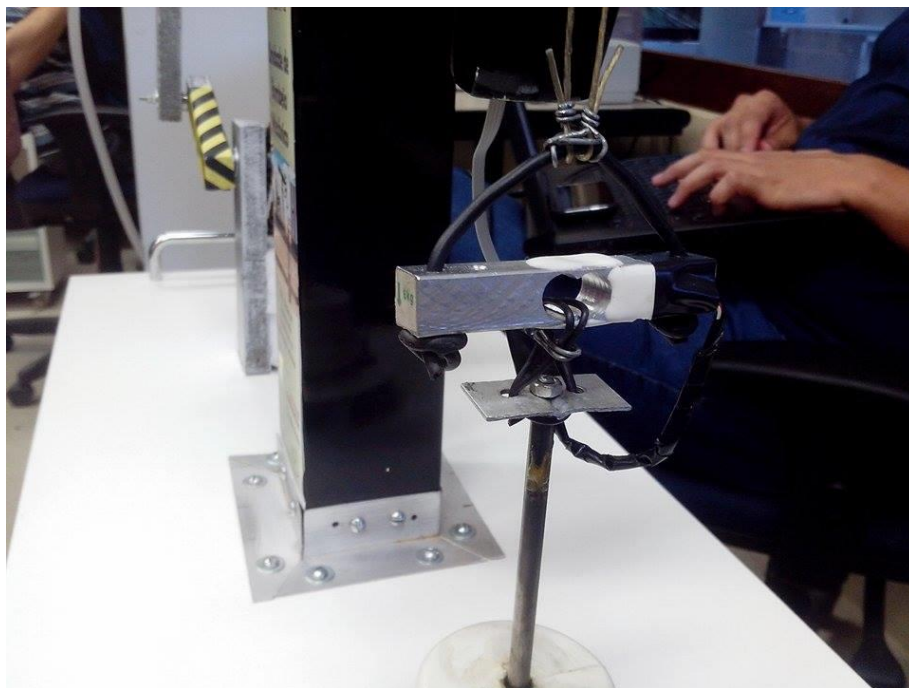


Figura 5.4-9. Sensor de Carga Instalado

5.4.1.3 SENSOR DE POSIÇÃO

Para a construção da carta dinamométrica um sensor de posição também foi projetado. Este sensor mede o deslocamento vertical do pistão. Esta medição é realizada indiretamente por um potenciômetro. A variação de tensão provocada pela variação da resistência neste potenciômetro será proporcional ao deslocamento angular de seu eixo que por sua vez será proporcional ao deslocamento vertical do pistão. O modelo do potenciômetro selecionado foi SV01A103AEA01B00 da empresa Murata, ver Figura 5.4-10.

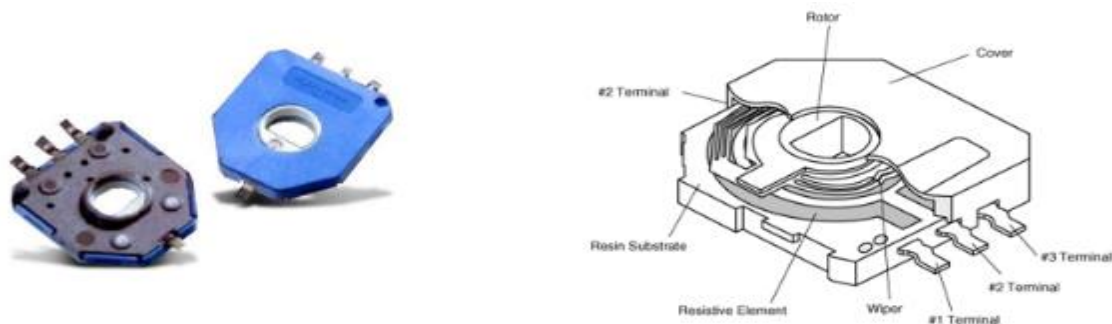


Figura 5.4-10. Potenciômetro Murata

Sabe-se que o potenciômetro não é a solução ideal para essa aplicação pois, devido a movimentação constante do sistema ocasionará desgastes na resistência de grafite dele. Para o problema proposto a melhor solução seria um sensor com princípios óticos ou magnéticos. Contudo, por uma questão de custo e porque o sistema não funcionará por longos períodos de tempo, por se tratar de um protótipo, optou-se por esta solução. O sensor instalado pode ser visualizado em Figura 5.4-11.

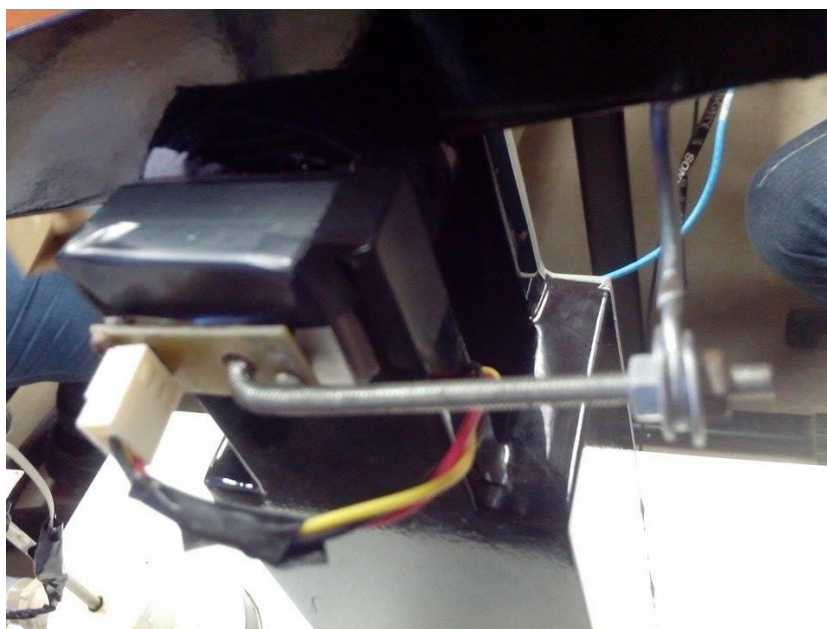


Figura 5.4-11. Potenciômetro no sistema

5.4.1.4 SENSOR DE ROTAÇÃO

Este sensor é utilizado para medir a rotação do motor, e com isso, verificar a quantidade de ciclos de bombeio por minuto do sistema de elevação. O novo modelo selecionado para o projeto foi o OPB626 da empresa *OPTEK TECHNOLOGY*, visto na Figura 5.4-12.



Figura 5.4-12. Sensor OPB626

Para a construção do tacômetro além do sensor OPB626 também foi necessário construir um disco com furos para ser anexado ao eixo do motor e de forma que estes furos passem pelo elemento óptico sensor quando o rotor girar. Quando o motor girar e os furos passarem por sensor, deixara passar a luz emitida pelo fotodiodo emissor e será captada por outro fotodiodo receptor, que fornecerá um sinal a um amplificador e juntamente com circuito Schmitt Trigger. Esse princípio de funcionamento pode ser visualizado na Figura 5.4-13. Este último acionará um transistor que gerará um pulso elétrico que poderá ser capturado por um sistema de aquisição de dados que no caso será o CLP. Com a frequência que estes pulsos se apresentam poderá ser calculada a rotação do motor.

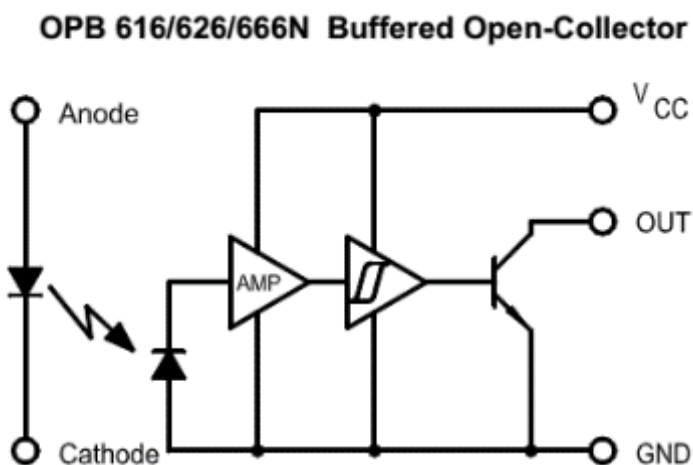


Figura 5.4-13. Princípio de Funcionamento do Sensor

5.4.2 ATUADORES

O motor DC é o responsável pela movimentação da unidade de bombeio e foi utilizada como sendo a variável manipulada do sistema. No desenvolvimento do projeto foram realizados cálculos mecânicos que mostraram que seria necessário um motor com um torque de em torno 5Kgf*cm e com a alimentação DC de 12V. Estes foram os parâmetros básicos para busca de um motor que atendesse o projeto.

Nos diversos motores localizados, o que melhor se adequou foi o modelo AK555/11.1PF12R83CE-SG (Figura 5.4-14) da empresa Akiyama. Sua escolha se deu por atender as especificações anteriores e por apresentar uma caixa de redução de 1 para 72 que fornece uma rotação de até 83 rpm, o que eliminará o projeto de uma redução mecânica. A especificação do projeto estabeleceu que o sistema trabalharia no máximo a 30 ciclos por minuto, o que com este motor pode ser obtido através de um controle por PWM. Suas características básica podem ser observadas na Tabela 5-2 e Tabela 5-3.



Figura 5.4-14. Motor AK555/11.1PF12R83CE-SG

Tensão		Sem carga	
Operação	Nominal	Rotação	Corrente
6 V ~ 24 V	12 V	83 rpm	430 mA

Tabela 5-2. Tensão vs rotação

Máximo rendimento				Partida	
Rotação	Corrente	Torque	Potência	Corrente	Torque
65,4 rpm	1.6 A	11.1 Kgf.cm	5 W	6 A	53 Kgf.cm

Tabela 5-3. Máximo rendimento

5.5 SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÃO DO PBM

O sistema de automação do PBM é constituído pela instrumentação, sensores e atuadores já discutidos na secção anterior, de controlador lógico programável, CLP, um sistema supervisório baseado em computador e controle. O CLP é um *CompactLogix 1769* da *Rockwell Automation*. Essa linha de controladores é constituído de módulos de comunicação (OPC, RS232, EtherNet/IP) e de entrada e saída digitais e analógicos. No caso específico do presente trabalho foi utilizado um controlador 1769-I32E, um módulo de comunicação Ethernet/IP para a comunicação OPC com o computador. Dois módulos digitais; um de entrada e outro de saída e mais um módulo analógico de entrada e saída de 16 bits. A Figura 5.5-1 mostra todos esses módulos utilizados no projeto e suas respectivas nomenclaturas.

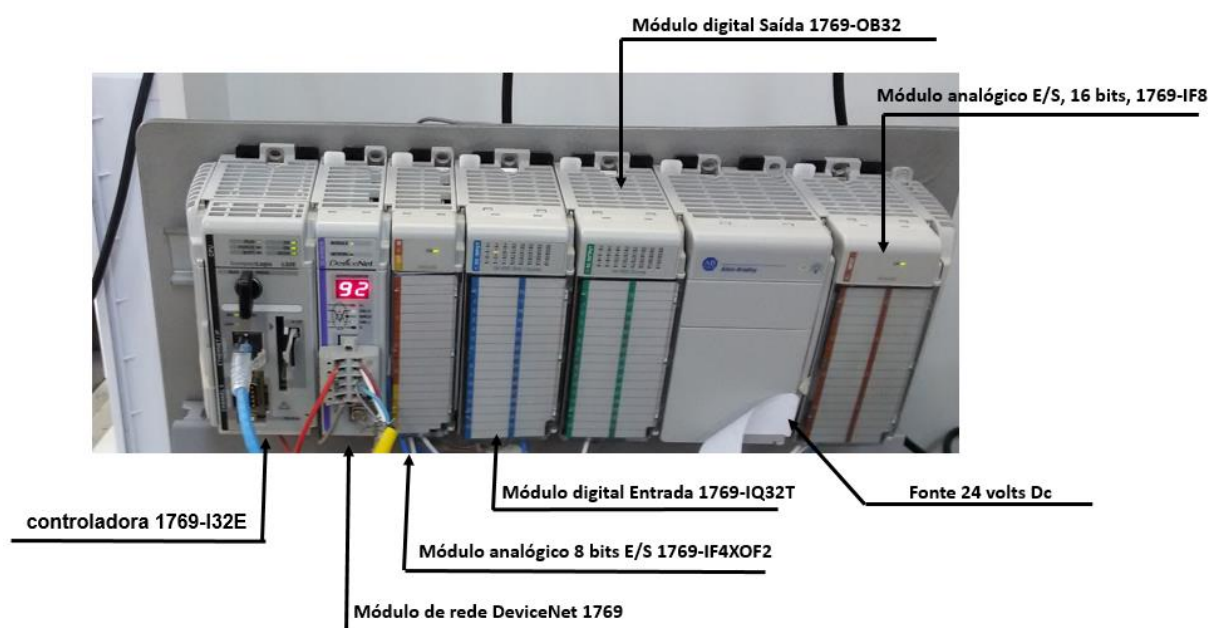


Figura 5.5-1. CLP utilizado no controle do PBM

A programação deste CLP é feita através do pacote de software, também da Rockwell Automation, *RsLogix 5000*. Esta ferramenta de software possui em seu pacote a possibilidade de se programar em linguagens; *Ladder*, texto estruturado e diagrama de blocos, o que facilita no desenvolvimento de projeto.

5.5.1 SISTEMA SUPERVISÓRIO DO PBM

Para o desenvolvimento do sistema supervisório foi utilizado o pacote de software *Factory Talk View Site Edition (SE)* da *Rockwell Automation*. Este software permite, ao mesmo tempo que agiliza, o processo de construção de um sistema supervisório IHM baseado em computador, pois, este software, possui uma ampla biblioteca de funções e sinóticos próprios de sistemas supervisórios.

Os requisitos para a elaboração da IHM foram definidos antes do desenvolvimento do projeto e discutidos na secção 5.1.2.1. A IHM projetada é constituída de uma janela principal (Figura 5.5-2) e de mais quatro secundarias. A tela principal tem um iconográfico que simula o sistema de superfície do bombeio mecânico, nível do fluido no anular do poço e gráficos das variáveis do processo como mostrado na Figura 5.5-2.



Figura 5.5-2. Tela principal da IHM.

Há também um espaço onde o usuário pode entrar com o valor do nível do líquido no anular do poço desejado, botões para partir ou parar o sistema e mais quatro botões com os quais se pode acionar as quatro janelas secundárias. Estas janelas são:

- Variáveis do Processo. Nesta tela as variáveis do processo são apresentadas em tempo real, de forma iconográfica e graficamente como mostrado na Figura 5.3-3. Também nessa mesma janela o usuário poderá informar os parâmetros do controlador (KP, KI e KD) e o *setpoint* (SP) da unidade. Isto caso o PBM esteja sendo controlado pelo controlador PID, e não pelo controlador proposto no presente trabalho.

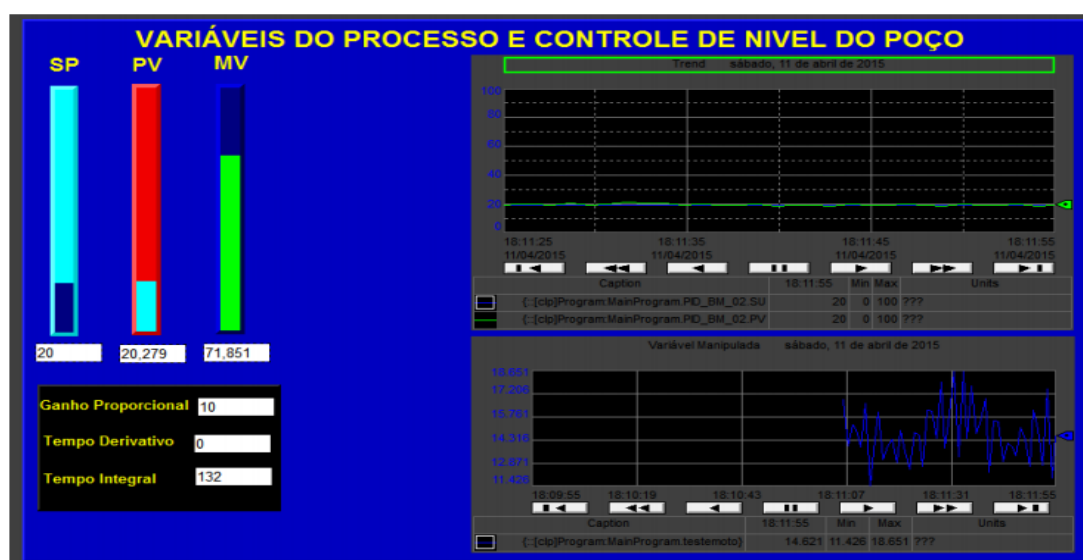


Figura 5.5-3. Tela das variáveis do processo

- Tela de rotina de testes. Esta tela ilustrada na Figura 5.5-4 foi um requisito do projeto. Ela serve para avaliar o tempo de resposta da malha de controle. Nesta tela há dois espaços para o usuário digitar dois *setpoints* denominados como pontos “A” e “B” e um botão para o usuário iniciar os testes. Após clicar-se no botão “inicia teste”, a saída do sistema deverá sair do ponto em que se encontra ir para o ponto “A” permanecer por 10 segundos e ir para o ponto “B” permanecer ai por 30 segundos e retornar para o ponto “A” e ai permanecer. Ainda nesta janela há outro botão que ao ser clicado gera um arquivo com os dados do teste, além de um gráfico

que mostra a variável do processo e o *setpoint* sobrepostos e com cores diferentes.

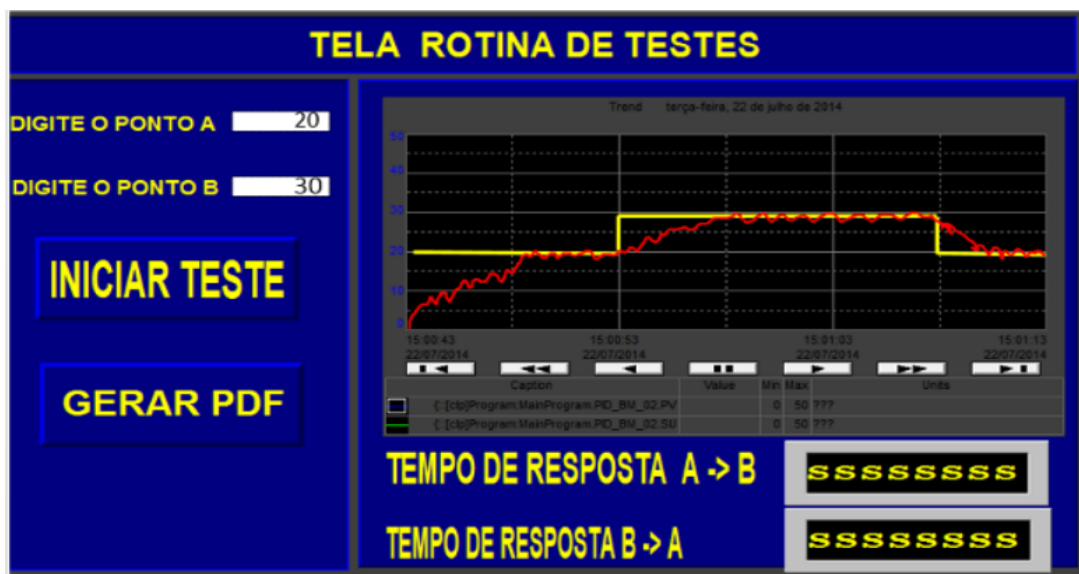


Figura 5.5-4. Tela de rotina de testes.

- Histórico da produção e velocidade de bombeio. Nesta janela ilustrada pela Figura 5.5-5 exibe a produção acumulada em litros/minuto e a velocidade de bombeio, CPM, graficamente em tempo real.

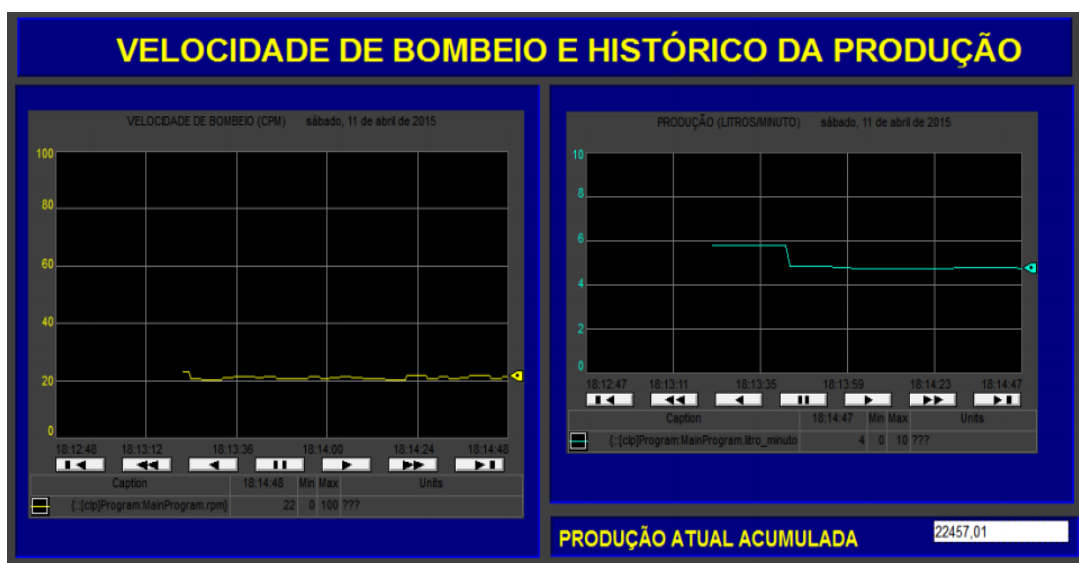


Figura 5.5-5. Tela de histórico de produção e CPM

Quanto a plotagem das cartas dinâmométricas, durante o período de testes, as cartas que estavam sendo apresentadas pela unidade não correspondiam ao que era esperado, o motivo para essa divergência ainda não foi encontrado. No entanto

suspeita-se de que por motivos de imperfeições no cilindro que representa a camisa de produção esteja gerando um elevado atrito entre o pistão e a camisa, provocando assim essa divergência.

6 APLICAÇÃO DE CONTROLE PREDITIVO NO PBM

6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse capítulo é apresentar o processo de modelagem do protótipo via técnicas de identificação de sistemas, como também, a aplicação do controlador preditivo generalizado no protótipo do sistema de bombeio mecânico. Também serão apresentados resultados simulados e resultados experimentais.

6.2 MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Como tratado na seção 2.4.1, as etapas fundamentais em um processo de identificação de sistemas são os testes dinâmicos e coleta de dados, escolha de um conjunto de modelos, estimação de parâmetros e a validação do modelo. Na etapa de testes dinâmicos e coleta de dados se faz necessário um planejamento experimental para se obter dados que sejam representativos do sistema. Conforme (CAJUEIRO, 2012), este planejamento pode ser sumariamente ilustrado na Figura 6.2-1.

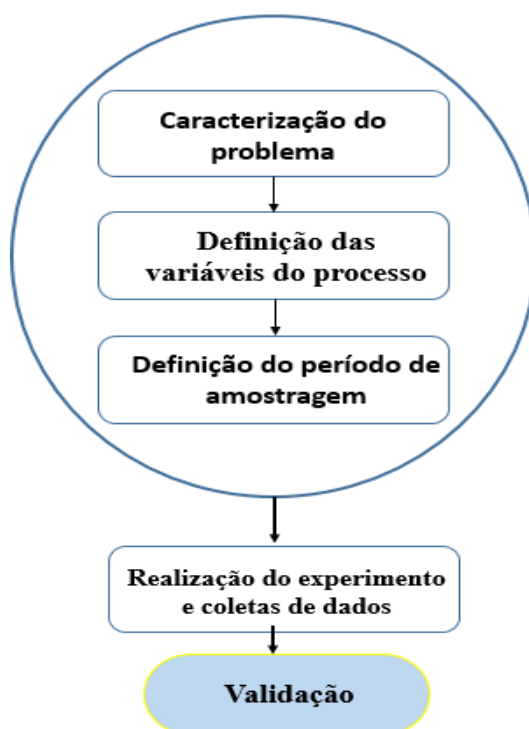


Figura 6.2-1. Etapas do planejamento experimental.

O projeto de experimento está contido em identificação de sistemas na secção 2.4.1, discutido no Capítulo 2. O presente capítulo trata a parte experimental, tratando o tema no contexto de desenvolvimento e modelagem do PBM.

6.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Coletar dados do PBM com o objetivo de criar um modelo adequado para predições n-passos à frente por meio de técnicas de identificação de sistemas lineares.

6.2.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO

De acordo com (TORRES, 2012), (ORDOÑEZ, 2008), em uma unidade de bombeio mecânico real, o desempenho da produção está diretamente relacionado ao nível de fluido do anular, ou seja, quanto menor a pressão de fundo, menor é a contrapressão sobre a zona produtora, o que por consequência, aumenta a capacidade de produção do reservatório. Tal afirmação também pode ser aplicada ao PBM. Para simular um índice de produção constante do reservatório do PBM foram realizados diversos testes a fim de se obter uma tensão constante para a bomba DC que envia o fluido do reservatório para o anular do PBM. Essa tensão foi de 5 volts, isto é, com a bomba DC ligada com 5 volts constante, foi encontrado o nível de equilíbrio no anular do poço de 45 cm. É nesse nível que a contra pressão exercida pela coluna de líquido no anular do poço se iguala com a pressão do reservatório (capacidade da bomba que simula a entrada de fluido do reservatório para o anular). Em outras palavras, a vazão do fluido do reservatório é igual a zero.

Assim como em uma unidade de bombeio real, a região de operação que possui um maior desempenho produtivo é aquela em que o nível do anular esteja o mais próximo possível do ponto de sucção da bomba de fundo. De posse dessas informações, pode-se observar que uma variável adequada para ser controlada é o nível do anular do poço, como já estava definido no projeto.

Uma escolha adequada para a variável manipulada é o número de Ciclos de bombeamento por minuto, CPM. No entanto a velocidade de CPM está diretamente

relacionada com a tensão aplicada ao motor DC. Então, foi aplicado diversos valores de tensão na entrada do motor e medido o CPM respectivo como o objetivo de se ter uma relação entre a tensão no motor e o CPM. Outro motivo para se ter encontrado essa relação foi o de se ter conhecimento do CPM mínimo e máximo do presente protótipo. Tanto a Tabela 6-1 quanto a Figura 6.2-2 mostram os dados do experimento, e nota-se que para uma tensão inferior a 1,75 volts, o CPM é igual a zero. E para uma tensão 6,5 volts, o bombeamento supera os trinta ciclos por minuto. Dessa forma, foi definido como sendo o CPM mínimo igual a 5 e o máximo igual 30, este último por restrições mecânicas do PBM.

Tensão aplicada ao motor	Ciclo de bombeio por minuto
1,5	0
1,65	0
1,75	4,94
2,0	5,9
3,0	10,5
3,5	13,5
4,0	16,3
4,5	19,6
5,0	22,9
6,0	28,5
6,5	31,3

Tabela 6-1. Relação em tensão e CPM

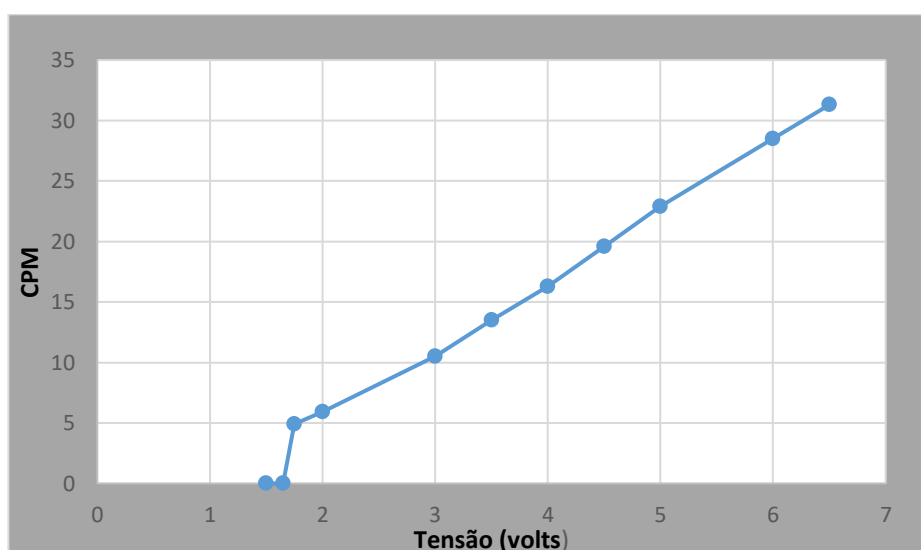


Figura 6.2-2. Relação em tensão e CPM

A função de primeiro grau que relaciona a tensão no motor com o CPM está descrita na Eq. (6-1).

$$CPM(k) = 6.03V(k) - 7.656 \quad (6-1)$$

Onde $CPM(k)$ é o ciclo de bombeio no instante k e $V(k)$ é a tensão no motor no instante k .

6.2.3 DEFINIÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO

Definidas as variáveis do processo, a próxima fase do projeto experimental é a definição do período de amostragem. Nesta etapa da identificação é comum utilizar o conceito de variável desvio ou, como normalmente é denominado, ponto de operação ou de referência (TORRES, 2012) (OGATA, 2011).

O ponto de operação escolhido foi o de 15 cm considerando a leitura do sensor de pressão de fundo do poço do PBM. Como se nota na Figura 6.2-3, o ponto de sucção da bomba de fundo está a 7 cm acima do sensor de pressão de fundo. Logo, abaixo desse ponto não há produção e sim pancada de fluido. Desse modo, o ponto de sucção da bomba de fundo, 7cm, foi considerado como sendo o zero na leitura do sensor de fundo. Portanto, o ponto de operação foi definido como sendo 8 cm, (15cm – 7cm). A Figura 6.2-3 é elucidativa quanto aos pontos acima mencionados.

A justificativa para a escolha desta faixa de operação deu-se porque, como já citado, o desempenho da produção está diretamente relacionado ao nível de fluido do anular.

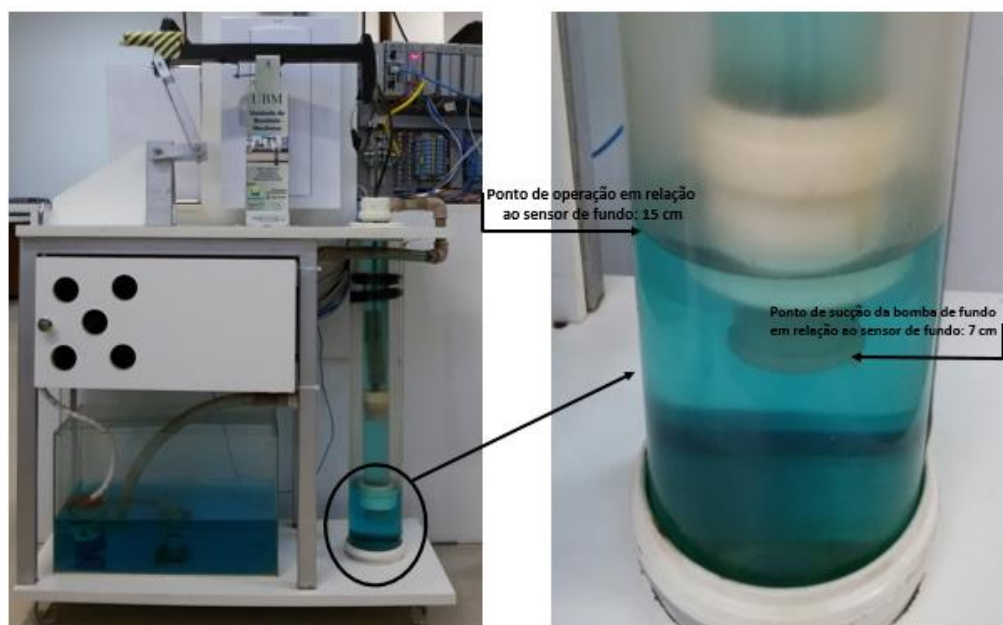


Figura 6.2-3. Ponto de operação.

6.2.4 DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE AMOSTRAGEM

A Figura 6.2-4 mostra a resposta do sistema a um degrau de 75% da tensão máxima de entrada, o que é aproximadamente 22.5 CPM dos 30 que é o máximo suportado pelo PBM. Nesta mesma Figura 6.2-4, é possível observar de forma qualitativa um comportamento estável, no entanto oscilante, em malha aberta do sistema. Esta oscilação é um harmônico causado pelo movimento sucessivo da coluna de hastes na leitura do sensor de pressão de fundo.

Dependendo da região de operação o sistema possui dinâmicas diferentes. Isto é, na Figura 6.2-4 o sistema estabiliza aproximadamente a 8 cm acima do ponto de sucção da bomba de fundo ou 15 cm acima do sensor de fundo, com um tempo de resposta de aproximadamente 73,5s (tempo que corresponde ao valor de 98 % de $y(\infty)$ onde y é o nível do anular). Enquanto que a resposta em regime permanente que estabiliza acima desse nível ilustrado Figura 6.2-4, que é o caso mostrado na Figura 6.2-5, possui uma dinâmica muito mais lenta, com o tempo de resposta de 196 s. Isto se dá em virtude da dinâmica da bomba que a depender do ponto de operação possui dinâmicas diferentes.

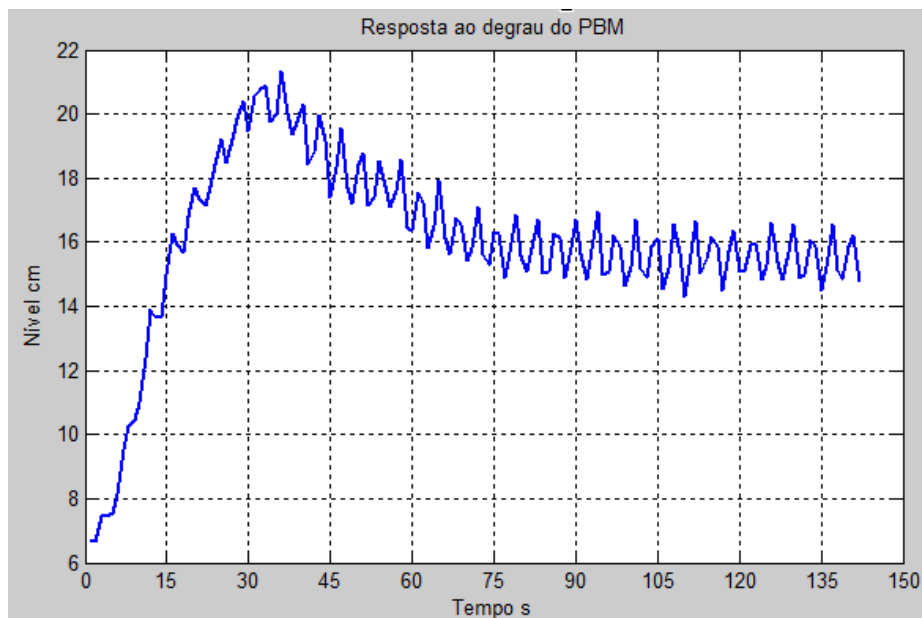


Figura 6.2-4. Resposta ao degrau do PBM

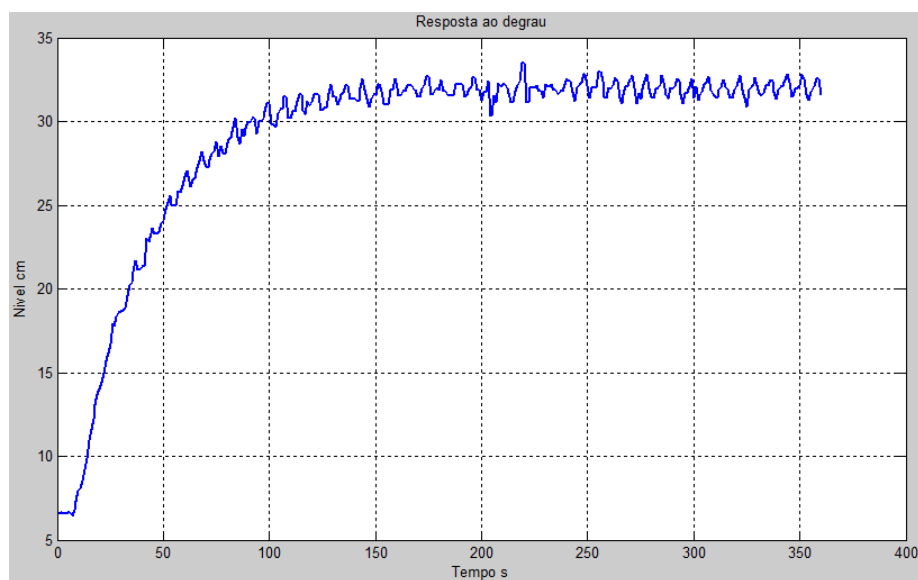


Figura 6.2-5. Resposta ao degrau do PBM

Para a escolha do tempo de amostragem foi utilizando o critério de variação do nível de em torno de 2% do seu valor final. De acordo com (TORRES, 2012) o tempo de amostragem pode ser calculado como sendo a trigésima parte do tempo de acomodação ou ainda conforme (AGUIRRE, 2007), pode ser aproximadamente entre cinco e dez vezes inferior a menor constante de tempo do sistema. O critério utilizado foi este último. Desse modo, o período de amostragem deve ser:

$$\frac{\tau}{10} \leq P \leq \frac{\tau}{5} \quad (6-2)$$

Onde P é o período de amostragem e τ a constante de tempo do sistema.

Para encontrar a constante de tempo do sistema é necessário encontrar onde a resposta do sistema é supostamente 0,632 do seu estado estacionário. Conforme Figura 6.2-6 Observa-se que:

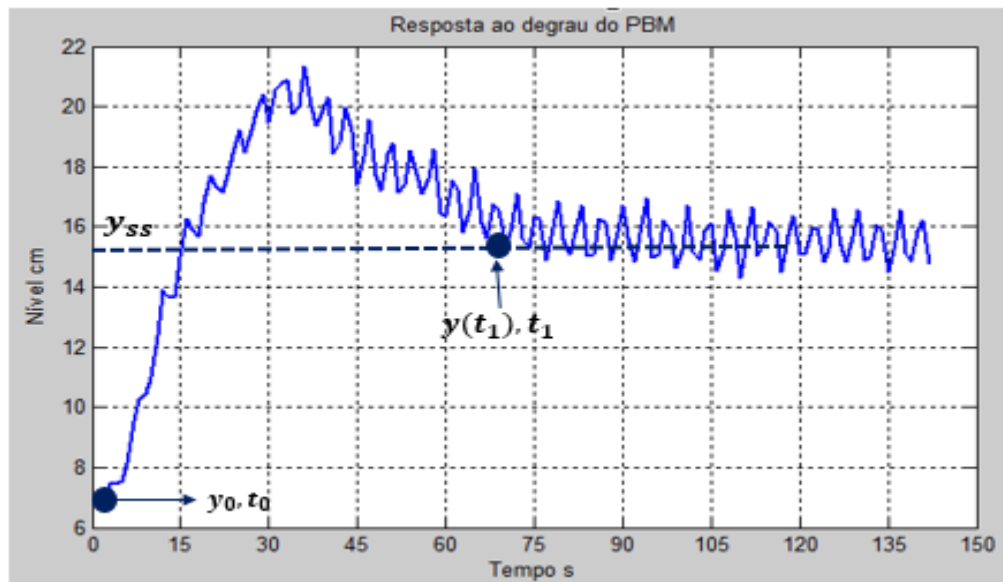


Figura 6.2-6. Gráfico da constante tempo

$$y(t_1) = 0,632 * y_{ss} + y_0 \quad (6-3)$$

Sendo que y_{ss} é a saída em estado estacionário e igual a 15. E y_0 é o valor inicial da saída e igual a 6,5. Ainda pela figura é possível notar que t_1 corresponde a $y(t_1)$, então observa-se que:

$$t_1 = t_0 + \tau \quad (6-4)$$

E

$$\tau = t_1 - t_0 \quad (6-5)$$

Então, a constante de tempo, τ , foi igual a 15 s. Substituindo a constante de tempo na Eq.(6-2), o período de amostragem P foi igual 1,5 segundos, sendo que utilizou-se o limite inferior da Eq.(6-2).

6.2.5 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E COLETA DE DADOS

Com o período de amostragem e a região de operação definidos, deve-se construir um sinal adequado para levantamento de dados para a modelagem do sistema. A qualidade do modelo estimado depende das características do sinal de entrada aplicado ao processo, (AGUIRRE, 2007). Então, o sinal de entrada deve revelar características da dinâmica do sistema na região de operação escolhida, proporcionando a identificação. Portanto, o sinal deve ser persistentemente excitante e rico em frequências de modo que possa excitar os modos internos do sistema possibilitando o conhecimento da dinâmica da planta, (TORRES, 2012), (AGUIRRE, 2007). Um tipo de sinal com essas características descritas e muito utilizado na área de identificação de sistemas é o *PRBS* do inglês *Pseudo-Random Binary Sequence*. Esse sinal possui amplitude bem definida com largura de pulso que varia aleatoriamente. A Figura 6.2-7 mostra graficamente o sinal PRBS aplicado na entrada do PBM e sua respectiva resposta.

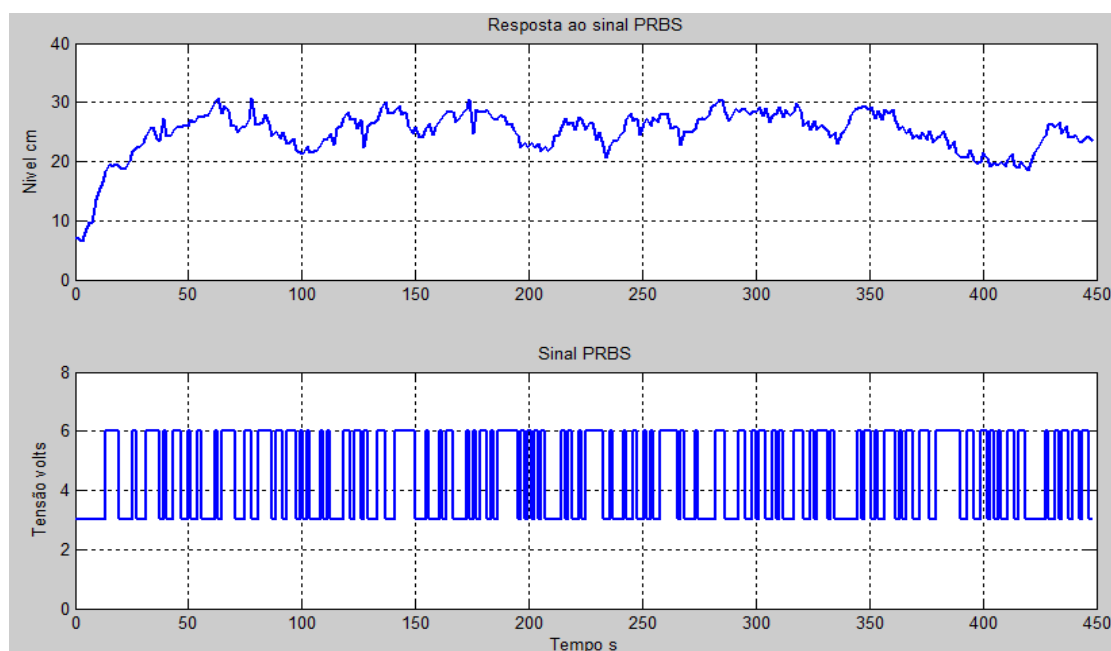


Figura 6.2-7. Resposta ao sinal PRBS

6.3 ESCOLHA DA ORDEM DO MODELO E ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

Com os dados obtidos a partir do sinal PRBS aplicado ao sistema, Figura 6.2-7, o próximo passo é estimar os parâmetros do modelo, ou modelos, candidatos. De acordo com (AGUIRRE, 2007), se a ordem definida para o modelo for muito inferior do que a ordem real do sistema, o modelo não possuirá complexidade estrutural para representar o sistema. Entretanto, se a ordem do modelo definido for muito superior a ordem real do sistema a estimação de parâmetros será, provavelmente mal condicionada, ocasionando cancelamento de polos e zeros na função de transferência do sistema.

No contexto de sistemas de bombeio mecânicos, trabalhos como (ORDOÑEZ, 2008), (TORRES & SCHNINTMAN, 2010), estudaram de forma fenomenológica o sistema. Nesses trabalhos nota-se que o SBM trata-se de um sistema de primeira ordem. Porém, no caso PBM, o sistema foi modelado como sendo de 2ª ordem devido as características da curva da resposta ao degrau, ver Figura 6.2-4, para a região de operação definida, demonstrando que há comportamentos que não são modelados por um sistema de primeira ordem.

Quanto a estrutura do modelo, o escolhido foi o paramétrico CARIMA já apresentado no capítulo dois. O motivo é que este é o modelo utilizado pelo controlador preditivo generalizado. Relembrando o modelo CARIMA que é dado pela seguinte Eq. (6-6).

$$\tilde{A}(q)y(k) = q^{-d}B(q)\Delta u(k) + C(q)e(k) \quad (6-6)$$

No entanto, o polinômio $C(q)$ da Eq. (6-6) que representa a média móvel do ruído foi considerado igual a um. Isto porque a relação sinal/ruído do sensor de nível do PBM não é significativa devido a um filtro analógico acoplado diretamente no sensor conforme explicado na SECÇÃO 5.4.1.1 Do capítulo 5. Essa boa relação sinal/ruído pode ser constatada visualmente, bastando apenas comparar a leitura do sensor de nível, oriunda do CLP, com o próprio nível do poço que é sinalizado por uma escala graduada no PBM. Então, o modelo resultante é o ARX, também apresentado Na secção 2.3.2 do capítulo 2. Recordando que o modelo ARX é dado pela seguinte equação;

$$A(q)y(k) = q^{-d}B(q)u(k) + e(k) \quad (6-7)$$

Com uma massa de dado de 300 amostras, conforme visualizado na Figura 6.2-7, e utilizando o algoritmo MQR discutido na secção 2.4.2.2 do capítulo 2, os parâmetros estimados (a_1 , a_2 e b_1 dos polinômios $A(q)$ e $B(q)$ do modelo ARX) foram:

- $a_1 = -0.7$
- $a_2 = -0.25$
- $b_1 = -0.35$

E substituindo os parâmetros encontrados nos polinômios $A(q)$ e $B(q)$ tem-se:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 - 0.7q^{-1} - 0.25q^{-2} \\ B(q) &= -0.35q^{-1} \end{aligned} \quad (6-8)$$

A seguir as Figura 6.3-1 e Figura 6.3-2 mostram graficamente a convergência dos parâmetros estimados.

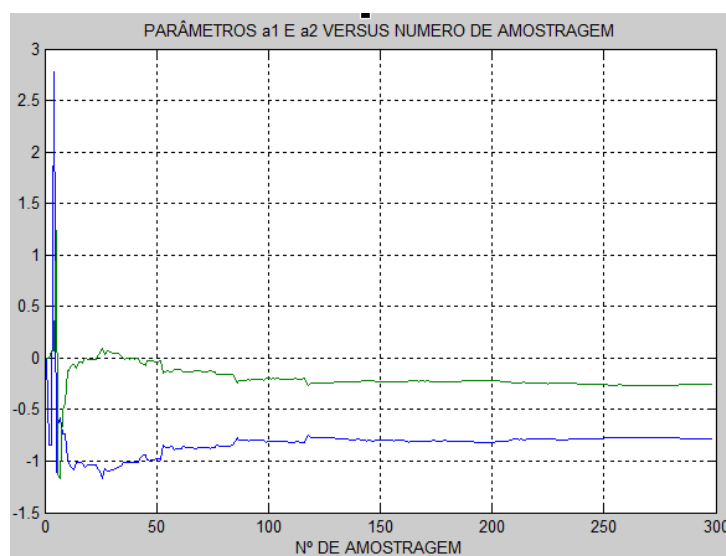


Figura 6.3-1. Parâmetros a_1 (linha azul) e a_2 (linha verde) estimados

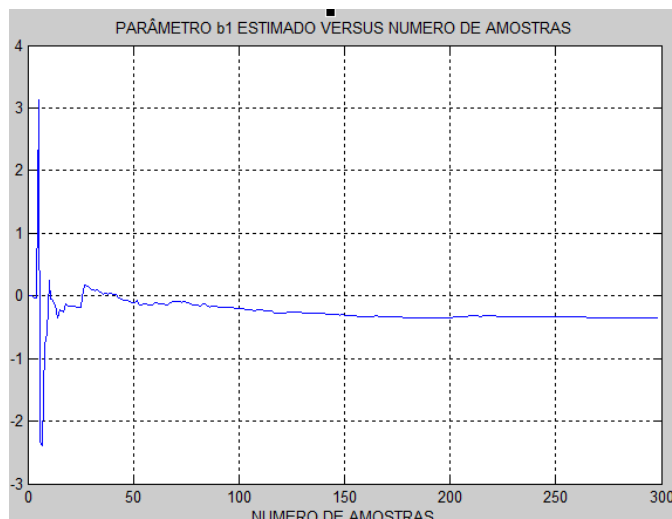


Figura 6.3-2. Parâmetro b1 estimado

De posse dos parâmetros estimados e substituindo-os no modelo ARX, obtém-se a Eq. (6-9)

$$(1 - 0.7q^{-1} - 0.25q^{-2})y(k) = -0.35q^{-1}u(k - 1) + e(k) \quad (6-9)$$

Em diagrama de blocos o modelo ARX estimado pode ser representado como mostrado na Figura 6.3-3.

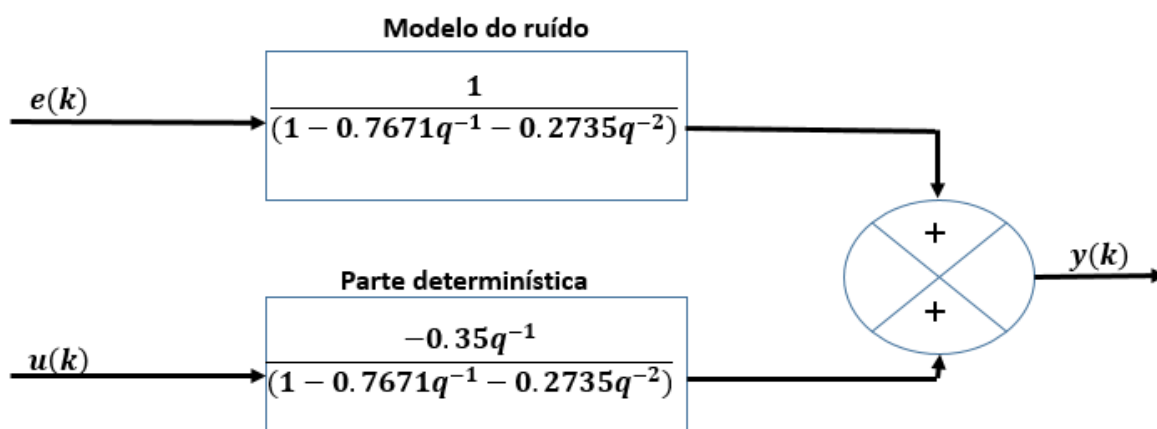


Figura 6.3-3. Diagrama de blocos do modelo ARX estimado

Considerando apenas a parcela determinística da Eq. (6-9), o modelo ARX pode ser escrito na forma de função de transferência na variável discreta z com o tempo de amostragem definido anteriormente, como

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{-0.35z^{-1}}{1-0.7z^{-1}-0.25z^{-2}} \quad (6-10)$$

6.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Após concluídas as diversas etapas que proporcionaram a identificação do sistema, chega-se finalmente a um modelo, ou a um conjunto de modelos candidatos do sistema. Porém, antes de utilizar o modelo encontrado é necessário verificar se o mesmo é válido para o que se propõe. De acordo com (AGUIRRE, 2007), é que na prática um modelo será válido na medida em que for realmente útil. Desse modo, uma maneira de verificar se um modelo é válido, ou não, é saber de antemão qual o uso pretendido para tal.

No contexto do presente trabalho, a função do modelo é representar de forma adequada o sistema dentro de um determinado horizonte de predição. Então, para a validação foi utilizado o *preditor de k passos à frente*. Essa forma de validação se torna adequada por ser intermediária entre a *simulação livre* ou *preditor de infinitos passos à frente*, como também é conhecido, e o *preditor de um passo à frente* que são casos extremos, (AGUIRRE, 2007). Dessa forma, foi utilizado para a validação o preditor de cinco passos à frente.

Para a validação do modelo encontrado é gerado um outro conjunto de dados descorrelacionados daqueles utilizados no processo de identificação. O sinal gerado é aplicado ao sistema PBM, bem como ao modelo. Ao final do processo a saída do modelo é comparada com a saída do PBM. Na Figura 6.4-1 é possível notar que o modelo ARX estimado representa bem o PBM, apesar de notar-se algumas diferenças entre as saídas. Vários fatores podem contribuir para essas diferenças como: dinâmicas não modeladas, incertezas e/ou porque o modelo ARX seja linear, isto é, uma aproximação do sistema real que pelos experimentos práticos se mostrou não linear. Estas pequenas diferenças, de certa forma, já eram esperadas, uma vez que nenhum modelo, por definição, representará de forma exata o sistema real, (AGUIRRE, 2007).

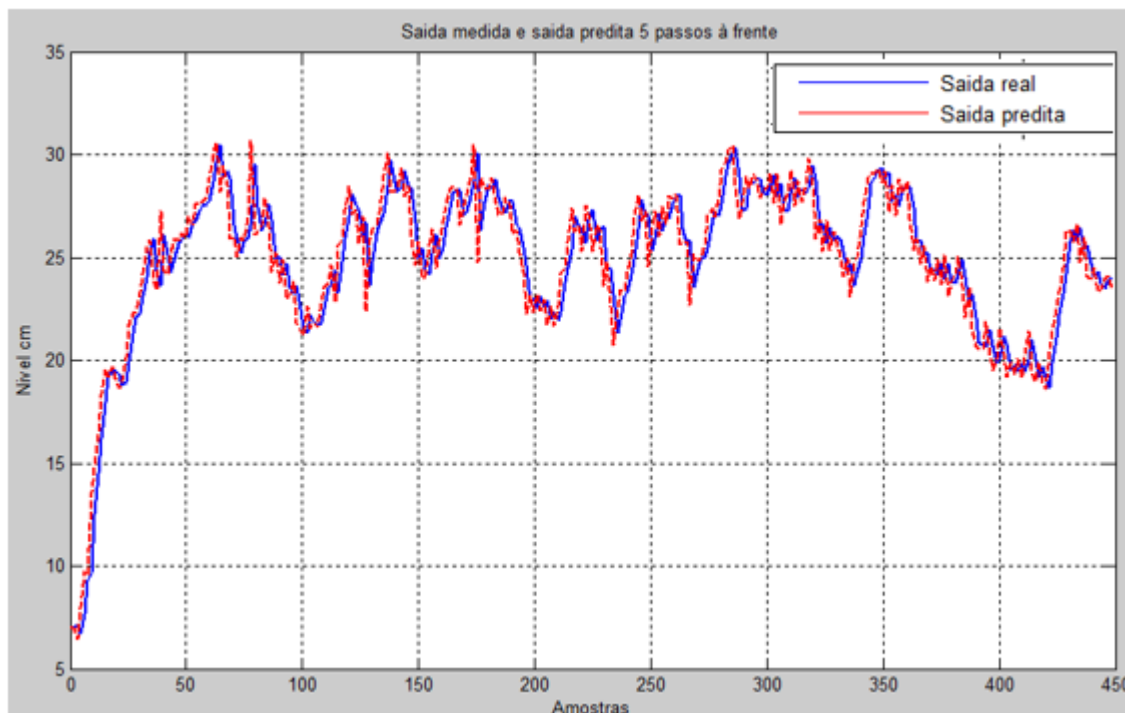


Figura 6.4-1. Validação do modelo

6.5 RESULTADOS SIMULADOS DO CONTROLADOR GPC

Na etapa de desenvolvimento do PBM foram definidos vários requisitos de projeto mostrados no capítulo cinco. Quanto aos requisitos de controle do PBM foram deixados para serem tratados no presente capítulo. Os requisitos referente ao projeto de controle foram precisão e robustez. Precisão e robustez são propriedades demonstradas pela capacidade de, mesmo quando sujeito a perturbações, atender ao set point definido. Uma vez alcançado o regime permanente, o erro do nível dinâmico medido em relação ao ponto de operação definido (set point) não deve ser maior do que 0,5mm. A velocidade de bombeamento não deve exceder a 30 CPM. Com relação ao tempo de resposta o requisito é que uma vez definido um ponto de operação (um nível dinâmico desejado), o sistema deve atuar de forma a alcançar este ponto de operação em no máximo 1 minuto.

No projeto do GPC sem restrições os parâmetros de sintonia são: N_1 , N_y , N_u , δ e λ da função custo representada pela Eq. (3-1) definidos no capítulo três. Tais parâmetros proporcionam uma flexibilidade de projeto para satisfazer as especificações do usuário (PEREIRA, 1997). O horizonte de predição mínimo, N_1 , é comumente escolhido como sendo igual a um, mas para processos com atraso de

transporte conhecido, esse parâmetro é escolhido como sendo igual ou maior a esse atraso.

O horizonte de controle N_u representa o número de incrementos de controle que o controlador está livre para minimizar a função custo dada pela Eq.(3-1). E quanto maior o valor de N_u maior será o número de graus de liberdade o controlador terá para agir no sistema, porém causando um maior esforço computacional. O horizonte de predição N_y é frequentemente selecionado como sendo maior do que o tempo de subida do processo (ROSSITER, 2003). Por fim, λ e δ , que são matrizes identidade cuja a diagonal é maior ou igual a zero. Normalmente δ é definido para ter sua diagonal constante e igual a 1. Enquanto que λ é utilizado como um parâmetro de ajuste de desempenho em malha fechada. A situação em que λ é selecionado para ser igual a zero, a variável manipulada pode se comportar de maneira brusca, pois o objetivo do controlador é somente fazer com que o erro seja o menor o mais rápido possível. Para o caso em que λ for grande, a variável manipulada se comporta mais suavemente e o erro é minimizado mais cautelosamente (WANG, 2009).

O código do algoritmo do GPC para a simulação foi escrito na linguagem de programação do Software *Matlab*. Com esse algoritmo foram realizados diversos testes com vários valores dos parâmetros de sintonia do GPC, com a finalidade de ilustrar o peso deles no desempenho do controlador e também para se ter uma noção dos resultados esperados na implementação. A Figura 6.5-1 mostra o desempenho do GPC sem restrições simulado para vários valores de parâmetros apresentados na Tabela 6-2.

Controlador	Ny	Nu	Lambda
GPC1	5	2	0.7
GPC2	10	5	0.7
GPC3	15	8	0.7
GPC4	20	10	0.7
GPC5	30	12	0.7

Tabela 6-2. Tabela de parâmetros de sintonia

Por meio da Figura 6.5-1 é possível notar um bom desempenho para o caso do controlador GPC sem restrições. Com exceção do GPC, (ver Tabela 6-2), que tem uma resposta um pouco mais lenta, as respostas dos outros controladores se sobrepõem.

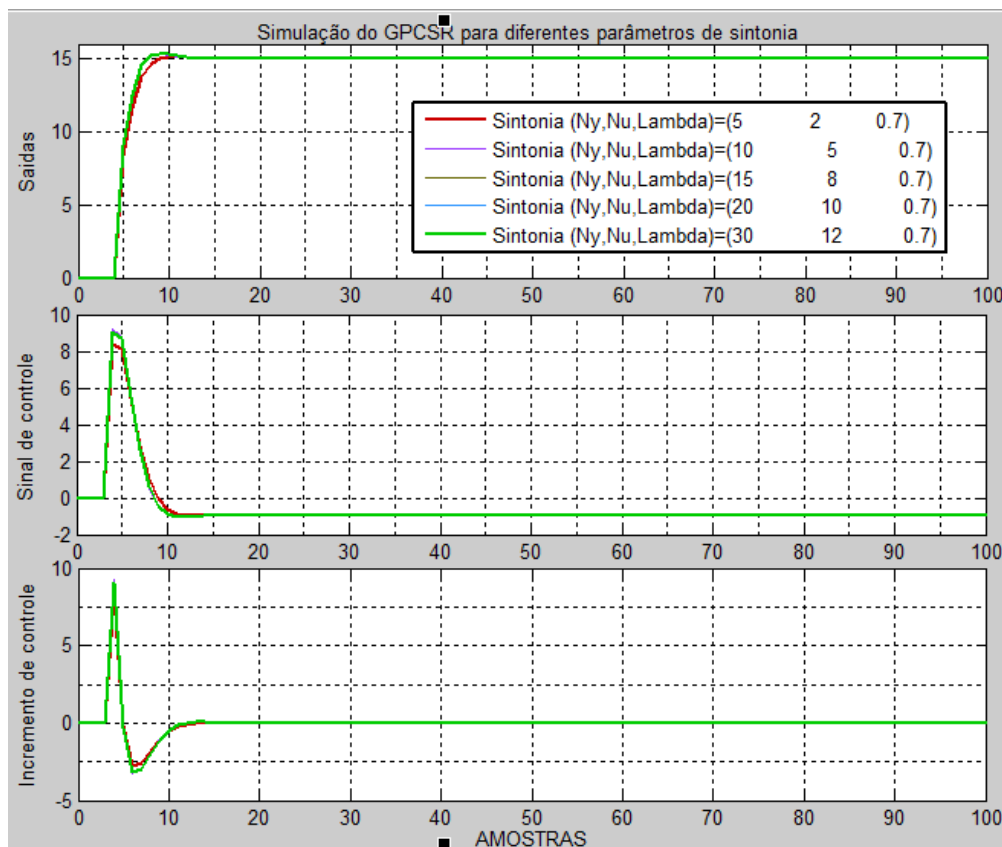


Figura 6.5-1. Simulação do GPC sem restrições

Para o caso do controlador GPC com restrições também foram realizadas simulações para analisar os efeitos das restrições impostas ao sinal de controle e sua variação, bem como para o sinal de saída do sistema. Conforme citado anteriormente, um horizonte de predição adequado deve ser igual ou maior ao tempo de acomodação do sistema. De acordo com a Figura 6.5-2, o tempo de assentamento do sistema é de 75 segundos para a região de operação definida, ou seja, aproximadamente 15 cm. Dado que o período de amostragem foi definido em 1.5 segundos, (ver seção 5.2.3). Então, um horizonte de predição adequado seria em torno de 30.

Com o intuito de ilustrar as consequências de um horizonte de predição inferior ao tempo de acomodação do sistema, foi simulado o GPC com restrições com os parâmetros da tabela 6-3. As restrições impostas foram escolhidas de acordo com as restrições físicas da planta, onde a restrição de entrada e sua taxa de variação, está relacionada tensão aplicada ao sistema. Enquanto que a restrição da saída é o nível do fluido no anular do poço dado em cm.

Na Figura 6.5-2 pode-se observar que o sistema torna-se instável em malha fechada, visto que o horizonte de predição é inferior ao tempo de acomodação da

planta. Ao passo que na Figura 6.5-3 onde o horizonte de predição foi definido como sendo igual ao tempo de acomodação da planta, o controlador tem um desempenho satisfatório. Ou seja, sem sobre sinal, erro nulo em regime estacionário e com um tempo de subida inferior a 10 segundos.

Figura	N_y	N_u	Lambda	u_{min}	u_{max}	Δu_{min}	Δu_{max}	y_{min}	y_{max}
Fig.(5-12)	15	10	0.7	0	7	-1	1	0	40
Fig.(5-13)	30	10	0.7	0	7	-1	1	0	40

Tabela 6-3. Parâmetro de sintonia do GPC com restrições

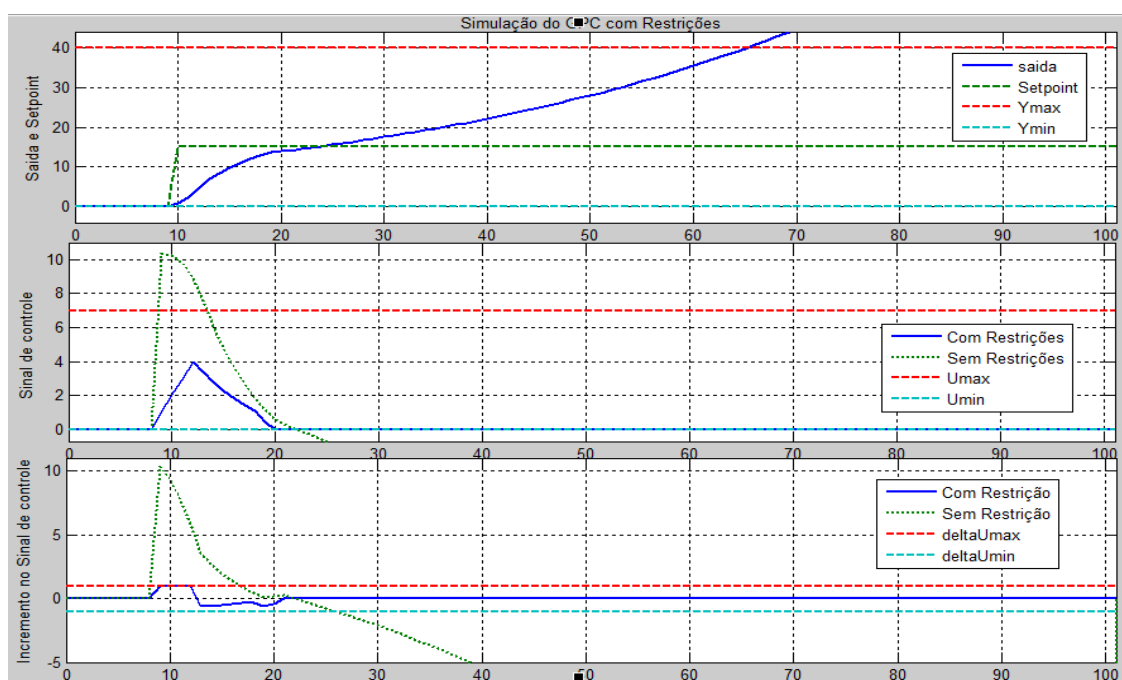


Figura 6.5-2. Simulação Do GPC com restrições, $N_y = 15$.

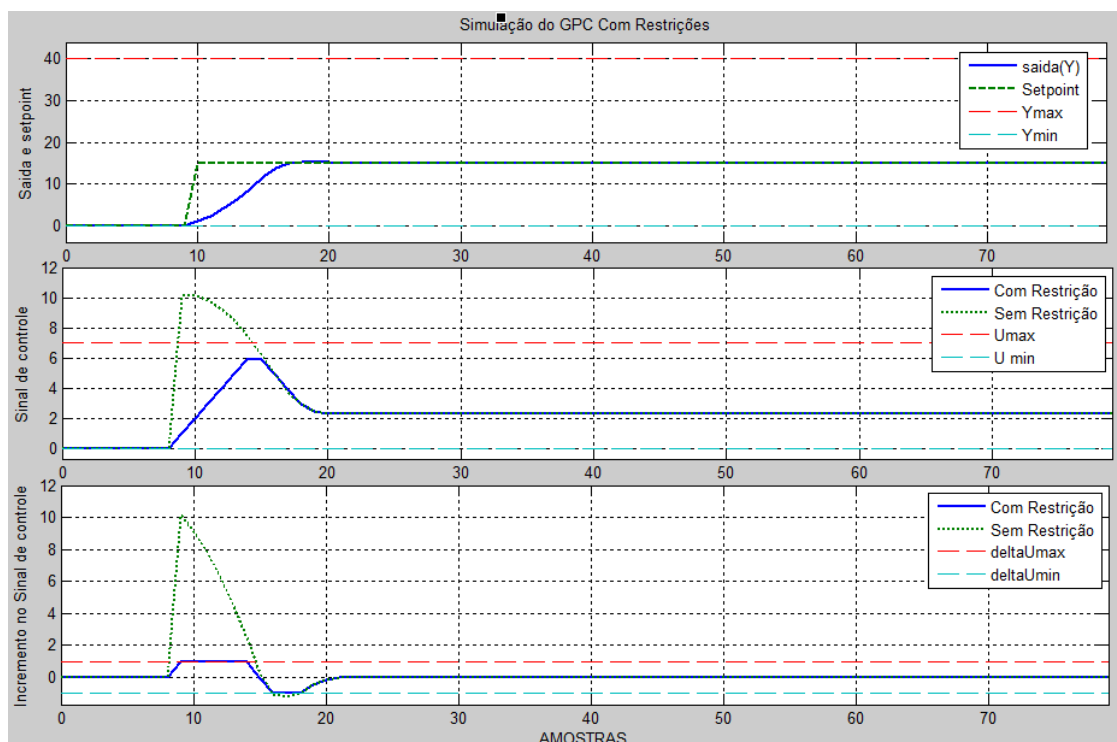


Figura 6.5-3. Simulação do GPC com restrições, $N_y = 30$.

6.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após o estudo detalhado do modelo do PBM quanto do algoritmo GPC em nível de simulação, o algoritmo GPC foi implementado. Para a implementação do controlador no PBM, os dados do processo são obtidos a partir de um sistema de automação que conta com um Controlador Lógico Programável, CLP e um computador com o *MATLAB/Simulink*, como discutido no capítulo cinco.

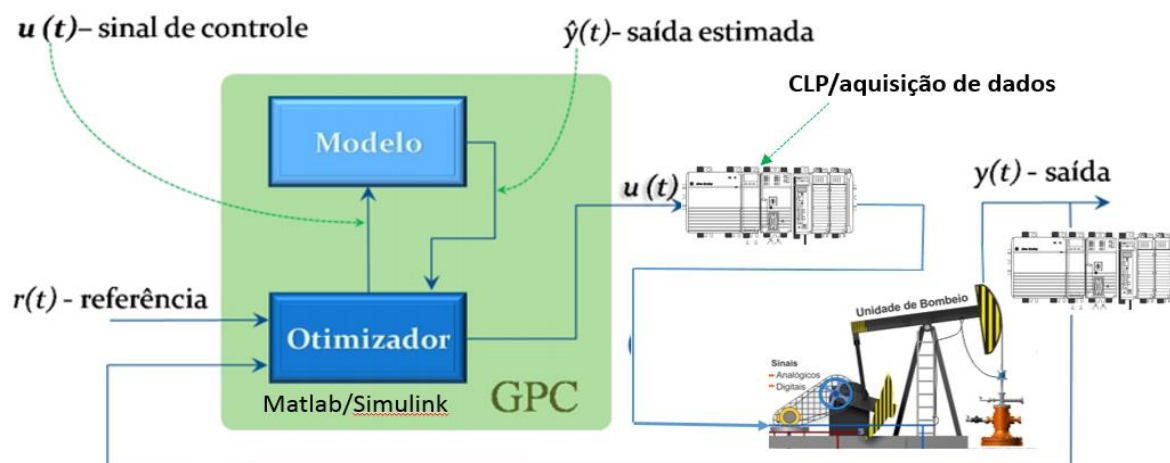


Figura 6.6-1. Esquema físico do sistema de controle GPCR aplicado PBM

A comunicação entre o CLP e o computador é estabelecida utilizando a tecnologia de comunicação *OLE for Process Control*, conhecida como OPC. A Figura 6.6-1 ilustra o esquemático físico do sistema de controle do PBM. Já a Figura 6.6-2 o diagrama de blocos do controlador implementado no ambiente do *Matlab/Simulink*.

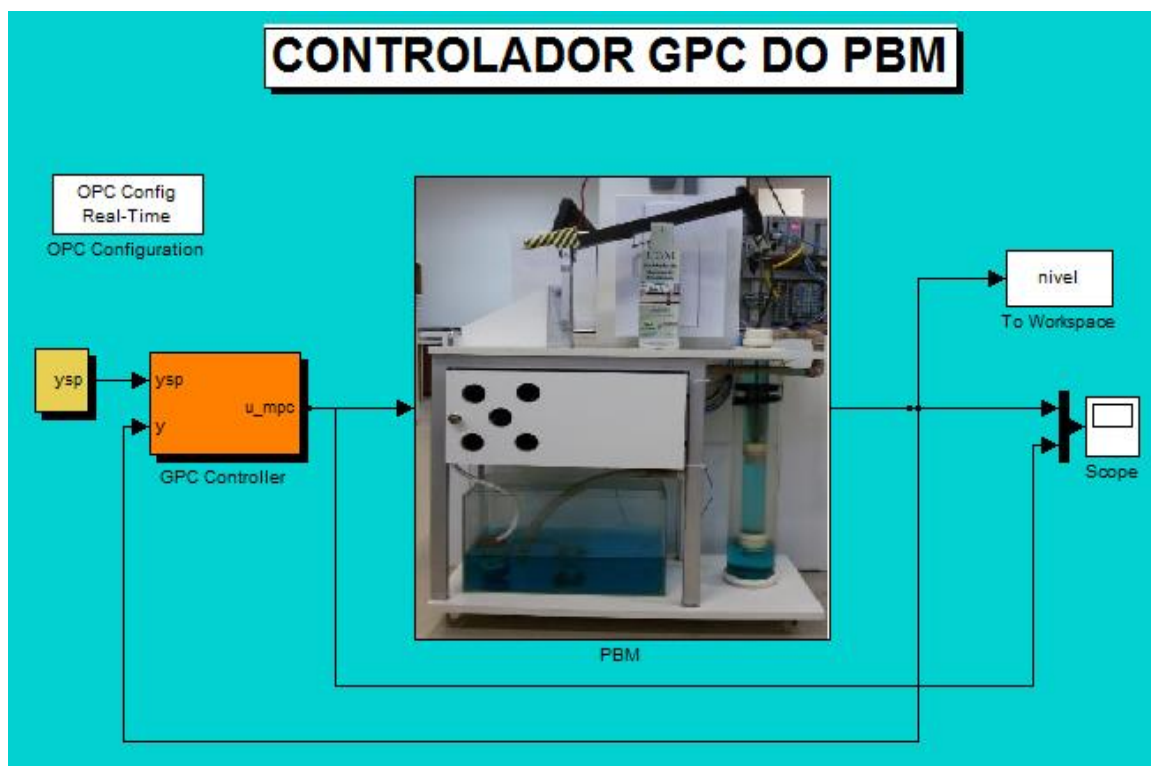


Figura 6.6-2. Diagrama de blocos do GPC

Nesta etapa de implementação e validação do controlador GPC com restrições foram realizados diversos testes. O objetivo é verificar a capacidade deste controlador perante a incertezas e dinâmicas não modeladas na etapa de identificação do sistema. Os parâmetros de sintonia que apresentaram os melhores resultados durante essas simulações estão contidos na Tabela 6-4. Nesta tabela também está o modelo identificado da planta e seu período de amostragem.

O primeiro teste consistiu em avaliar a resposta do sistema e do sinal de controle para um sinal de referência de 15 cm, a mesma referência utilizada na etapa de simulação. Uma vez que, do mesmo modo da simulação, é necessário saber, para corroborar a validade do controlador, sobre a estabilidade da resposta da saída da planta, robustez e rastreamento da referência. Nas Figura 6.6-3 (sinal de saída do sistema), Figura 6.6-4 (sinal do controlador) e Figura 6.6-5 (sinal de erro) são apresentados os resultados do controlador implementado.

Parâmetro do GPC	Valor
NY (horizonte de predição)	30
Nu (horizonte de controle)	10
λ (peso na variável de controle)	0.7
Umin (sinal de controle mínimo)	0 volts
Umax (sinal de controle máximo)	7 volts
Δu_{min} (taxa de variação do sinal de controle)	-1 volts
Δu_{max} (taxa de variação do sinal de controle)	1 volts
Ymin (sinal de saída mínimo)	0 cm
Ymax (sinal de saída máximo)	40 cm
Modelo identificado da planta	$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0.35z^{-1}}{1 - 0.7z^{-1} - 0.25z^{-2}}$
Período de amostragem	1.5 s

Tabela 6-4. Parâmetros de sintonia do GPC

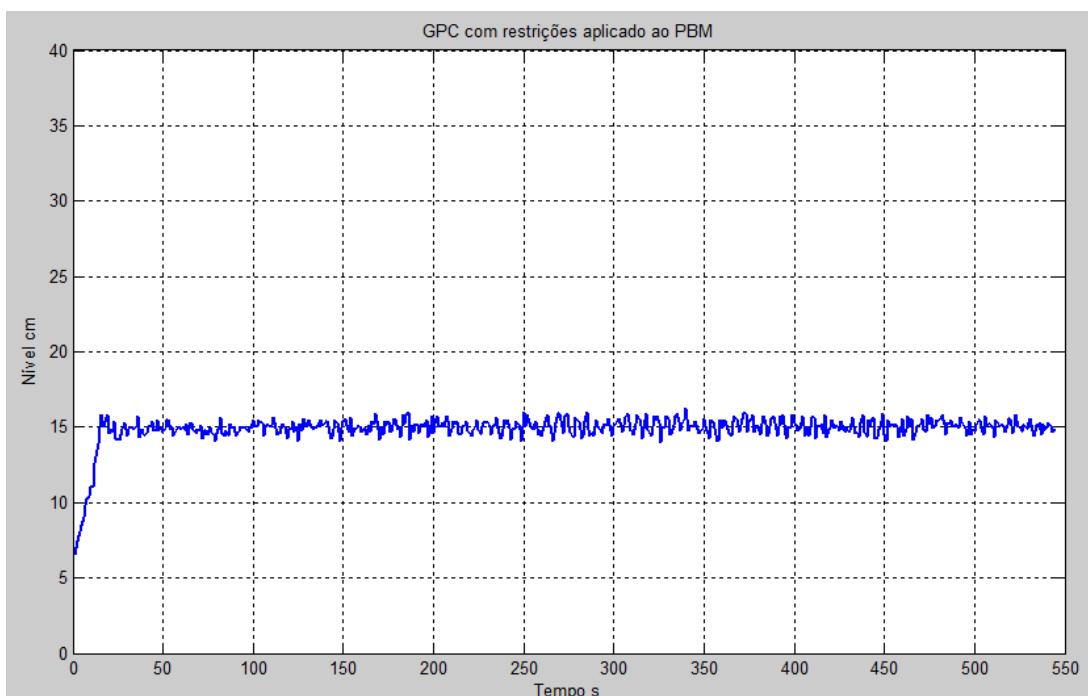


Figura 6.6-3. Resposta do sistema a um sinal de referência de 15 cm

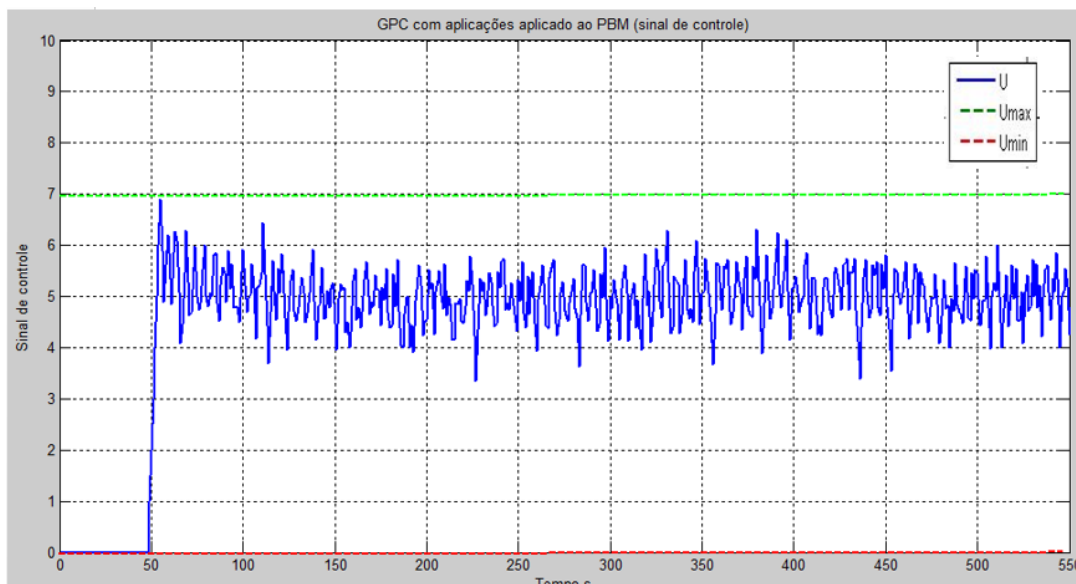


Figura 6.6-4. Sinal de controle para a um sinal de referência de 15 cm.

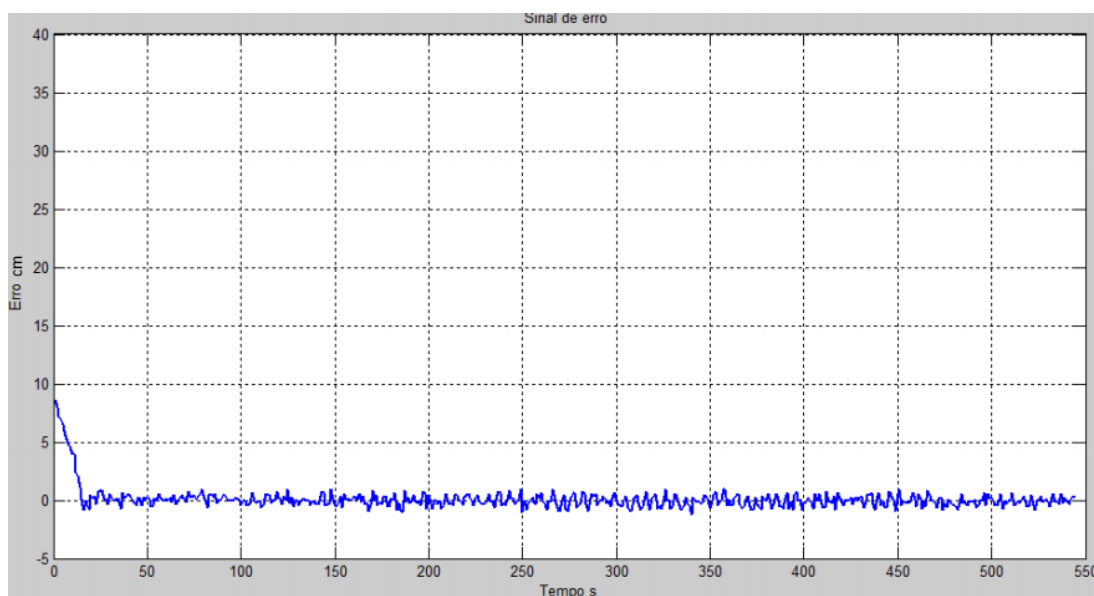


Figura 6.6-5. Sinal de erro

Nestas figuras (6.6-3, 6.6-4 e 6.6-5) nota-se que a planta exibe um comportamento já observado durante a etapa de simulações. O sinal de referência (Figura 6.6-3) é rastreado com um regime transitório rápido, de aproximadamente 20 segundos e estável em regime permanente. O tempo de resposta é bem menor daquele estabelecido nos requisitos de controle do PBM, de um minuto. Observa-se também que apesar de o sistema responder de forma satisfatória, há pequenas

oscilações. Estas oscilações, como já dito em secções anteriores, é devido ao harmônico causado pelo movimento alternativo das hastes. Também é possível notar que o sinal do controlador (Figura 6.6-4) comportou-se de forma limitada, variando basicamente entre 4.5 e 5.5 volts, evitando assim, movimentos bruscos da unidade de bombeio. O sinal de erro (Figura 6.6-5) dado em centímetros, manteve-se próximo de zero.

6.6.1 RESULTADOS PARA DIFERENTES REGIÕES DE OPERAÇÃO

Devido a restrições em causar distúrbios programados na planta, optou-se por dar vários degraus no sinal de referência do sistema. O objetivo é avaliar o controlador referente a robustez na presença de distúrbios, estabilidade da saída do sistema e rastreamento de referência, bem como analisar a capacidade do controlador de operar em diferentes regiões de operação, afastando-se da região de operação utilizada na fase de identificação. As Figura 6.6-6, Figura 6.6-7e Figura 6.6-8. Ilustram os resultados desses experimentos.

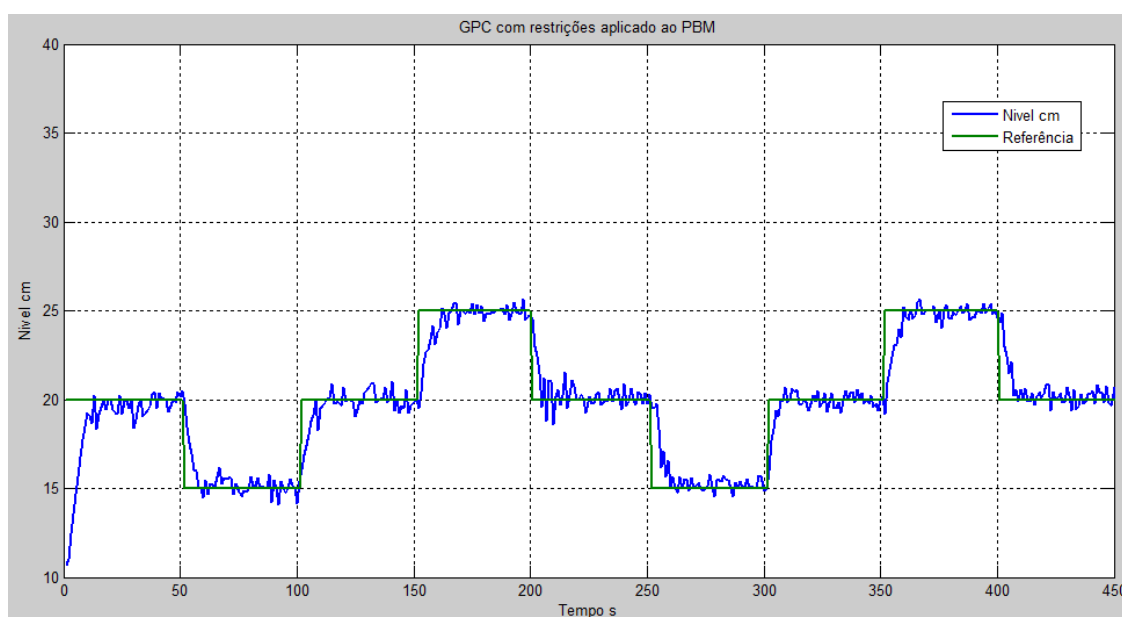


Figura 6.6-6. GPC para diferentes regiões de operação (sinal de saída)

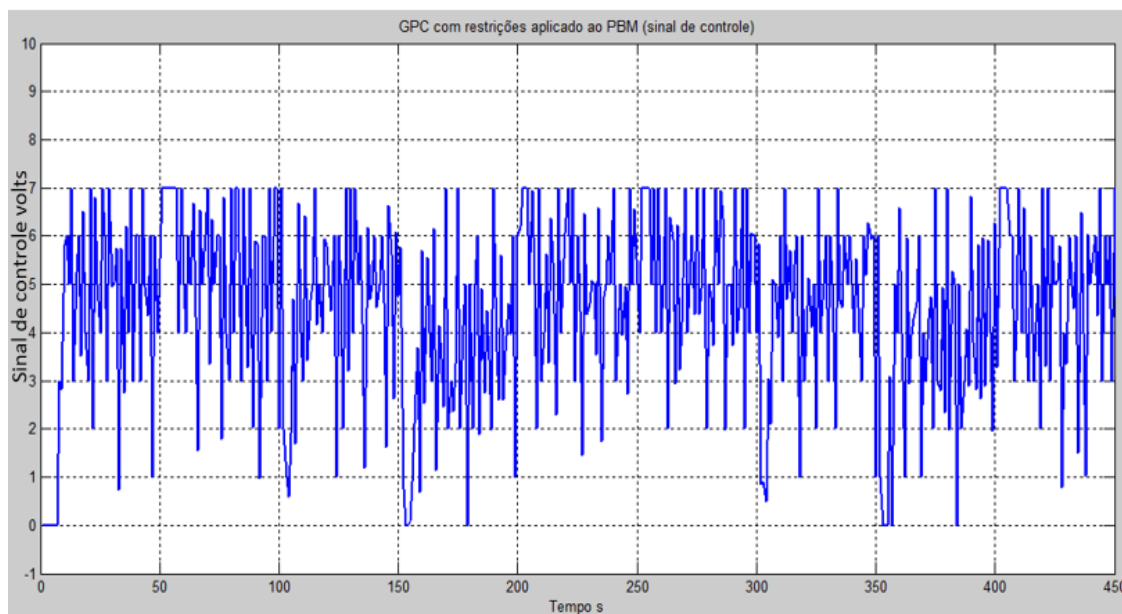


Figura 6.6-7. GPC para diferentes regiões de operação (sinal de controle).

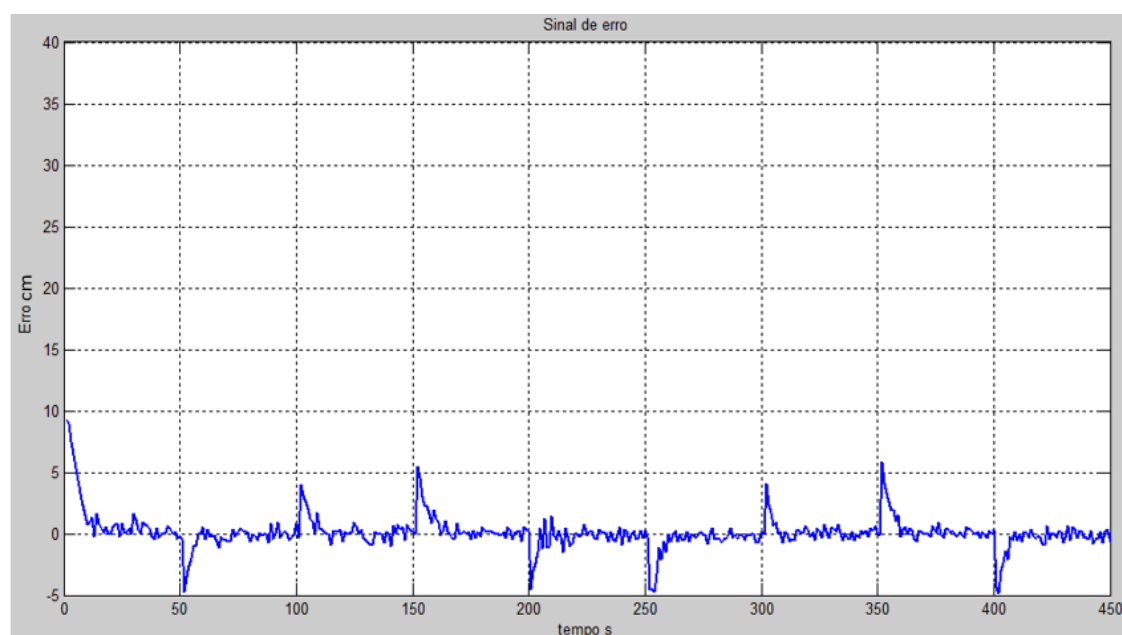


Figura 6.6-8. GPC para diferentes regiões de operação (sinal de erro)

Na Figura 6.6-6 nota-se que o sinal de saída do sistema rastreia a referência em diferentes regiões de operação. Isso indica a robustez do controlador preditivo generalizado visto que mesmo um modelo identificado para representar a dinâmica de uma determinada região de operação, pode não explicar muito bem a dinâmica de outras regiões do sistema.

Através da Figura 6.6-7 verifica-se que houve uma maior variabilidade do sinal de controle. Isso se deu pelos sucessivos degraus no sinal de referência o que faz

com que seja requerido um maior esforço de controle para rastreamento dos *setpoints*. Quanto a Figura 6.6-8, esta mostra que o sinal de erro manteve-se pequeno e limitado, próximo de zero.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

7.1 CONCLUSÕES

O método de elevação artificial por bombeio mecânico ainda demanda por estratégias de controle alternativas em relação a estratégias de controle tradicionais. Desse modo, simuladores como o de (ORDOÑEZ, 2008) ou protótipos para testes de tais algoritmos se fazem necessários. Nesse contexto, a presente dissertação teve três objetivos principais. O primeiro objetivo foi o desenvolvimento de um protótipo de uma unidade de bombeio mecânico. Para isso foram realizadas pesquisas a respeito do tema e a elaboração de um projeto. Seguindo os requisitos de projeto construiu-se unidade de bombeio, a eletrônica de sensoriamento e acionamento e por fim, um sistema de controle e supervisão. O protótipo construído funcionou satisfatoriamente dentro dos requisitos exigidos, simulando fenômenos físicos de uma unidade de bombeio real. Por exemplo, a pancada de fluido e apresentando os resultados em gráficos.

O protótipo desenvolvido mostrou-se como sendo uma ferramenta com potencial para ser transformada em produto, neste caso, uma bancada didática. Esta bancada poderá ser utilizada em salas de aula, por ser facilmente portátil e em laboratórios. O objetivo é facilitar a compreensão dos alunos em diversos temas como instrumentação, automação, controle e elevação artificial de petróleo. Tanto para cursos técnicos como superiores. Ela também poderá ser usada em pesquisas onde a bancada estará apta a servir de plataforma de testes para variadas estratégias de controle.

No entanto, apesar de todos esses atributos positivos mencionados com relação ao protótipo, alguns requisitos de projetos não foram totalmente atendidos. Um desses requisitos onde houve uma limitação foi na geração da carta dinamométrica. As cartas dinamométricas geradas não corresponderam ao que se era esperado e o motivo para essa divergência ainda não foi encontrado. Todavia, suspeita-se de que o elevado atrito entre a haste e o mancal localizado na cabeça de produção esteja provocando essa divergência. Outra suspeita levantada é que o cilindro, que tem a função de representar a camisa de produção, possui imperfeições ocasionando atrito com o pistão durante os ciclos de bombeio. Em trabalhos futuros pretende-se averiguação

desse problema e também a realização de um estudo aprofundado com relação aos diversos atritos existentes durante a operação do protótipo.

O segundo e terceiro objetivos do presente trabalho estão relacionados com o modelo dinâmico do sistema e seu controle. Depois de construído, o protótipo foi modelado fenomenologicamente. Entretanto, verificou-se que o modelo não era capaz de representar satisfatoriamente o sistema. Isso está relacionado a parâmetros não conhecidos, incertezas relacionadas à sua montagem elétrica e/ou mecânica, atritos não modelados, o que prejudicou o controle e o bom desempenho desse sistema quando operado com um controlador convencional, no caso o PID

Desse modo, foi proposto o desenvolvimento de um modelo dinâmico utilizando técnicas de identificação de sistemas e a implementação de um controlador avançado baseado em técnicas de controle preditivo. O modelo escolhido para a representar o sistema foi o paramétrico de entrada/saída ARX e o algoritmo utilizado para estimar seus parâmetros foi o dos mínimos quadrados recursivo, MQR. Pôde-se constatar que o modelo da planta desenvolvido, dentro da região de operação de interesse, possui a capacidade de representar as principais dinâmicas do sistema. Atendendo assim, as expectativas e se mostrando adequado ao escopo do problema proposto.

Quanto aos resultados do controlador GPC, tanto em ambiente simulado quanto na implementação no protótipo, mostrou-se adequado. Uma vez que, foi verificado que o sinal de referência foi rastreado de forma satisfatória e robusta, tanto na região de operação determinada, quanto para regiões de operação diferentes. Isso mostra que o controlador GPC é robusto mesmo em situações em que o modelo não seja tão fiel ao sistema. Os resultados apresentados validam a viabilidade de aplicação, tanto das técnicas de identificação de sistema para a obtenção de modelos, quanto a implementação do GPC na indústria de petróleo. Visto que o GPC está apto a controlar satisfatoriamente o nível de fluido do anular do protótipo e que pode ser estendido para uma sistema de bombeio mecânico real, de forma garantir a estabilidade geral do sistema e o bom desempenho de produção.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

A partir desta pesquisa ainda pretende-se:

- Aplicar melhorias no protótipo, por exemplo, em relação a construção das cartas dinamométricas.
- Implementar o controlador GPC em uma planta de bombeio real, neste caso, a unidade de bombeio mecânico do LEA que encontra-se disponível no Centro de Capacitação Tecnológica em Automação Industrial (CTAI) na UFBA;
- Desenvolvimento GPC adaptativo baseado em seus parâmetros de sintonia;
- Implementação do GPC em sistemas embarcados de baixo custo (como em micro controladores pic ou arduino)
- Avaliar a possibilidade de desenvolvimento de uma versão do GPC para ser implementada diretamente em linguagem de CLP (*Ladder*).
- Desenvolver um pacote de software comercial baseado no algoritmo GPC.

8 REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. (2007). *Introdução à Identificação de sistemas Técnicas Lineares E Não Lineares Aplicadas A Sistemas Reais 3º Edição*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.(s.d.).
- BARRETO FILHO, M. D. (1993). Geração de Carta Dinamometrica Para Diagnóstico de Bombeio Mecânico em Poços de Petróleo. *Dissertação de Mestrado*. Campinas, Brasil: Universidade Estadual de Campinas.
- AGUIRRE, L. A. (2007). *Introdução à Identificação de sistemas Técnicas Lineares E Não Lineares Aplicadas A Sistemas Reais 3º Edição*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- BEZERRA, M. A. (2010). Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Reconhecimento de Padrões de Cartas Dinamometricas de sistemas de bombeio Mecânico de Petróleo. *Dissertação de Mestrado*. Salvador/BA, Brasil: Universidade Federal da Bahia.
- BOBÁL, V., BOHM, J., FESSL, J., & MACHACEK, J. (2005). *Digital Self Tuning Controllers, Algorithms, Implementations and Applications*. London: Springer Verlag.
- CAJUEIRO, E. B. (2012). *Inferindo Posição e Carga de Haste Polida de Bombeio Mecânico a Partir Da Corrente de Saida de um Inversor de Frequência*. Salvador/BA: UFBA.
- CAMACHO, E. F., & BORDONS, C. (2004). *Model Predictive Control, 2º Edition*. LONDON: Springer-Verlag.
- CLARKE, D. W. (1988). Application of Generalized Predictive Control to Industrial Processes. *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 122:49-55.
- CLARKE, D. W., MOHTADI, C., & TUFFS, P. S. (1987). Generalized Predictive control. Parts, 1 e 2. *Automática*, 25, pp. 137-160.
- COELHO, A. A., & COELHO, L. D. (2004). *Identificação De Sistemas Dinâmicos Lineares*. Florianópolis: UFSC.
- CUTLER, C. R., & RAMAKER, B. L. (1980). Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm. *Proceedings American Control Conference*.
- ENDERS, W. (1995). *Applied Econometric Time Series*. Nova York: John Wiley.

- FONTES, A. D. (2002). Desenvolvimento E Avaliação De Controladores Preditivos Baseados Em Modelos Bilineares. *Tese de Doutorado*. Natal, Rio Grande Do Norte, Brasil: Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte.
- Linkers, M. M. (Janeiro de 1997). Generalised Predictive control (GPC): A powerful control tool in medicine. *IEE Proc. - Control Theory Appl.*
- LJUNG, L. (1987). *System Identification: Theory For The User*. Prentice Hall.
- LJUNG, L., & GLAD, T. (1994). *Modelling Of Dynamical Systems*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- MACIEJOWSKI, J. M. (2001). *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall.
- Mahfonf, M., Linkers, D. A., & Asbury, A. J. (Janeiro de 1997). Generalised Predictive Control (GPC): A powerful tool control in medicine. *IEE*, pp. 8-14.
- Motorola, Inc. 1997. (2015). www.datasheetcatalog.com.
- OGATA, K. (2011). *Engenharia De Controle moderno, 5ª Edição*. Pearson Education.
- ORDOÑEZ, B. (2008). Proposta de Controle de operação de Poços Com Bombeio Mecânico Através da Pressão de Fundo. *Dissertação de Mestrado*. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.
- PEREIRA, W. F. (1997). *Projeto e Avaliação do Controlador Preditivo Generalizado sujeito a Restrições Via Métodos de Otimização de Pontos Interiores*. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC.
- QIN, S. J., & BADGWELL, T. A. (2003). A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice Control 11*, pp. 733 - 764.
- RICHALET, J. (1993). Industrial Applications Of Model Based Predictive Control. *Automática*, 29, pp. 1251-1274.
- RICHALET, J. (1993). *Pratique de la command Predictive*. Hermès.
- RICHALET, J., RAULT, A., TESTUD, J. L., & JAPON, J. (1978). Model Predictive Heuristic Control Applications To Industrial Processes. *Automática*, 14, pp. 413-428.
- ROSSITER, J. A. (2003). *Model Based Predictive Control- A practical Approach*. CRC Press.
- SCHNITMAN, L. (Abril de 2014). Controle E Automação de Processos. *Departamento De Mecatrônica E Instituto de Matemática*.
- SILVA, D. A., & SCHNITMAN, L. (2015). Controle Preditivo Generalizado Aplicado A Um Prototipo De Bombeio Mecânico. *Congresso Rio Automação* .

- SOUZA, F. E. (2006). Estudo E Implementação em Plantas Físicas De Um controlador Preditivo Geberalizado. *Dissertação De Mestrado*. Natal, RN, Brasil: UFRN.
- THOMAS, J. E., TRIGGIA, A. A., & CORREIA, C. A. (2001). *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Rio de Janeiro, BRASIL: Interciência.
- TORRES, L. H. (2012). Modelage, Identificação E Controle Adaptativo De Sistema De Bombeio Mecânico Para Poços De Petróleo. *Dissertação*. Salvador, Bahia, Brasil: Universidade Federal da Bahia.
- TORRES, L. H., & SCHNINTMAN, L. (18 a 21 de agosto de 2010). Controle Adaptativo Por Modelo De Referência De Uma Planta Reduzida De Um Sistema De Bombeio Mecânico. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*.
- VALE, V. A. (2011). Controle de Posição de um robô Cartesiano por meio de técnicas adaptativas. *Dissertação*. João Pessoa, Paraíba, Brasil: Universidade Federal da Paraíba.
- VAN DEN HOF, P. J., & BOMBOIS, X. (2004). System Identification For Control. *Literatura Note Disc Course*. Lecture Notes DISC Course.
- WANG, L. (2009). *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. London: Spring-Verlag.